

A large rocket launch is shown against a clear blue sky. The rocket is white with a black nose cone and is surrounded by a massive plume of bright orange and yellow fire and white smoke. The launch is taking place on a launch pad, with various structures and scaffolding visible. The overall scene is dynamic and powerful.

# ΔΙΑΣΤΗΜΙΚΕΣ ΤΕΧΝΟΛΟΓΙΕΣ

Καθηγητής Βάιος Λάμπας

## Περιεχόμενα

Κεφάλαιο 1 Εισαγωγή στην Διαστημική .....	6
1.1 Ιστορία του Διαστήματος .....	7
1.2 Περιγραφή διαστημικών οργανισμών .....	18
1.3 Πολιτική του Διαστήματος .....	25
1.4 Εξερεύνηση του Διαστήματος – Η Αρχή .....	26
1.5 Σημαντικότερες Διαστημικές Αποστολές .....	29
Κεφάλαιο 2 Διαστημικές Εφαρμογές .....	40
2.0 Εφαρμογές του Διαστήματος .....	40
2.1 Τηλεπαρατήρηση/Τηλεπισκόπηση .....	41
2.2 Δορυφορικές Επικοινωνίες .....	44
2.3 Πλοήγηση - Εντοπισμός Θέσης – Χρονισμός (Positioning, Navigation, Timing – PNT). .....	46
2.4 Έρευνα-Διάσωση .....	48
2.5 Μετεωρολογία .....	50
Κεφάλαιο 3 Αγορά/Οικονομία του Διαστήματος .....	52
3.0 Εισαγωγή.....	52
3.1 Δημόσια/κρατικά προγράμματα διαστημικής.....	53
3.2 Εμπορικές Δραστηριότητες .....	54
3.3 Ιδιωτικές Επενδύσεις – Εποχή ‘New Space’ .....	56
Κεφάλαιο 4 Βασικές Έννοιες Μηχανικής .....	57
4.1 Ομαλή κυκλική κίνηση .....	58
4.2 Η Έννοια της Ορμής.....	63
4.3 Αρχή Διατήρησης της Ορμής (ΑΔΟ) .....	66
4.3.1 Η Αρχή Κίνησης των Πυραύλων .....	66
4.4 Βαρυτικό Πεδίο .....	71
4.4.1 Το πεδίο που δημιουργείται από σημειακή μάζα .....	72
4.4.2 Το Βαρυτικό Πεδίο της Γης.....	75
4.4.3 Ταχύτητα Διαφυγής.....	76
Κεφάλαιο 5 Αρχή Λειτουργίας Πυραύλων .....	80
5.1 Ειδική Ώθηση.....	84
5.2 Εξίσωση Tsiolkovsky - Θεμελιώδης Νόμος της Πυραυλικής Προώθησης/Κίνησης.....	85
5.3 Στάδια Πυραύλων.....	87
Κεφάλαιο 6 Διαστημικό Περιβάλλον .....	91

6.0 Τι είναι το Διάστημα?.....	91
6.1 Το Ηλιακό Σύστημα .....	91
6.2 Το Σύμπαν.....	93
6.3 Το Διαστημικό Περιβάλλον .....	93
6.3.1 Βαρύτητα.....	94
6.3.2 Ατμόσφαιρα.....	96
6.3.3 Κενό .....	98
6.3.4 Μικρομετεωρήτες και Διαστημικά απόβλητα .....	100
6.3.5 Η ακτινοβολία.....	101
6.3.6 Φορτισμένα σωματίδια.....	103
Κεφάλαιο 7 Τροχιακή Μηχανική.....	107
7.1 Διαστημικοί Φορείς (Space Launchers) .....	107
7.2 Συστήματα Δορυφόρων .....	108
7.3 Κατηγορίες Δορυφόρων.....	108
7.4 Τροχιές.....	109
7.4.1 Ύψη δορυφόρων.....	110
7.4.2 Ίχνη Δορυφόρων.....	114
7.5 Κατανόηση/Ανάλυση Τροχιών .....	117
7.6 Ανάλυση κίνησης (Κινηματική ανάλυση).....	119
7.7 Νόμοι του Νεύτωνα, Ορμή και Νόμοι του Κέπλερ .....	121
7.7.1 Μεταβολή της Ορμής .....	124
7.7.2 Βαρύτητα.....	126
7.7.3 Νόμοι του Κέπλερ (Νόμοι της πλανητικής κίνησης) .....	129
7.8 Αρχή Διατήρησης της Ορμής (ΑΔΟ) και Αρχή Διατήρησης Μηχανικής Ενέργειας (ΑΔΜΕ).....	129
7.9 Συστήματα Δύο Σωμάτων .....	135
7.9.1 Σύστημα συντεταγμένων.....	135
7.9.2 Εξισώσεις Τροχιακής/Πλανητικής Κίνησης .....	137
7.9.3 Τροχιακή γεωμετρία.....	140
7.9.4 Ειδική Μηχανική Ενέργεια .....	144
7.10 Περιγραφή Τροχιών .....	149
7.10.1 Καθορισμός των κλασικών τροχιακών στοιχείων (ΚΤΣ).....	150
7.10.2 Υπολογίζοντας τα Τροχιακά Στοιχεία .....	157
7.11 Ελιγμοί στο διάστημα.....	166
7.11.1 Μεταφορά Hohmann .....	167
7.11.2 Αλλαγή Επιπέδου/Κλίσης Τροχιάς .....	176

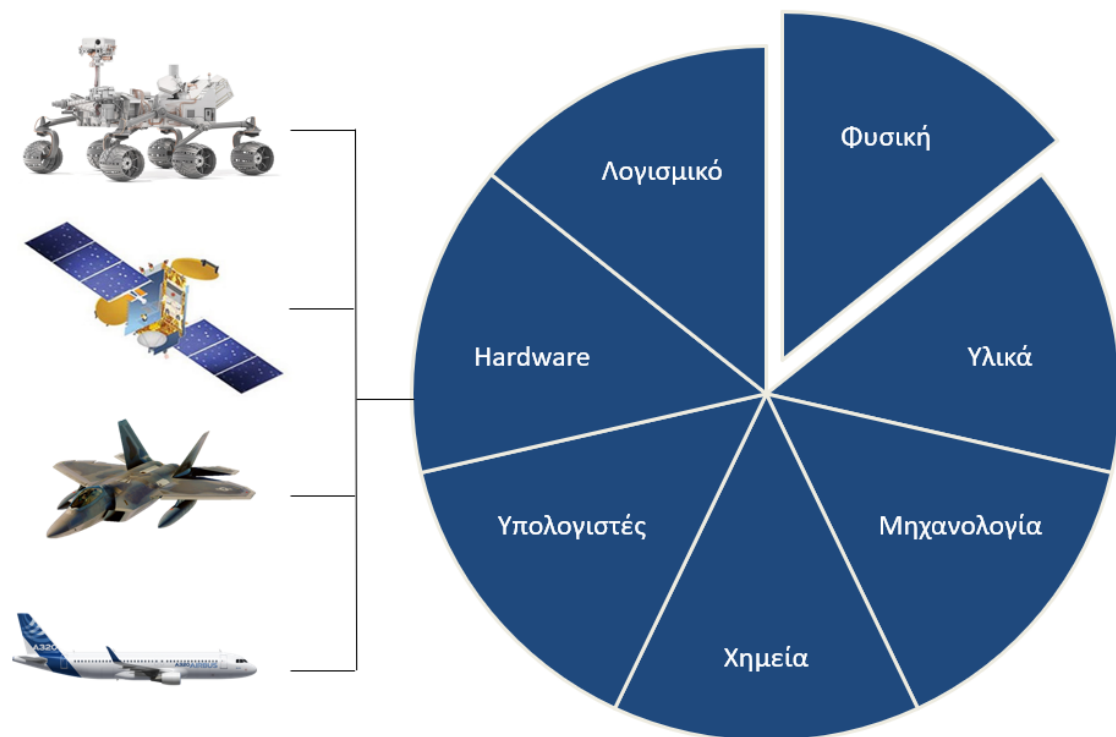
7.12 Τροχιακά Ραντεβού .....	180
Κεφάλαιο 8 _Συστήματα Διαστημικής και Υποσυστήματα Δορυφόρων.....	190
8.1 Σχεδιασμός διαστημικής αποστολής .....	191
8.2 Καθορισμός απαιτήσεων και περιορισμών αποστολής .....	192
8.2.1 Απαιτήσεις συστήματος και περιορισμοί .....	196
8.2.2 Εμπορικές απαιτήσεις .....	198
8.2.3 Σχεδιασμός ωφέλιμου φορτίου και υποσυστημάτων .....	198
8.2.4 Δορυφορική Πλατφόρμα.....	200
8.2.4.2 Υποσύστημα επικοινωνιών και διαχείρισης δεδομένων .....	201
8.2.4.3 Υποσύστημα ηλεκτρικής ενέργειας.....	202
8.2.4.4 Υποσύστημα ελέγχου περιβάλλοντος και υποστήριξης ζωής .....	202
8.2.4.5 Δομές και Μηχανισμοί Δορυφόρων .....	202
8.2.4.6 Υποσύστημα προώθησης .....	203
8.2.5 Διαδικασία Σχεδιασμού Διαστημικών Συστημάτων .....	204
Κεφάλαιο 9 Υποσύστημα προσδιορισμού και ελέγχου προσανατολισμού Δορυφόρων -ΥΠΕΠ (Attitude Determination and Control Subsystem – ADCS).....	209
Κεφάλαιο 10 Υποσύστημα Δομών και Μηχανισμών .....	221
10.1 Βασικές Έννοιες Μηχανικής .....	224
10.1.1 Τύποι Φορτίων .....	224
10.1.2 Ταλαντώσεις .....	226
10.1.3 Ιδιότητες Υλικών .....	227
10.1.4 Άλλες Βασικές Αρχές Μηχανικής .....	228
10.2 Το Περιβάλλον Εκτόξευσης .....	228
10.3 Μηχανική Διάρθρωση Δορυφόρων .....	229
10.4 Συμπεριφορά υλικών στο Διάστημα .....	231
10.5 Συμπεράσματα .....	233
Κεφάλαιο 11 _Υποσύστημα Ηλεκτρικής Ισχύος.....	237
11.1 Λειτουργίες Υποσυστήματος.....	241
11.2 Συσσωρευτές/Μπαταρίες Δορυφόρων .....	244
11.3 Σχεδιασμός Ηλιακής Συστοιχίας.....	246
Κεφάλαιο 12 Υποσύστημα αποθήκευσης και διαχείρισης δεδομένων.....	252
12.1 Βασικές αρχές λειτουργίας .....	254
12.2 Διαχείριση Δεδομένων .....	255
12.3 Αρχιτεκτονική Υποσυστήματος Διαχείρισης και Υπολογισμού Δεδομένων (ΥΔΥΔ) .	257
Κεφάλαιο 13 Υποσύστημα Τηλεπικοινωνιών/Ζεύξεων .....	261
13.1 Σχεδιασμός και οργάνωση δορυφορικού συστήματος .....	263

13.2 Υπηρεσίες και εφαρμογές δορυφορικών επικοινωνιών.....	265
13.3 Προϋπολογισμός Δορυφορικής Ζεύξης (Satellite Link budget) .....	267
Κεφάλαιο 14 Υποσύστημα Θερμικής Προστασίας.....	270
14.1 Αρχές θερμικού ελέγχου .....	271
Μεταφορά θερμότητας.....	272
14.2 Μέθοδοι θερμικού ελέγχου .....	276
14.3 Σχεδιασμός υποσυστήματος Θερμικού Ελέγχου (ΥΘΕ) .....	280
Βιβλιογραφία.....	284

# Κεφάλαιο 1

## Εισαγωγή στην Διαστημική

Το διάστημα πλέον αποτελεί αναπόσπαστο κομμάτι της καθημερινής μας ζωής. Τηλεπικοινωνίες, τηλεόραση, χρηματοοικονομικές συναλλαγές, πλοήγηση, μετεωρολογία, μεταφορές, ασφάλεια, είναι εφαρμογές που τα συστήματα διαστημικής τεχνολογίας πλέον αναπόσπαστο κομμάτι τους και που συνδέονται απόλυτα με την καθημερινότητα του μέσου πολίτη. Για παράδειγμα, μελέτες του BBC και αμερικανικών φορέων έχουν υπολογίσει τις οικονομικές συνέπειες μιας προσωρινής απώλειας των δορυφορικών συστημάτων πλοήγησης Global Positioning System (GPS) ή Galileo (Ευρωπαϊκό δορυφορικό σύστημα πλοήγησης) σε 1 δισεκατομμύριο δολάρια ΗΠΑ για κάθε ημέρα μη διαθεσιμότητας του συστήματος.



**Σχήμα 1: Η επιστήμη της Αεροδιαστημικής είναι η σύνθεση πολλών επιστημών – Διεπιστημονικότητα**

Η ανθρωπότητα σήμερα απολαμβάνει τεράστια οφέλη από έναν μεγάλο αριθμό (εκατοντάδες) από δορυφόρους που βρίσκονται σε χαμηλή γήινη τροχιά (ΧΓΤ) ή σε γεωστατική τροχιά (ΓΕΤ) με εφαρμογές τηλεπαρατήρησης της γης, μετεωρολογίας, τηλεπικοινωνιών (τηλεόραση, τηλεφωνικές ζεύξεις, παροχή διαδικτύου), πλοήγησης, αλλά και διαστημικούς σταθμούς/επανδρωμένες αποστολές αφιερωμένες στους τομείς της βιολογίας, ιατρικής, επιστήμης των υλικών και μη επανδρωμένες αποστολές αστροφυσικής και γενικότερα εξερεύνησης του διαστήματος, των πλανητών και γενικότερα του ηλιακού μας συστήματος. Η έντονη διαστημική δραστηριότητα που έχει αναπτυχθεί εδώ και δεκαετίες έχει δημιουργήσει ένα νέο οικονομικό τομέα, την αγορά του διαστήματος (ΑτΔ) που έχει πλέον μέγεθος άνω των 350 δισεκατομμυρίων ευρώ ετησίως με ένα υψηλό δείκτη ανάπτυξης που ξεπερνά το 10% ετησίως και που απασχολεί ανθρώπινο δυναμικό με εξαιρετικά υψηλό

ακαδημαϊκό και μορφωτικό επίπεδο με διεπιστημονικό και διαπολιτισμικό υπόβαθρο. Η επένδυση στην τεχνολογία, εφαρμογές του Διαστήματος αποτελεί πλέον οικονομικό και πολιτικό εργαλείο οικονομικής ανάπτυξης για πολλά κράτη ανεξαρτήτου μεγέθους, διεθνής οργανισμούς και της βιομηχανίας, καθώς μελέτες του Ευρωπαϊκού Οργανισμού Διαστήματος (ΕΟΔ/ESA) και του Αμερικανικού Οργανισμού Αεροδιαστημικής και Αεροναυτικής (NASA) έχουν υπολογίσει ότι κάθε ευρώ ή δολάριο που επενδύετε στον τομέα του διαστήματος, επιστρέφει πάνω από 7 ευρώ πίσω στην γενικότερη οικονομία, μία ιδιαίτερα υψηλή απόδοση/επιστροφή επένδυσης (ROI-return on investment).

Η τεχνολογία και η γνώση για να φτάσουμε στο σημείο να μπορούμε να στέλνουμε ανθρώπους και μη επανδρωμένα διαστημικά οχήματα, δορυφόρους στο διάστημα είναι κάτι που αποκτήθηκε με πολύ μεγάλο κόπο, μέσω ανταγωνισμού, πολέμων, πολιτικών ανταγωνισμών και γεωπολιτικών συσχετισμών αλλά και υγιούς ανταγωνισμού και τα ιδιαίτερα τα τελευταία χρόνια μέσω της ιδιωτικής πρωτοβουλίας και της αλματώδους προόδου στους τομείς της μικροηλεκτρονικής, τεχνολογίας υλικών και μεθόδων παραγωγής αλλά και την εισαγωγή της νοοτροπίας νεοφυών επιχειρήσεων και της ανάπτυξης νέων διαστημικών εφαρμογών βασιζόμενα στις τεχνικές τεχνητής νοημοσύνης (TN), διαδίκτυο των πραγμάτων (ΔτΠ/ΙoT) και μεγάλα δεδομένα και αναλυτική (ΜΔΑ),

Στις επόμενες παραγράφους γίνεται μία περιγραφή των κυριότερων ιστορικών γεγονότων, οργανισμών, πολιτικών και διαστημικών αποστολών που επηρέασαν και επηρεάζουν τον τομέα της διαστημικής αλλά και της ανθρωπότητας γενικότερα.

### 1.1 Ιστορία του Διαστήματος

Τα πρώτα βήματα προς την επιστημονική θεώρηση του Σύμπαντος, έγιναν στην Αρχαία Βαβυλωνία και την Αίγυπτο, το 5.000 περίπου, π.Χ. Οι συστηματικές παρατηρήσεις άρχισαν από το 3.000 και κατά την δεύτερη χιλιετία, οι πλανήτες είχαν ήδη ενταχθεί στο ζωδιακό σύστημα ενώ γύρω στο 1.000, υπάρχουν, πια σημειώσεις και αναφορές γύρω από τις κινήσεις τους.

Στις αρχές του 6ου π.χ. αιώνα, ο Θαλής ο Μιλήσιος, στον οποίο αποδίδεται η θεμελίωση της Επιστήμης, των Μαθηματικών και της Φιλοσοφίας, ταξίδεψε στην Αίγυπτο και διδάχθηκε απ' αυτούς, ιδρύοντας ύστερα την ονομαστή Ιωνική σχολή της Ελληνικής Αστρονομίας. Ο Θαλής πρόέβλεψε την ηλιακή έκλειψη της 28ης Μαΐου 585 π.χ. και μέτρησε την φαινόμενη διάμετρο του Ήλιου. Αργότερα, οι οπαδοί του προχώρησαν παραπέρα. Ο Αναξιμένης διατύπωσε την υπόθεση ότι υπάρχουν πολλά, σαν την Γη, ουράνια σώματα καθώς και ότι ο άνθρωπος προέρχεται από άλλα ζώα, ο Ηράκλειτος είδε τον ουρανό γεμάτο από ουράνια φωτιά ενώ ο Αναξιμανδρος ήξερε ότι η Γη, δεν είναι επίπεδη.

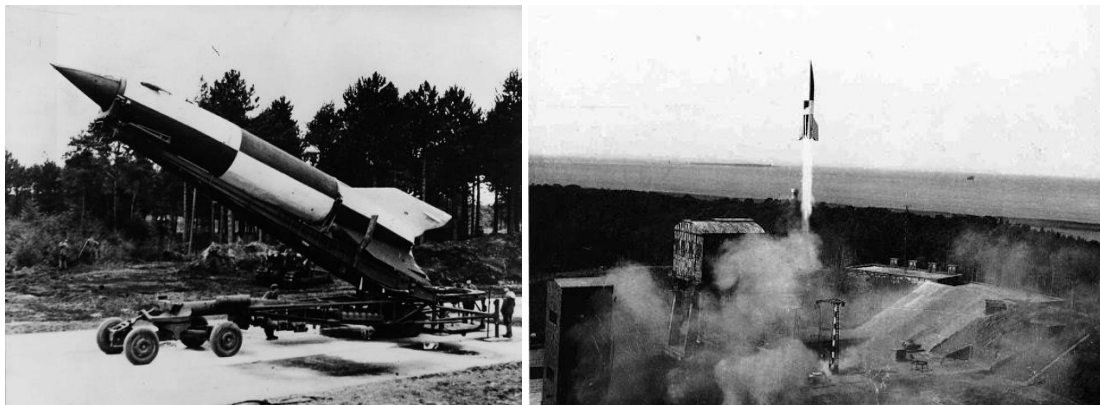
Μία άλλη σχολή, στη Σάμο έκανε παράλληλα τις δικές της εκτιμήσεις. Ο ιδρυτής της, ο Πυθαγόρας, από τον 6ο έως τον 4ο αιώνα, υποστήριξε με θέρμη την σφαιρικότητα της Γης, ο Ηρακλείδης εξήγησε την ημερήσια περιφορά των άστρων, υποθέτοντας ότι η Γη στρέφεται γύρω από τον άξονα της, ενώ ο Αρίσταρχος, έκανε πρώτος λόγο για ηλιοκεντρικό σύστημα.

Ο Ερατοσθένης, (276 - 192 π.χ.) υπολόγισε με ακρίβεια την περιφέρεια της Γης και ο Ίππαρχος, ο μεγαλύτερος Έλληνας αστρονόμος, μέτρησε το μέγεθος του Ήλιου και της Σελήνης. Μεταξύ 141 και 127 π.χ., ο Πτολεμαίος δεχόμενος την λανθασμένη άποψη του Ίππαρχου, που τοποθετούσε τη Γη στο κέντρο του Σύμπαντος. Οι αναμφίβολα, σπουδαίες αυτές γνώσεις χρησίμευσαν στον άνθρωπο, ώστε να αρχίσει να αντιλαμβάνεται τον κόσμο γύρω του. Το επόμενο βήμα ήταν, λοιπόν, να προσπαθήσει, πειραματικά στην αρχή, να ταξιδέψει προς αυτούς τους νέους ορίζοντες.

Πολλοί επιστήμονες ασχολήθηκαν με τομείς του Διαστήματος κατά τον μεσαίωνα, την αναγέννηση αλλά οι μεγαλύτερες ανακαλύψεις στον τομέα έγιναν την σύγχρονη εποχή, μετά το 1900. Το 1903, Ρώσος επιστήμονας, Κωνσταντίν Τσιολκόφσκι διατυπώνει και δημοσιεύει

για πρώτη φορά, τους θεμελιώδεις μαθηματικούς νόμους της κίνησης των πυραύλων και τα κύρια συμπεράσματα τους και είναι από τους πρώτους που θα προβλέψει την εξάπλωση της ζωής στο ηλιακό μας σύστημα. Αφιέρωσε πολύ χρόνο μελετώντας θεωρητικά τους πυραυλοκινητήρες και υπολογίζοντας την ενεργειακή αξία διαφόρων συνδυασμών καυσίμων. Το 1920, στην Αερική ένας επιστήμονας, ο Robert Goddard δημιούργησε τον πρώτο πύραυλο υγρών καυσίμων χρησιμοποιώντας κηροζίνη και υγρό οξυγόνο. Την ίδια περίπου περίοδο ο Ουγγρο-γερμανός Hermann Oberth και αυτός πανεπιστημιακός, άρχισε να δημοσιεύει εργασίες πάνω στο αντικείμενο της αστροναυτικής και να δίνει με επιστημονικό τρόπο τους τρόπους που θα μπορούσε να εξερευνηθεί το διάστημα με διαστημικές πτήσεις. Θεωρείται ένας από τους πατέρες την διαστημικής με τον Τσιολκόφσκι και τον Γκόνταρτ και ακολούθησε την γερμανική ομάδα του Πεενεμούντε στην Αμερική, συνεισφέροντας στο Διαστημικό πρόγραμμα της Αμερικής.

Ο 2<sup>ος</sup> Παγκόσμιος Πόλεμος (ΠΠ) αποτέλεσε τον καταλύτη για την ανάπτυξη των περισσότερων τεχνολογιών και εφαρμογών αεροδιαστημικής σήμερα, όπως τα ραντάρ, την προώθηση αεροσκαφών με κινητήρες 'jet', την ανάπτυξη πολύπλοκων συστημάτων όπως στροβιλοκινητήρων, μπαταριών και πυραύλων ως μερικά παραδείγματα. Έτσι η τεχνολογία των πυραύλων ήταν λογικό να προσελκύσει το ενδιαφέρον στρατιωτικών από όλους τους συμμετέχοντες στον 2<sup>ο</sup> ΠΠ, ως ένα οπλικό σύστημα που θα μπορούσε να λειτουργήσει ως προέκταση του πυροβολικού, στέλνοντας φορτία με εκρηκτικά σε μακρύτερες αποστάσεις από ότι ήταν εφικτό εκείνη την αποχή, αυτόνομα με μεγαλύτερη ταχύτητα και μικρή δυνατότητα αναχαίτησης από τον αντίπαλο. Γερμανοί επιστήμονες εργάζονταν πυρετωδώς πάνω στην ανάπτυξη βαλλιστικών πυραύλων αν και οι περισσότεροι είχαν στο μυαλό τους τα διαστημικά ταξίδια. Κοντά στις ακτές της Βαλτικής, στο Πεενεμούντε, χιλιάδες Γερμανοί μηχανικοί και επιστήμονες, υπό την καθοδήγηση ενός ιδιαίτερα χαρισματικού μηχανικού, του Wehner Von Braun, εργάζονταν για την παραγωγή ενός γιγάντιου κατευθυνόμενου βλήματος, του A-4, γνωστότερου ως V-2. Ο V-2 ήταν ένα βλήμα βάρους 12,5 τόνων, που θα έφτανε σε ύψος 80 χιλιομέτρων και ο κινητήρας του απαιτούσε ισχύ, μεγαλύτερη των 500.000 ίππων. Ο V-2 ήταν ένα τεχνολογικό θαύμα για την εποχή του (αλλά και μετά), έχοντας επιλύσει ιδιαίτερα δύσκολα και πολύπλοκα τεχνολογικά προβλήματα στην τεχνολογία και παραγωγή πυραύλων. Έχοντας δοκιμαστεί επιτυχώς το 1942 αλλά με πολλά προβλήματα (ευτυχώς για τους συμμάχους) αξιοπιστίας, έναντι στόχων στην Αγγλία και ιδιαίτερα στο Λονδίνο, οι πύραυλοι V-2 με τον κατάλληλο χρόνο και ρυθμό βελτιστοποίησης και παραγωγής θα μπορούσε να είχαν αλλάξει τον ρου του 2<sup>ου</sup> ΠΠ αν και ευτυχώς για τους συμμάχους και την ανθρωπότητα οι εκτεταμένοι βομβαρδισμοί δεν επέτρεψαν την περαιτέρω ανάπτυξη και παραγωγή της τεχνολογίας πυραύλων (αλλά και άλλων ιδιαίτερα δολοφονικών όπλων και τεχνολογιών που ανέπτυσαν οι Ναζί εκείνη την εποχή όπως π.χ. η πυρηνική βόμβα).



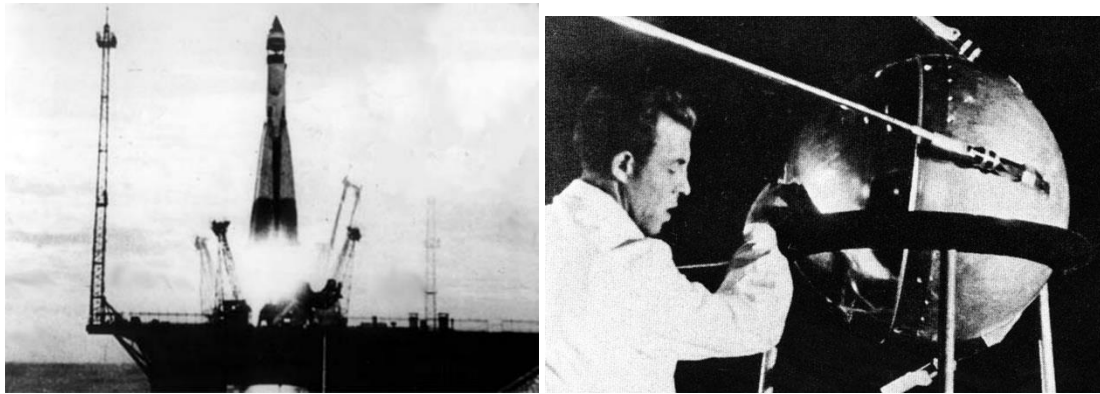
Σχήμα 2: Ο Βαλλιστικός πύραυλος V-2 στο Πεενεμούντε



Εκείνο που οφείλουμε να παραδεχθούμε είναι ότι, ακόμη και κάτω από αυτές τις συνθήκες πολέμου, είναι επιβεβαιωμένο από πολλές πηγές ότι ο άνθρωπος εργάστηκε για να πραγματοποιήσει ένα πανάρχαιο όνειρο του και στο Πεενεμούντε -το όνειρο της διαστημικής πτήσης- όπου και έγινε το μεγάλο άλμα στην τεχνολογία των πυραύλων/διαστημικών εκτοξευτών. Ο Βέρνερ φον Μπράουν, εξάλλου, δεν ενδιαφερόταν για την επικράτηση του τρίτου Ράιχ αλλά, για την κατάκτηση του διαστήματος. Σε μία μυθιστορηματική επιχείρηση των Αμερικανικών δυνάμεων στην Γερμανία το Μάρτιο του 1944 με τον τίτλο 'paperclip' (συνδετήρας), ο Βέρνερ φον Μπράουν με πάνω από 200 Γερμανούς επιστήμονες αεροδιαστημικής, συνελήφθη αιφνιδίως και κρατήθηκε στην φυλακή για δύο εβδομάδες, επειδή είχε δηλώσει - αναφέρω ακριβώς τα λόγια του: 'ο V-2 δεν προοριζόταν για πολεμικό όπλο, όταν τον ανέπτυσσα. Είχα στο μυαλό μου, το διαστημικό ταξίδι και λυπόμουνα για την επιχειρησιακή του χρήση.' Αυτό επιβεβαιώνεται άλλωστε, και από το ότι οι Γερμανοί είχαν αναπτύξει θεαματικά την ικανότητα των υγρά, προωθούμενων πυραύλων, με σκοπό να κατασκευάσουν οχήματα για ταξίδια, στο διάστημα. Όταν δε, τελείωσε ο πόλεμος, η ομάδα Ντόρμπεργκερ - Μπράουν, στο Πεενεμούντε είχε έτοιμα σχέδια για δορυφόρο βαλλιστικό πύραυλο, με ακτίνα δράσης 3.500 μίλια αλλά και για - πρώτη φορά - τριώροφο πύραυλο για διαστημική πτήση. Όλες αυτές οι γνώσεις μεταβιβάστηκαν στις Η.Π.Α. όπου ο ομάδα φον Μπράουν έχοντας μεταφερθεί στην μακρινή Αλαμπάμα στις ΗΠΑ (σε απομόνωση για να λόγους ασφάλειας αλλά και άλλων λόγων) δημιούργησε το Αμερικανικό βαλλιστικό πρόγραμμα και διαστημικό πρόγραμμα, που έστειλε μετά από 2 δεκαετίες τον άνθρωπο στην Σελήνη με το πρόγραμμα 'Apollo' Απόλλων. Οι Γερμανοί επιστήμονες στην Αμερική αλλά και αυτοί που κατόρθωσαν να συλλάβουν οι Σοβιετικοί στο τέλος του 2<sup>ου</sup> ΠΠ αποτέλεσαν τους πατέρες, στην κυριολεξία, των διαστημικών προγραμμάτων των ΗΠΑ και της Σοβιετικής Ένωσης. Είναι άλλωστε γνωστό ότι χιλιάδες Γερμανοί επιστήμονες που ασχολούντο με τα προγράμματα ανάπτυξης πρωτοποριακών όπλων και τεχνολογιών 'μεταφέρθηκαν' με την θέληση τους (αλλά και χωρίς αυτή) σε πολλές χώρες νικήτριες του 2<sup>ου</sup> ΠΠ και εργάστηκαν σε διάφορα προγράμματα αεροδιαστημικής, ενέργειας, μεταφορών και μηχανικής.

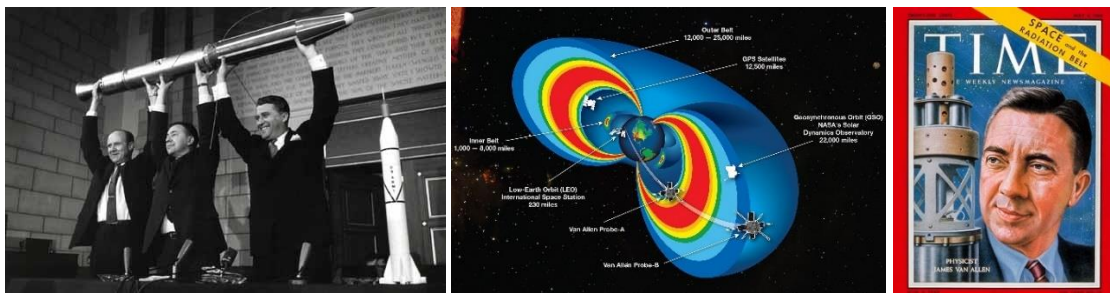
Ύστερα από μία δεκαετία ανάπτυξης πυραύλων (βαλλιστικών πυραύλων) αλλά και διαστημικών εκτοξευτών βασιζόμενα στην τεχνογνωσία της ομάδας φον Μπράουν και στα δύο άκρα του κόσμου, στις ΗΠΑ και της Σοβιετικής Ένωσης, η ανθρωπότητα βρισκόταν στην δύνη του Ψυχρού Πολέμου όπου ο τεχνολογικός, στρατιωτικός και γεωπολιτικός ανταγωνισμός ανάμεσα στην Δύση και την Σοβιετική Ένωση (Ανατολή) αποτελούσε τον τρόπο της ανθρωπότητας με την κάθε πλευρά να προσπαθεί να προβάλει τα μεγαλύτερα στρατιωτικά και τεχνολογικά επιτεύγματα και να αναπτύσσει φονικά όπλα όπως η ατομική βόμβα, βόμβα υδρογόνου, υπερηχητικά βομβαρδιστικά με πυρηνικά φορτία, βαλλιστικούς πυραύλους και προηγμένα πολιτικά συστήματα κάθε είδους. Η εμφάνιση της ατομικής βόμβας είχε ως αποτέλεσμα τη δημιουργία ενός κλίματος απειλής, οπότε και ο συνακόλουθος ανταγωνισμός στο πεδίο της επιστήμης ήταν αναπόφευκτος. Με την ανακατάληψη των χώρων εκτόξευσης των πυραύλων V-2 και του εργοστασίου κατασκευής τους, οι Σοβιετικοί αποφάσισαν να στηριχθούν στην τεχνολογία αυτή, με στόχο τη δημιουργία ενός πανίσχυρου διηπειρωτικού πυραύλου. Ο πύραυλος αυτός θα είχε την ικανότητα να ξεπεράσει τη γήινη βαρύτητα, να μπει σε τροχιά γύρω από τη Γη, και στη συνέχεια, εκμεταλλευόμενος την περιστροφή της, να πέσει σε προεπιλεγμένο σημείο του εδάφους. Παράλληλα, Αμερικανοί επιστήμονες καταπιάνονταν επίσης με την ανάπτυξη της τεχνολογίας των εν λόγω πυραύλων. Στόχος και των δύο ήταν η υπεροχή σε εξοπλισμό διηπειρωτικών βαλλιστικών βλημάτων, ως φορείς πυρηνικών όπλων μεγάλης ακτίνας. Πριν από 60 ακριβώς χρόνια, σε μια απομακρυσμένη περιοχή του Καζακστάν και με την άκρατη μυστικότητα που επικρατούσε στη διάρκεια του Ψυχρού Πολέμου, η τότε Σοβιετική Ένωση προετοίμαζε ένα τεχνολογικό κατόρθωμα που θα άφηνε άναυδο ολόκληρο τον κόσμο, ενώ συγχρόνως θα μετέφερε και στο Διάστημα τον ανταγωνισμό των δύο υπερδυνάμεων, των Ηνωμένων Πολιτειών της Αμερικής και της τότε Σοβιετικής Ένωσης. Στις 4 Οκτωβρίου του 1957, από τις πυραυλικές

εγκαταστάσεις του Διαστημικού Κέντρου του Μπαϊκονούρ, η Σοβιετική Ένωση έθεσε σε τροχιά τον πρώτο τεχνητό δορυφόρο, τον «Σπούτνικ 1». Επρόκειτο για μια μεταλλική σφαίρα με μέγεθος 58 εκατοστών και βάρος περίπου 83 κιλών, η οποία περιφέρονταν γύρω από τη Γη μία φορά κάθε 96 λεπτά. Έτσι, για πρώτη φορά ο άνθρωπος κατόρθωσε να θέσει ένα δικό του δημιούργημα στο κενό του Διαστήματος, τα ρυθμικά ραδιοσήματα του οποίου χαιρέτιζαν μια νέα εποχή στην ιστορία του ανθρώπινου πολιτισμού: την εποχή του Διαστήματος. Ένα μήνα αργότερα, οι Ρώσοι επανέλαβαν το θριαμβευτικό τους κατόρθωμα, τοποθετώντας σε τροχιά μια σκυλίτσα, με το όνομα Λάικα, ως επιβάτη ενός διαστημοπλοίου 500 περίπου κιλών, του «Σπούτνικ 2».



**Σχήμα 3: Η Εκτόξευση του πρώτου δορυφόρου Sputnik-1 με τον φορέα R-7, πρόδρομο του σημερινού Soyuz**

Η Αμερική δεν άργησε να ακολουθήσει. Τέσσερις μήνες μετά τον «Σπούτνικ 1» εκτοξεύτηκε ο πολύ μικρότερος και ελαφρύτερος πρώτος αμερικανικός δορυφόρος «Explorer-1/Εξερευνητής 1» (31 Ιανουαρίου 1958). Κι έτσι την 1η Οκτωβρίου 1958, ένα χρόνο μετά την εκτόξευση του «Σπούτνικ 1», και με τη δημιουργία της Αμερικανικής Διαστημικής Υπηρεσίας (NASA), ένας αγώνας δρόμου άρχισε τότε ανάμεσα στην τότε Σοβιετική Ένωση και τις Ηνωμένες Πολιτείες για την κατάκτηση του Διαστήματος. Την ίδια περίοδο οι Αμερικανοί προσπαθούσαν να φτάσουν τους πρωτοπόρους Σοβιετικούς. Μία τεράστια προσπάθεια από επιστήμονες, μηχανικούς, στρατιωτικούς στην Αμερική οδήγησε να τεθούν οι βάσεις για μετέπειτα επιτυχίες στην διαστημική, άμυνα και τις διαστημικές εφαρμογές. Για παράδειγμα, ο James Van Allen του State University ανακάλυψε το 1958 με την εκτόξευση του Αμερικανικού δορυφόρου ‘Explorer-1 και 3’ τις ζώνες Van Allen, οι οποίες είναι περιοχές με συγκέντρωση σωματιδίων υψηλής ενέργειας, κυρίως πρωτονίων και ηλεκτρονίων, γύρω από την Γη, κάνοντάς τον έναν από τους σημαντικότερους επιστήμονες του Διαστήματος. Οι ζώνες Van Allen, είναι σημαντικές και κρίσιμες για την σχεδίαση δορυφόρων και διαστημικών οχημάτων καθώς επηρεάζονται τα ηλεκτρονικά τους (αντοχή, απόδοση και χρόνος λειτουργίας) από τα σωματίδια υψηλής ενέργειας τα οποία μπορούν να διαπεράσουν μια πλάκα από ατσάλι πάχους 3 εκατοστών (θωράκιση) ή να προκαλέσουν σοβαρές βλάβες στα κύτταρα διαπερνώντας το ανθρώπινο σώμα..



**Σχήμα 4: Ο πρώτος Αμερικανικός δορυφόρος Explorer-1 με τους Von Braun, Van Allen, οι ζώνες Van Allen γύρω από την Γη**

Δεκάδες πύραυλοι και τεχνητοί δορυφόροι εκτοξεύτηκαν και από τις δύο πλευρές, στην προσπάθειά τους να μάθουν όσο το δυνατόν περισσότερα για τον διαστημικό χώρο, που οδήγησαν τελικά στην πρώτη επανδρωμένη αποστολή στο Διάστημα του Ρώσου κοσμοναύτη Γιούρι Γκαγκάριν (12 Απριλίου 1961).



**Σχήμα 5: Ο Φορέας R-7 μεταφέρει την κάψουλα VOSTOK με τον πρώτο αστροναύτη σε τροχιά, Yuri Gagarin**

Η πρώτη επανδρωμένη φάση του αμερικανικού προγράμματος για τη Σελήνη εκτελέστηκε με την ονομασία Πρόγραμμα Mercury (Ερμής) και άρχισε στις 5 Μαΐου 1961, ένα μήνα μετά την πτήση του Γκαγκάριν. Στην Ουάσιγκτον, στη διάρκεια της γιορτής που έγινε για να τιμηθεί ο Άλαν Σέπαρντ, ο πρώτος Αμερικανός στο Διάστημα, ο πρόεδρος Τζον Κένεντι έθεσε στόχο την επανδρωμένη επίσκεψη στη Σελήνη πριν από το τέλος της δεκαετίας του 1960. Ηθικός αυτουργός και κινητήρια δύναμη του προγράμματος ήταν ο Πρόεδρος Kennedy, αφού με αυτό τον τρόπο επεδίωκε την ανάκτηση του χαμένου κύρους των Η.Π.Α. μετά την αποτυχημένη εισβολή στον Κόλπο των Χοίρων. Τα κίνητρα του προγράμματος ήταν κυρίως πολιτικά, παρά επιστημονικά, αφού υπήρχαν εντάσεις και ανησυχίες σχετικά με την κατάλληλη προετοιμασία των Η.Π.Α. για ένα τόσο σημαντικό διαστημικό πρόγραμμα. Έναν στόχο που οριοθετούσε ξεκάθαρα πλέον τον διαστημικό ανταγωνισμό Αμερικής - Σοβιετικής Ένωσης. Ο στόχος αυτός προϋπέθετε μια σειρά από εκατοντάδες επιτεύγματα σε διάφορους επιστημονικούς και τεχνολογικούς τομείς. Επιτεύγματα που απαιτήσαν δεκάδες πτήσεις, επανδρωμένων και μη, διαστημικών οχημάτων.

Τελικά, τον Ιούλιο του 1969, πάνω από μισό δισεκατομμύριο άνθρωποι σ' ολόκληρο τον κόσμο γίναμε μάρτυρες ενός κατορθώματος που έως τότε το θεωρούσαμε μάλλον αδύνατο, όταν πάνω στη σκονισμένη επιφάνεια της Σελήνης αποτυπώθηκε για πρώτη φορά ένα ανθρώπινο χνάρι που έγινε το σύμβολο «ενός τεράστιου άλματος για την ανθρωπότητα». Τα επόμενα τρία χρόνια, από το 1969 έως τον Δεκέμβριο του 1972, ολόκληρη η ανθρωπότητα παρακολούθησε από τις οθόνες των τηλεοράσεων μια από τις μεγαλύτερες εξερευνήσεις της ανθρώπινης ιστορίας. Με τη βοήθεια εκατοντάδων χιλιάδων επιστημόνων, μηχανικών και τεχνικών, συνολικά 27 αστροναύτες περιφέρθηκαν γύρω από τον φυσικό δορυφόρο της Γης, ενώ 12 απ' αυτούς περπάτησαν και εξερεύνησαν έξι διαφορετικές περιοχές της επιφάνειας της Σελήνης.



**Σχήμα 6: Εκτόξευση της αποστολής Apollo 11 που μετέφερε τον πρώτο άνθρωπο στο Φεγγάρι**

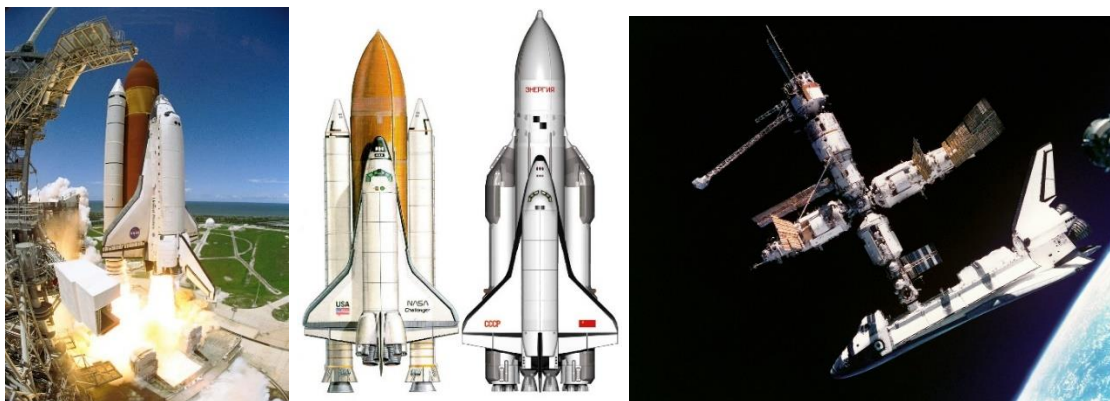
Η αλματώδης αυτή εξέλιξη της αεροδιαστημικής, εντός μιας μόνο δεκαετίας, είναι ενδεικτική της ακμής της επιστήμης και της έρευνας κατά την περίοδο του Ψυχρού Πολέμου. Η Ε.Σ.Σ.Δ. ενέτεινε τις προετοιμασίες της για ένα αντίστοιχο πρόγραμμα. Άλλωστε, η νίκη των Αμερικανών σε αυτό τον “πόλεμο των άστρων”, μέσω της κατάκτησης της Σελήνης, δημιούργησε μεγάλη ταπείνωση στο Σοβιετικό καθεστώς. Δημιουργήθηκε, λοιπόν, ο πύραυλος N1, με στόχο να αναπληρώσει το χαμένο έδαφος, και να φέρει εις πέρας το ταξίδι στο δορυφόρο της Γης. Παρ’ όλα αυτά, και οι τέσσερις προσπάθειες εκτόξευσης που πραγματοποιήθηκαν, απέτυχαν. Αποτέλεσμα ήταν η ακύρωση του προγράμματος το 1976, ενώ με την ήττα αυτή προξενήθηκε ένα από τα μεγαλύτερα πλήγματα για τη Σοβιετική Ένωση. Το τέλος του διαστημικού ανταγωνισμού σηματοδοτήθηκε από την κοινή Αμερικανοσοβιετική αποστολή Apollo-Soyuz, τον Ιούλιο του 1975. Πλέον, δημιουργήθηκε ένα πνεύμα συνεργασίας, με αμοιβαία παροχή πληροφοριών και υποστήριξης, και το ενδιαφέρον μετατοπίστηκε προς τη μελέτη άλλων ουράνιων σωμάτων του διαστήματος, και όχι προς την κατάκτησή του. Με βάση το Διεθνές Δίκαιο, άλλωστε, το διάστημα δεν μπορούσε να αποτελέσει αντικείμενο εθνικής ιδιοποίησης, και τα δύο κράτη δεσμεύτηκαν να μην εγκαταστήσουν ποτέ πυρηνικά όπλα στην εν λόγω περιοχή. Το διάστημα έπαψε να θεωρείται εθνική υπόθεση, αλλά αποτελούσε πλέον επιχείρηση ολόκληρης της ανθρωπότητας. Η υλοποίηση τέτοιων εγχειρημάτων έφερε επανάσταση σε πληθώρα τεχνολογικών και επιστημονικών τομέων, όπως η πυραυλική, οι τηλεπικοινωνίες, η πληροφορική και τα ηλεκτρονικά συστήματα.

Για πολλούς ο ανηλεής ανταγωνισμός μεταξύ των δύο υπερδυνάμεων στην κούρσα για την κατάκτηση του διαστήματος σε συνδυασμό με την ταυτόχρονη κούρσα των στρατιωτικών εξοπλισμών, είχαν ως αποτέλεσμα την οικονομική και πολιτική εξουθένωση του Σοβιετικού καθεστώτος και στο τέλος της δεκαετίας του 1980 την διάλυση της Ε.Σ.Σ.Δ., όπου και σήμανε και το τέλος του Ψυχρού Πολέμου. Το τέλος της ΕΣΣΔ και την διαστημικής κούρσας οδήγησε στην δεκαετία του ’90 στην στενή συνεργασία των ΗΠΑ, Ρωσίας με τις πτήσεις του Διαστημικού Λεωφορείου (Space Shuttle) όπου πραγματοποίησε δεκάδες αποστολές σύνδεσης με τον Διαστημικό Σταθμό MIR, ο οποίος ανήκοντας στην Ρωσία πλέον, (Πρώην ΕΣΣΔ) παρέμεινε στο Διάστημα ως εργαστήριο ανάπτυξης νέων τεχνολογιών, διεθνούς συνεργασίας (με την NASA και τον Ευρωπαϊκό Οργανισμό Διαστήματος – ESA) δοκιμών μακροχρόνιας διαμονής/εργασίας στο Διάστημα.

Το υψηλό κόστος των διαστημικών αποστολών οδήγησε στις διεθνείς συνεργασίες, ιδιαίτερα στις διαστημικές αποστολές εξερεύνησης αλλά και στην ανάπτυξη νέων πιο οικονομικών διαστημικών αποστολών, κυρίως ρομποτικής μορφής. Το υψηλό κόστος εκτόξευσης (> 50-100 χιλιάδων ευρώ ανά κιλό) και η πολυπλοκότητα των διαστημικών συστημάτων έκανε τους διαστημικούς σχεδιαστές να αναπτύξουν δορυφορικές πλατφόρμες και ρομποτικές συσκευές με μικρότερη μάζα, τους μικροδορυφόρους αλλά και να αναπτύξουν συστήματα

που μπορούσαν να λειτουργούν περισσότερο αυτόνομα, με ελαχιστοποίηση του ανθρώπινου παράγοντα, ώστε να ελαττωθεί το κόστος των διαστημικών αποστολών.

Μετά από την ιστορική εποχή του προγράμματος εξερεύνησης της Σελήνης (Apollo), η Αμερικανική κυβέρνηση Νίξον, εν μέσω μεγάλων ενεργειακών, πολιτικών και οικονομικών κρίσεων, αλλά και για να διαφοροποιηθεί από τις προηγούμενες επιτυχίες της NASA/ΗΠΑ, αποφάσισε την ανάπτυξη ενός επαναχρησιμοποιούμενου Διαστημικού Λεωφορείου (Space Shuttle) με το οποίο θα μπορούσε να υπάρξει τακτική, εβδομαδιαία πρόσβαση στο Διάστημα, η οποία δημιούργησε ένα πλήθος διαστημικών αποστολών τις δεκαετίες του 1980-2010. Συνολικά, κατασκευάστηκαν επτά διαστημικά λεωφορεία, απ'τα οποία τρία αποσύρθηκαν (Ντισκάβερι, Ατλαντίς, Εντέβορ), δυο καταστράφηκαν σε ατυχήματα, το *Challenger* και το *Columbia*, το 1986 και 2003 αντίστοιχα, ενώ ένα χρησιμοποιήθηκε για δοκιμαστικές πτήσεις στη γήινη ατμόσφαιρα κι όχι για διαστημικές αποστολές, το *Space Shuttle Enterprise* (το πρώτο διαστημικό λεωφορείο της NASA), και τέλος το *Space Shuttle Pathfinder*, το οποίο αποτελεί εξομοιωτή διαστημικού λεωφορείου. Το διαστημικό λεωφορείο εκτοξευόταν κάθετα, φέρνοντας συνήθως πέντε έως επτά αστροναύτες (αν και έχουν μεταφερθεί και οκτώ) και μέχρι περίπου 22.700 κιλά (50.000 λίβρες) ωφέλιμου φορτίου σε χαμηλή γήινη τροχιά. Όταν η αποστολή του τελειώνει, επέστρεφε μέσα στην γήινη ατμόσφαιρα, πετούσε σαν ανεμοπλάνο και προσγειωνόταν οριζοντίως σε προκαθορισμένους διαδρόμους προσγείωσης. Το διαστημικό λεωφορείο ήταν το πρώτο τροχιακό διαστημικό σκάφος που σχεδιάστηκε με μερική ικανότητα επαναχρησιμοποίησης. Ήταν επίσης το πρώτο επανδρωμένο διαστημικό σκάφος με φτερά που έχει επιτύχει να εκτοξευθεί σε τροχιά και να προσγειωθεί. Μετέφερε μεγάλα ωφέλιμα φορτία σε διάφορες τροχιές, χρησίμευσε σαν πορθμείο για την μεταφορά πληρωμάτων προς και από το Διεθνές Διαστημικό Σταθμό (ISS), και εκτέλεσε αποστολές συντήρησης και επισκευών.



**Σχήμα 7: (Αριστερά) Εκτόξευση του Διαστημικού Λεωφορείου Discovery (Μέση) Σύγκριση του Αμερικανικού και Σοβιετικού Λεωφορείου (Δεξιά) Πρόσδεση του STS Atlantis με τον Ρωσικό Διαστημικό Σταθμό MIR το 1995**

Το όχημα μπορούσε επίσης να ανακτήσει δορυφόρους και άλλα ωφέλιμα φορτία από την τροχιά τους και να τα επιστρέψει στη γη, αλλά αυτή η ικανότητα δεν χρησιμοποιήθηκε συχνά. Εντούτοις, αυτή η ικανότητα χρησιμοποιήθηκε για να επιστρέψει μεγάλα φορτία στη γη από το διεθνές διαστημικό σταθμό, δεδομένου ότι το ρωσικό σκάφος Σογιούζ έχει περιορισμένη ικανότητα επιστροφής φορτίων. Κάθε διαστημικό λεωφορείο σχεδιάστηκε με προβλεπόμενη διάρκεια ζωής 100 εκτοξεύσεων ή 10 ετών λειτουργικής ζωής. Εν τέλει η μέση διάρκεια ζωής αποδείχτηκε πως ήταν 19 πτήσεις για τα Challenger και Columbia, 32 πτήσεις για τα αποσυρθέντα οχήματα Endeavour, Atlantis, και Discovery, και 5 πτήσεις για το δοκιμαστικό όχημα Enterprise.

Η NASA ανακοίνωσε το 2004 ότι το διαστημικό λεωφορείο θα αποσυρθεί το 2010 και θα αντικατασταθεί από το όχημα Orion και τον πυραυλικό φορέα SLS, αν και μετέπειτα ανακοινώθηκε ένα επιπλέον πρόγραμμα για την κατασκευή και εκτόξευση επανδρωμένων οχημάτων με νικήτριες τις Boeing και SpaceX. Τελικά, η τελευταία αποστολή διαστημικού λεωφορείου πραγματοποιήθηκε τον Ιούλιο του 2011 (STS-135).

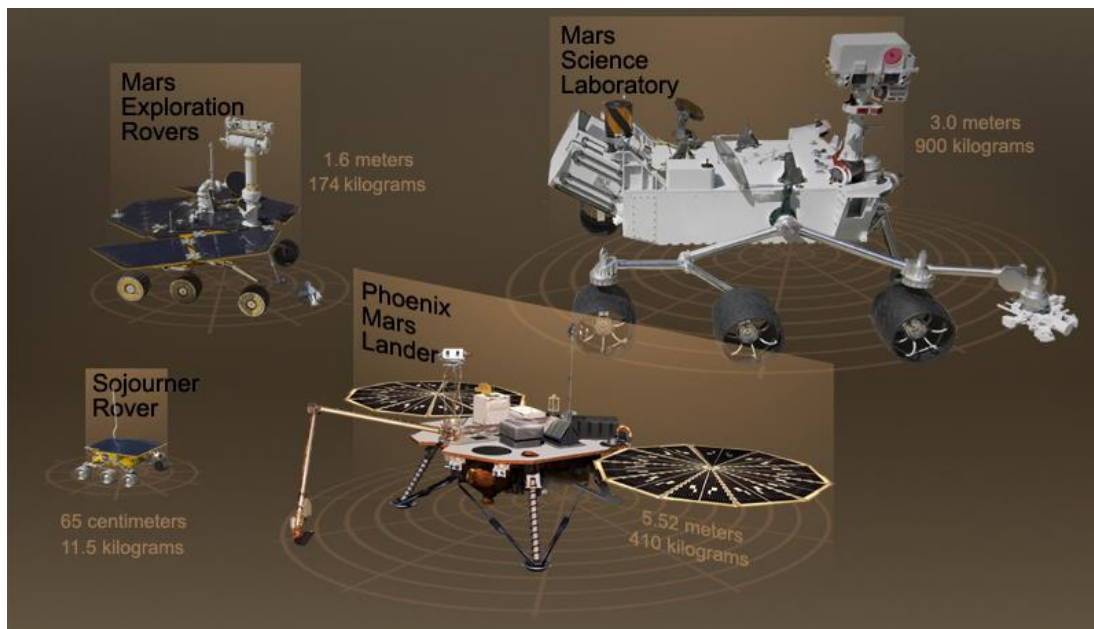
Με τις επανδρωμένες αποστολές του Space Shuttle και μη επανδρωμένες αποστολές μεγάλων, πολύπλοκων αποστολών (όπως η αποστολή Galileo μπήκε σε τροχιά γύρω από τον Δία το 1989 και ξεπέρασε το 1 δις δολάρια σε κόστος) οι οποίες απαιτούσαν τεράστιου προϋπολογισμούς και χρόνο κατασκευής, υπήρξαν σκέψεις και προτάσεις για την σχεδίαση και εκτόξευση μικρότερων αποστολών οι οποίες θα είχαν μικρότερο μέγεθος (μάζα/όγκο), μικρότερο κόστος και θα μπορούσαν να εκτοξεύονται αρκετά συχνότερα από μεγαλύτερες διαστημικές αποστολές που απαιτούσαν δισεκατομμύρια σε προϋπολογισμό και δεκαετίες προετοιμασίας από την στιγμή της ιδέας/σύλληψης μέχρι την εκτόξευση και την παραγωγή αποτελεσμάτων/επιστημονικών δεδομένων. Η δεκαετία του '90 στην Αμερική περιλάμβανε μεγάλες περικοπές στο διαστημικό πρόγραμμα με πολλά παραδείγματα διαστημικών αποστολών να έχουν τεράστιες αποκλίσεις στον προϋπολογισμό τους (παραδείγμα η αποστολή Mars Observer που είχε κόστος 400 εκατομμύρια δολάρια αλλά ξεπέρασε 700 εκατομμύρια χωρίς το κόστος εκτόξευσης). Προς το τέλος το τέλος την δεκαετίας του '80 η NASA αποφάσισε να κάνει μία στρατηγική αναδιάρθρωση δυνάμεων και στόχων (strategic retreat). Το αποτέλεσμα της νέας στρατηγικής ήταν να προταθεί μία νέα μεθοδολογία σχεδίασης και κατασκευής διαστημικών αποστολών βασιζόμενη στο δόγμα 'Faster, Better, Cheaper', πραγματοποιώντας δηλαδή διαστημικές αποστολές, γρηγορότερα, καλύτερα και με χαμηλότερους προϋπολογισμούς με νέες ευέλικτες και απλοποιημένες σχεδιαστικές διαδικασίες. Πρωτοπόρο σε αυτή την νέα στρατηγική ήταν το Applied Physics Laboratory του John Hopkins University με την εξαιρετικά καινοτόμα αποστολή NEAR του προγράμματος Discovery, ενός προγράμματος της NASA για ρομποτικές αποστολές με χαμηλό κόστος - κάτω των 200 εκατομμυρίων. Η αποστολή NEAR αποτέλεσε επανάσταση στον χώρο του διαστήματος, όχι μόνο για τα επιστημονικά και τεχνολογικά της επιτεύγματα (συνάντηση και μελέτη αστεροειδούς (Έρως), προσεδάφιση στον αστεροειδή) αλλά και στην διαχείριση και υλοποίηση πολύπλοκων διαστημικών αποστολών, καθότι ολοκληρώθηκε σε μόλις 27 μήνες, το κόστος κατασκευής του οχήματος ήταν λιγότερο από 150 εκατομμύρια δολάρια. Είναι δε χαρακτηριστικό ότι ο καθ. Σ. Κριμιζής, διευθυντής τότε του Applied Physics Laboratory του John Hopkins University που ήταν ο υπεύθυνος οργανισμός για την αποστολή, σε μία εκδήλωση αποδοχής του διαστημοπλοίου NEAR από την NASA, επέστρεψε 38 εκατομμύρια δολάρια του προϋπολογισμού των 150 εκατομμυρίων πίσω στην NASA, ως αποτέλεσμα της επιτυχούς διαχείρισης της αποστολής, κάτι που δεν είχε γίνει ποτέ στην ιστορία του Διαστήματος και των διαστημικών αποστολών.

Αποστολές στον Άρη: Η εξερεύνηση του Άρη ξεκίνησε με την αποστολή Mariner 4 το 1964, η οποία ως η πρώτη επιτυχημένη αποστολή εξερεύνησης στον Άρη μετέφερε την πρώτη ψηφιακή κάμερα που είχε κατασκευαστεί ποτέ και μετέδωσε τις πρώτες εικόνες από άλλον πλανήτη εκτός της Γης. Η αποστολή είχε μεταξύ των μελών της και τον Έλληνα ακαδημαϊκό καθ. Σ. Κριμιζή ο οποίος ήταν υπεύθυνος για ένα επιστημονικό όργανο το οποίο θα μετρούσε υψηλής ενέργειας σωματίδια. Με το επιστημονικό όργανο του καθ. Κριμιζή μπορεί να μην αναλήφθηκαν ζώνες Van Allen γύρω από τον Άρη εξαιτίας του αδύναμου μαγνητικού πεδίου αλλά ανακαλύφθηκε ότι στις ηλιακές εκρήξεις εκτός από πρωτόνια εκπέμπονται και ηλεκτρόνια. Από τότε όλες οι διαστημικές αποστολές μεταφέρουν όργανα να μετρούν την μέτρηση ηλεκτρονίων από ηλιακές εκρήξεις, με τον καθ Κριμιζή να αποτελεί τον μοναδικό επιστήμονα στον πλανήτη να έχει στείλει επιστημονικά όργανα σε όλους του πλανήτες του ηλιακού συστήματος. Η εξερεύνηση του Άρη πάντα προκαλούσε ξεχωριστό ενδιαφέρον στο κοινό και για τους επιστήμονες αλλά οι δύσκολες καιρικές συνθήκες στον Άρη (ατμόσφαιρα) και η πολυπλοκότητα στην διαδικασία προσγείωσης έχει αποτελέσει αφορμή για την

απώλεια αρκετών διαστημικών οχημάτων στον Άρη. Μετά την αποστολή Mariner-4 το 1965/1965, η αποστολή mariner-9 ήταν η πρώτη που μπήκε σε τροχιά γύρω από τον Άρη το 1971. Οι Σοβιετικές αποστολές Mars 2, 3 απέτυχαν να στείλουν δεδομένα από την επιφάνεια του Άρη αν και το mars 3 προσγειώθηκε επιτυχώς. Το 1975 η NASA έστειλε τα Viking-1, 2 και αποτέλεσαν τις κύριες επιτυχίες και πηγές δεδομένων από τον Άρη για πολλά χρόνια. Οι Σοβιετικές αποστολές Phobos 1/2 που εκτοξεύτηκαν το 1988 απέτυχαν να προσεδαφιστούν στον Άρη.

Συνολικά 25 από τις 55 αποστολές που έχουν σταλεί στον Άρη έχουν επιτύχει την αποστολή τους αν και από τις 16 αποστολές που έχουν εκτοξευθεί από το 2001, 12 έχουν πετύχει τους στόχους τους και οκτώ από αυτούς είναι ακόμα επιχειρησιακοί. Οι αποτυχημένες αποστολές περιλαμβάνουν τα Mars Observer (1992), Mars 96 (1996), Mars Climate Orbiter (1999), Mars Polar Lander/Deep Space 2 (1999), Beagle 2 (2003) και πρόσφατα το Schiaparelli του Ευρωπαϊκού Οργανισμού Διαστήματος (2016). Η πρώτη αποστολή στην οποία προσεδαφίστηκε κινούμενο ρομποτικό όχημα ήταν η αποστολή της NASA Mars Pathfinder το 1997, η οποία μετέφερε το όχημα Sojourner με μάζα 11.5 kg και διένυσε απόσταση 100m με διάρκεια ζωής 85 μέρες ξεπερνώντας την προδιαγραφή των 7 ημερών.

Το 2004 τα δίδυμα rover Spirit και Opportunity της NASA προσεδαφίστηκαν στον Άρη και ξεπέρασαν κάθε προσδοκία με την απόδοσή τους και τον χρόνο λειτουργίας τους, με το Spirit να επιβιώνει μέχρι και το 2010. Το 2012 το rover Curiosity, με μέγεθος όσο ένα συμβατικό αυτοκίνητο προσεδαφίστηκε στον Άρη με μεγαλύτερη εμβέλεια από κάθε άλλο rover. Το 2020 εκτοξεύτηκαν οι αποστολές Mars 2020 της NASA με στόχο ένα rover όπως το Curiosity που περιλαμβάνει και ένα μη επανδρωμένο μικρό ελικόπτερο να εξερευνήσει τον Άρη, το Κινεζικό Tianzen-1 που περιλαμβάνει τροχιακό όχημα και rover για την επιφάνεια του Άρη και το τροχιακό όχημα Hope των ΗΑΕ που θα μελετήσει τον καιρό στον Άρη. Η Ευρωπαϊκή αποστολή ExoMARS έχει μετατεθεί για το 2022 και περιλαμβάνει το rover Rosalind που θα εξερευνήσει την επιφάνεια του Άρη.

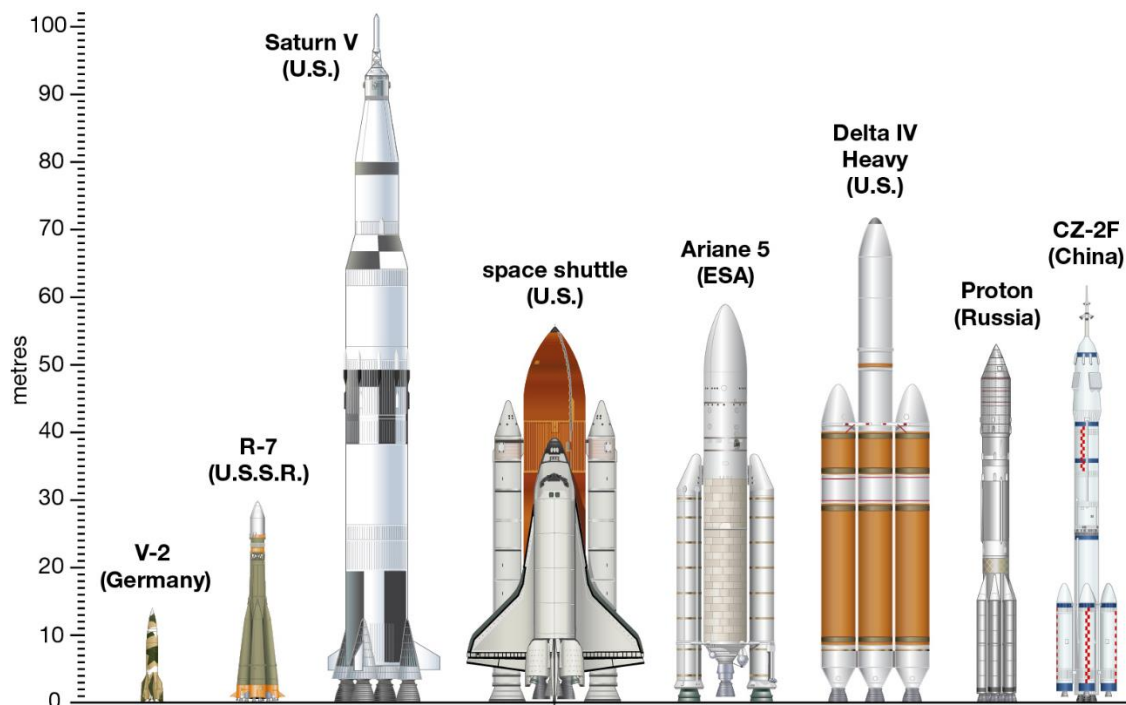


**Σχήμα 8: Σύγκριση του μεγέθους των ρομπότ (rover) που έχουν προσεδαφιστεί στον Άρη: Sojourner rover, Mars Exploration Rovers (Spirit & Opportunity), Phoenix lander και Mars Science Laboratory (Curiosity).**

Στον τομέα της διαστημικής, πάντα αναπτύσσονται ιδιαίτερα καινοτόμες τεχνολογίες και εφαρμογές, πολλές από τις οποίες αναπτύχθηκαν αρχικά για στρατιωτικούς σκοπούς. Μία

τέτοια καινοτομία/εφαρμογή ανέπτυξε πρώτο το Applied Physics Laboratory του John Hopkins University, το 1959, το 'Transit Navigation System' το οποία μπορούσε να δίνει στα πλοία του Αμερικανικού πολεμικού ναυτικού τις συντεταγμένες τους οπουδήποτε στον ωκεανό, ανεξαρτήτως των καιρικών συνθηκών και το οποίο μετέπειτα το 1967 εφαρμόστηκε η χρήση του στον εμπορικό στόλο όλου του κόσμου. Το σύστημα 'Transit' αποτέλεσε τον πρόγονο των συστημάτων πλοήγησης που αναπτύχθηκαν το 1970-1980 (Global Positioning System – GPS, Αμερική), το 2015 και ύστερα με το Ευρωπαϊκό σμήνος Galileo (Ευρώπη) και το Κινεζικό Beidou.

Οι δεκαετίες του 1980-1990 είδαν όμως χώρες όπως η Ινδία, Κίνα και Ιαπωνία να αναπτύσσουν πλειάδα από δορυφόρους πολλαπλών εφαρμογών (επιστημονικούς και εμπορικούς) και πυραυλικούς φορείς. Η Ινδία απέκτησε ένα από τα πιο προηγμένα διαστημικά προγράμματα εκτοξεύοντας τηλεπικοινωνιακούς δορυφόρους αλλά και δορυφόρους τηλεπισκόπησης (παρατήρησης της Γης) με τον δικό της πυραυλικό φορέα Polar Satellite Launch Vehicle (PSLV) ο οποίος θα αποδειχθεί μετέπειτα και εμπορικά δημοφιλής εκτοξεύοντας και δορυφόρους από άλλες χώρες. Η Κίνα, μετά από πολλαπλές αποτυχίες και βασιζόμενη αρχικά στην τεχνολογία βαλλιστικών, διηπειρωτικών πυραύλων ανέπτυξε σταδιακά μία μεγάλη οικογένεια από πυραυλικούς φορείς και τεχνολογία κατασκευής δορυφόρων/διαστημικών συστημάτων που την κατατάσσει πλέον ως μία από τις τρεις σημαντικότερες και μεγαλύτερες διαστημικές δυνάμεις, έχοντας εκτοξεύσει δικούς της αστροναύτες σε τροχιά 2003, έχοντας έναν στόλο σε τροχιά από δορυφόρους πλοήγησης (Beidou), τηλεπικοινωνιακούς, τηλεπαρατήρησης και με επιτυχείς αποστολές με ρομποτικά οχήματα (lander/rover) στην Σελήνη αλλά και πρόσφατα στον Άρη (εκτόξευση Ιούλιος 2020).



**Σχήμα 9: Διαστημικοί Φορείς/Εκτοξευτές**

Στις δεκαετίες του 1980 και 1990, η Ευρώπη μέσω του Ευρωπαϊκού Διαστημικού Οργανισμού (ΕΔΟ-ESA) αλλά τα τελευταία μέσω και της Ευρωπαϊκής Ένωσης, έχει αναπτύξει και αυτή μία σειρά από ιδιαίτερα χρήσιμα διαστημικά συστήματα, τεχνολογίες, διαστημικές αποστολές εξερεύνησης, διαστημικούς φορείς (Ariane 1-6, VEGA), προηγμένους τηλεπικοινωνιακούς δορυφόρους, δορυφόρους πλοήγησης (Galileo), παρατήρησης της Γης (Copernicus)



διατηρώντας την πρωτοπορία σε πολλούς τομείς του Διαστήματος. Ο ηγετικός ρόλος της Ευρώπης στους εμπορικούς διαστημικούς φορείς και τηλεπικοινωνιακούς δορυφόρους ήταν ιδιαίτερα αισθητός την δεκαετία του 1990 πριν την εμφάνιση της Space X (ΗΠΑ) και της ιδιωτικής πρωτοβουλίας, με τους διαστημικούς φορείς Ariane IV και V να αποτελούν τεράστιες εμπορικές επιτυχίες με μεγάλο μερίδιο της αγοράς, κάτι που φιλοδοξεί να πετύχει ο ΕΟΔ με τον νέο διαστημικό φορέα Ariane 6, που αναμένεται να δοκιμαστεί/εκτοξευτεί πρώτη φορά το 2021. Η Ευρωπαϊκή Ένωση έχει επενδύσει σε δύο γιγαντιαία προγράμματα με κρίσιμο εμπορικό, κοινωνικό και οικονομικό αντίκρυσμα, το σύστημα δορυφορικής πλοήγησης Galileo, που επιτρέπει την ανεξάρτητη πλοήγηση οχημάτων με μεγάλη ακρίβεια θέσης και το πρόγραμμα Copernicus, όπου ένας στόλος από δεκάδες δορυφόρους σε τροχιά χαρτογραφεί τον πλανήτη και βοηθά με τα δεδομένα του την πρόληψη περιβαλλοντικών καταστροφών, την παρακολούθηση και μελέτη της κλιματικής αλλαγής αλλά και την δημιουργία νέων καινοτόμων εφαρμογών.

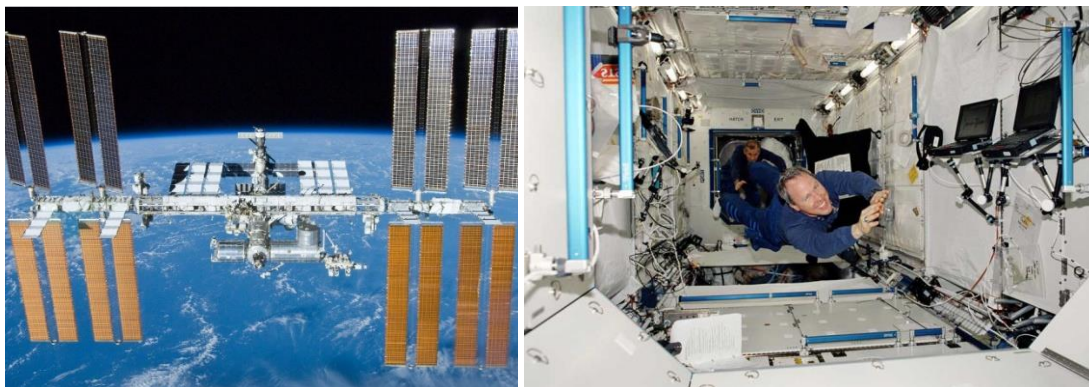


**Σχήμα 10: Εκτόξευση του Φορέα Ariane V με τον Ελληνοκυπριακό Δορυφόρο HELLASAT-4 το 2019**

Ο Διεθνής Διαστημικός Σταθμός (ΔΔΣ) (International Space Station, ISS) είναι ένας ερευνητικός διαστημικός σταθμός σε τροχιά γύρω από τη Γη. Η συναρμολόγηση του ξεκίνησε τον Νοέμβριο του 1998 ενώ το πρώτο του πλήρωμα εγκαταστάθηκε τον Νοέμβριο του 2000. Ο ΔΔΣ εξακολουθεί και σήμερα να βρίσκεται σε φάση ανάπτυξης. Είναι ορατός από τη Γη δια γυμνού οφθαλμού, με την απόστασή του από την επιφάνειά της να κυμαίνεται μεταξύ 400,2 χλμ. και 409,5 χιλιομέτρων. Ο ΔΔΣ αποτελεί κοινό πρόγραμμα μεταξύ των διαστημικών οργανισμών NASA των ΗΠΑ, Roscosmos Ρωσίας, JAXA Ιαπωνίας, CSA (Καναδά), και Ευρωπαϊκού Οργανισμού Διαστήματος (Ευρώπης).

Ο ΔΔΣ είναι η συνέχεια αυτού που ξεκίνησε ως ο αμερικανικός διαστημικός σταθμός *Freedom*, η χρηματοδότηση του οποίου περικόπηκε σημαντικά, και αντιπροσωπεύει τη συγχώνευση του *Freedom* με προγράμματα διαστημικών σταθμών από άλλες χώρες, όπως του ρωσικού *Mir-2*, του ευρωπαϊκού «Κολόμβος» και του ιαπωνικού *Κίμπο*. Ο ΔΔΣ κατοικείται συνεχώς από τότε που το πρώτο πλήρωμα μπήκε στον σταθμό στις 2 Νοεμβρίου 2000, παρέχοντας έτσι συνεχή ανθρώπινη παρουσία στο διάστημα. Ο ΔΔΣ εξυπηρετείται κυρίως από τα ρωσικά διαστημόπλοια *Σογιούζ* και *Progress*, μέχρι το 2013 από τα αμερικανικά, και πρόσφατα και από το Ευρωπαϊκό μεταφορικό

σκάφος ATV με κωδική ονομασία για την πρώτη αποστολή *Jules Verne*, η οποία πήρε το όνομά της από τον συγγραφέα Ιούλιο Βερν. Ο σταθμός πάντως έχει δεχτεί συνολικά 200 αστροναύτες από 15 χώρες. Ήταν επίσης ο προορισμός των επτά πρώτων τουριστών του διαστήματος, ενώ το 2012 το διαστημικό όχημα τύπου Dragon της SpaceX έγινε το πρώτο όχημα ιδιωτικής εταιρείας που προσέδωσε στον σταθμό μεταφέροντας προμήθειες και εξοπλισμό. Τον Ιούλιο του 2020, προσδέθηκε με την επανδρωμένη κάψουλα Dragon (SpaceX) το πρώτο πλήρωμα Αμερικανών αστροναυτών σε ιδιωτική κάψουλα, στην πρώτη πτήση που μετέφερε Αμερικανούς αστροναύτες από το 2011 που αποσύρθηκαν τα διαστημικά λεωφορεία της NASA. Ενδιάμεσα, όλοι οι αστροναύτες που μεταφέρονταν στον ΔΔΣ (Αμερικανοί, Ευρωπαίοι κλπ) χρησιμοποιούσαν το Ρωσικό διαστημικό όχημα Soyuz.



**Σχήμα 11: Διεθνής Διαστημικός Σταθμός – International Space Station**

Ο συμβατικός και τις περισσότερες φορές πολύπλοκος και ακριβός σχεδιασμός διαστημικών αποστολών/συστημάτων σε συνδυασμό με την ανάπτυξη νέων τεχνολογιών στους τομείς της μικρο-ηλεκτρονικής, υλικών, αυτόνομων συστημάτων, οδήγησε στο τέλος της δεκαετίας του 2010 στην ιδιωτική πρωτοβουλία, όπου νεοφυής, νέοι επιχειρηματίες όπως ο Elon Musk, αλλά και επιχειρηματίες κύρους από τομείς εκτός της αεροδιαστημικής, ξεκίνησαν να επενδύουν σημαντικά κεφάλαια δημιουργώντας νέους αεροδιαστημικούς κολοσσούς εκ του μηδενός, όπως η SpaceX, Blue Origin, Planet που σε πολλούς τομείς έχουν ξεπεράσει σε ανταγωνιστικότητα εταιρίες όπως η Boeing, Lockheed Martin, ArianeGroup, Airbus στην κατασκευή και εμπορική χρήση (με κερδοφορία) διαστημικών εκτοξευτών, επανδρωμένων διαστημικών οχημάτων (π.χ. κάψουλα Dragon - Falcon 9) και πολλές φορές αποδεικνύοντας ότι η ιδιωτική πρωτοβουλία και διαχείριση πολύπλοκων και κοστοβόρων προγραμμάτων όπως οι επανδρωμένες πτήσεις μπορούν να γίνουν αρκετά φθηνότερα και με εμπορικό χαρακτήρα/κερδοφορία σε σύγκριση με τους συμβατικούς τρόπους ανάπτυξης και διαχείρισης τέτοιων προγραμμάτων από δημόσιους οργανισμούς ή από 'κλασικές εταιρίες' του αεροδιαστημικού/αμυντικού τομέα που έχουν μάθει να αναπτύσσουν διαστημικά οχήματα/συστήματα με πιο συμβατικό και πολλές φορές αναχρονιστικό τρόπο.

## 1.2 Περιγραφή διαστημικών οργανισμών

Η NASA (National Aeronautics and Space Administration, δηλαδή η Αμερικανική Εθνική Υπηρεσία Αεροναυπηγικής και Διαστήματος, συχνά γράφεται στα ελληνικά και ως ΝΑΣΑ) είναι κρατικός Αμερικάνικος οργανισμός που ασχολείται με την εξερεύνηση του διαστήματος, την αεροναυτική και τη μελέτη του περιβάλλοντος της Γης. Ιδρύθηκε στις 29 Ιουλίου του 1958 με την Πράξη Εθνικής Αεροναυτικής και Διαστήματος. Η έδρα της NASA βρίσκεται στην Ουάσινγκτον, ενώ όλες οι εκτοξεύσεις των επανδρωμένων και μη επανδρωμένων διαστημοπλοίων της πραγματοποιούνται στο διαστημικό κέντρο Κένεντι. Στις 29 Ιουλίου 1958, ο πρόεδρος Αϊζενχάουερ υπέγραψε την Πράξη Εθνικής Αεροναυτικής και Διαστήματος, ιδρύοντας τη NASA. Όταν ξεκίνησε τη λειτουργία της στις 1

Οκτωβρίου 1958, η NASA αποτελούνταν κυρίως από τα τέσσερα εργαστήρια και τους 80 υπαλλήλους της 46-ετούς ερευνητικής υπηρεσίας που ονομαζόταν «Εθνική Συμβουλευτική Επιτροπή Αεροναυτικής», αγγλ. National Advisory Committee for Aeronautics (NACA). Σημαντικός παράγοντας στην είσοδο της NASA στην κούρσα του διαστήματος, ήταν η τεχνολογία από το γερμανικό πυραυλικό πρόγραμμα, καθοδηγούμενο από τον Βέρνερ φον Μπράουν, ο οποίος έγινε Αμερικανός πολίτης μετά τον Β΄ Παγκόσμιο Πόλεμο. Σήμερα θεωρείται ως ο πατέρας του διαστημικού προγράμματος των ΗΠΑ. Στοιχεία της Υπηρεσίας Στρατιωτικών Βαλλιστικών Πυραύλων (αγγλ. Army Ballistic Missile Agency) (στην οποία ανήκε η ομάδα του φον Μπράουν) και του Εργαστηρίου Ερευνών του Ναυτικού (αγγλ. Naval Research Laboratory) ενσωματώθηκαν στη NASA.

Τα πρώτα προγράμματα της NASA περιελάμβαναν έρευνα πάνω στις επανδρωμένες διαστημικές πτήσεις και έλαβαν χώρα κάτω από την πίεση του ανταγωνισμού που υπήρχε μεταξύ ΗΠΑ και ΕΣΣΔ κατά την περίοδο του Ψυχρού Πολέμου. Το πρόγραμμα *Απόλλων* σχεδιάστηκε για την προσελήνωση ανθρώπων και την ασφαλή επιστροφή τους στη Γη. Τα *Απόλλων 8* και *Απόλλων 10* δοκίμασαν διάφορα εξαρτήματα κατά την περιστροφή τους γύρω από τη Σελήνη και επέστρεψαν με φωτογραφίες από τη σεληνιακή επιφάνεια. Στις 20 Ιουλίου 1969 το *Απόλλων 11* προσελήνωσε τους πρώτους ανθρώπους, τον Νηλ Άρμστρονγκ και τον Μπαζ Όλντριν. Το *Απόλλων 13* δεν προσεληνώθηκε λόγω μηχανικής βλάβης, αλλά εκ θαύματος επέστρεψε ασφαλώς και με εκατοντάδες φωτογραφίες. Οι έξι αποστολές που προσεληνώθηκαν επέστρεψαν με πλήθος επιστημονικών δεδομένων και περίπου 400 κιλά σεληνιακών δειγμάτων. Εκτελέστηκαν πειράματα μηχανικής εδάφους, μετεωριτικά, σεισμικά, θερμικά, σεληνιακής τοπογραφίας, μαγνητικών πεδίων και ηλιακού ανέμου. Στο πρόγραμμα *Απόλλων* είχαν λάβει μέρος άτομα και από άλλες χώρες του πλανήτη όπως οι Δημήτρης Κρεμασιώτης, Α. Κονταράτος (Ελλάδα). Το Διαστημικό Λεωφορείο έγινε ο βασικός στόχος της NASA στα τέλη της δεκαετίας του 1970 και στη δεκαετία του 1980, όντας σχεδιασμένο ως ένα συχνά εκτοξεύσιμο και, ως επί το πλείστον, επαναχρησιμοποιούμενο όχημα. το 1985 κατασκευάστηκαν τέσσερα διαστημικά λεωφορεία. Το πρώτο, το «Κολούμπια», εκτοξεύθηκε στις 12 Απριλίου 1981.

Το λεωφορείο δεν έφερε μόνο καλά νέα στη NASA. Οι πτήσεις αποδείχθηκαν πολύ ακριβότερες από τις προβλέψεις και παρότι η καταστροφή του «Τσάλλεντζερ» επισήμανε τους κινδύνους των διαστημικών πτήσεων, το κοινό έχασε και πάλι το ενδιαφέρον του καθώς οι πτήσεις φάνηκε να γίνονται κοινότυπες. Ξεκίνησε δουλειά πάνω στον Διαστημικό Σταθμό «Φρίντομ» (Space Station Freedom), ως τον βασικό στόχο για το επανδρωμένο διαστημικό πρόγραμμα, όμως μέσα στη NASA υπήρχε διαφωνία ότι αυτά τα προγράμματα ήταν σε βάρος πιο εμπνευσμένων, μη επανδρωμένων αποστολών, όπως αυτές των Βόγιατζερ. Στο μεγαλύτερο μέρος της δεκαετίας του 1990 η NASA αντιμετώπισε συρρικνωμένους ετήσιους προϋπολογισμούς λόγω περικοπών από το Κογκρέσο. Σε απάντηση, ο ένατος διευθυντής της NASA, ο Ντάνιελ Γκόλντιν, προώθησε την προσέγγιση «γρηγορότερα, καλύτερα, φτηνότερα», η οποία επέτρεψε στη NASA να μειώσει το κόστος των αποστολών της, συνεχίζοντας την εισαγωγή μιας ποικιλίας αεροδιαστημικών προγραμμάτων (Πρόγραμμα «Ντισκάβερι»). Αυτή η μέθοδος δέχτηκε κριτική και επανεξετάστηκε μετά τη διπλή απώλεια του Mars Climate Orbiter και του Mars Polar Lander το 1999. Από την άλλη, το πρόγραμμα διαστημικού λεωφορείου της NASA είχε ολοκληρώσει 116 επιτυχημένες εκτοξεύσεις μέχρι τον Δεκέμβριο του 2006.

Η τραγωδία του «Κολούμπια» το 2003, η οποία είχε ως αποτέλεσμα τον θάνατο του πληρώματος, προκάλεσε μια αναστολή 29 μηνών στις πτήσεις του διαστημικού λεωφορείου και ήταν το έναυσμα για σοβαρή επανεξέταση των προτεραιοτήτων της NASA. Οι συνεχιζόμενες έρευνες της NASA περιλαμβάνουν αναλυτικές μελέτες του Άρη και του Κρόνου, και αναλύσεις της Γης και του Ήλιου. Άλλες διαστημοσυσσκευές της NASA βρίσκονται καθ' οδόν προς τον Ερμή και τον Πλούτωνα. Με αποστολές στο Δία να βρίσκονται

στο στάδιο του σχεδιασμού, τα δρομολόγια της NASA καλύπτουν πάνω από το μισό Ηλιακό Σύστημα.

Διαχειριζόμενη από το Εργαστήριο Προώθησης Τζετ (αγγλ. Jet Propulsion Laboratory, JPL) της NASA, στην Πασαντίνα της Καλιφόρνια, η αποστολή «Φοίνιξ» (αγγλ. Phoenix) εκτοξεύθηκε στις 4 Αυγούστου 2007. Θα ψάξει για πιθανά υπόγεια αποθέματα νερού στο βόρειο πόλο του Άρη. Αυτή η βολίδα προσεδάφισε αναβιώνει πολλά από τα πειράματα και τα όργανα μέτρησης της αποτυχημένης αποστολής Mars Polar Lander του 1999. Ένα βελτιωμένο και μεγαλύτερο όχημα, το Εργαστήριο Φυσικής του Άρη (αγγλ. Mars Science Laboratory) ή αλλιώς Curiosity) προσεδάφιστηκε με επιτυχία στον Άρη στις 5 Αυγούστου 2012. Η αποστολή «Νέοι Ορίζοντες» (New Horizons) στον Πλούτωνα ξεκίνησε το 2006 και πέρασε από τον νάνο πλανήτη το 2015. Η διαστημοσυσκευή δέχθηκε βαρυτική ώθηση από το Δία τον Φεβρουάριο του 2007, εξετάζοντας μερικούς από τους εσωτερικούς δορυφόρους του και ελέγχοντας τα όργανα μέτρησης κατά τη διάρκεια της διέλευσης. Επίσης, τελείωσε η σχεδίαση των οχημάτων Orion, που θα αντικαταστήσουν τα διαστημικά λεωφορεία. Αυτά αναμένονται να είναι έτοιμα για την πρώτη επανδρωμένη διαστημική αποστολή το νωρίτερο το 2021, ενώ μέχρι το 2024 θα έχουν πραγματοποιήσει επαναπροσέγγιση της Σελήνης μέσω του προγράμματος "Αρτεμις". Σκοπός του προγράμματος είναι να προσεδάφισει τον επόμενο άνδρα αλλά και την πρώτη γυναίκα στην Σελήνη.

Η Roscosmos State Corporation για διαστημικές δραστηριότητες, κοινώς γνωστή ως Roscosmos, είναι μια κρατική εταιρεία της Ρωσικής Ομοσπονδίας που είναι υπεύθυνη για διαστημικές πτήσεις, προγράμματα κοσμοναυτικής και έρευνα αεροδιαστημικής. Προερχόμενη από το σοβιετικό διαστημικό πρόγραμμα που ιδρύθηκε τη δεκαετία του 1930, η Roscosmos εμφανίστηκε μετά τη διάλυση της Σοβιετικής Ένωσης το 1991. Αρχικά ξεκίνησε ως η Ρωσική Υπηρεσία Διαστήματος, η οποία ιδρύθηκε στις 25 Φεβρουαρίου 1992 και αναδιαρθρώθηκε το 1999 και 2004, ως Ρωσική Υπηρεσία Αεροπορίας και Διαστήματος και η Ομοσπονδιακή Υπηρεσία Διαστήματος (Roscosmos), αντίστοιχα. Το 2015, η Ομοσπονδιακή Υπηρεσία Διαστήματος (Roscosmos) συγχωνεύτηκε με την United Rocket και Η Space Corporation, μια κυβερνητική εταιρεία, για την επανεθνικοποίηση της ρωσικής διαστημικής βιομηχανίας, οδηγώντας στη Roscosmos στην τρέχουσα μορφή της. Η Roscosmos εδρεύει στη Μόσχα, με το κύριο Κέντρο Ελέγχου Αποστολών στην κοντινή πόλη Κορολγιον και το Εκπαιδευτικό Κέντρο Κοσμοναυτών Γιούρι Γκαγκάριν που βρίσκεται στο Star City στην Περιφέρεια της Μόσχας. Οι εγκαταστάσεις εκτόξευσής του περιλαμβάνουν το Baikonur Cosmodrome στο Καζακστάν, το πρώτο, μεγαλύτερο και πιο πολυσύχναστο διαστημικό αεροδρόμιο στον κόσμο, και το Vostochny Cosmodrome, το οποίο χτίζεται στη Ρωσική Άπω Ανατολή στην Περιφέρεια Amur. Ως ο κύριος διάδοχος του σοβιετικού διαστημικού προγράμματος, η κληρονομιά της Roscosmos περιλαμβάνει τον πρώτο δορυφόρο στον κόσμο, την πρώτη επανδρωμένη διαστημική πτήση και τον πρώτο διαστημικό σταθμό. Οι τρέχουσες δραστηριότητές της περιλαμβάνουν τον Διεθνή Διαστημικό Σταθμό, όπου είναι σημαντικός συνεργάτης. Το σοβιετικό διαστημικό πρόγραμμα δεν είχε κεντρικούς εκτελεστικούς οργανισμούς. Αντ' αυτού, η οργανωτική του αρχιτεκτονική ήταν πολυκεντρική. Ήταν τα γραφεία σχεδιάσεων (Korolev, Lavochkin, Energia, Khrunichev) και το συμβούλιο σχεδιαστών που είχαν το μεγαλύτερο λόγο, όχι η πολιτική ηγεσία. Η δημιουργία μιας κεντρικής υπηρεσίας μετά τον διαχωρισμό της Ρωσίας από τη Σοβιετική Ένωση ήταν επομένως μια νέα εξέλιξη την δεκαετία του 1990. Η Ρωσική Υπηρεσία Διαστήματος ιδρύθηκε στις 25 Φεβρουαρίου 1992, με διάταγμα του Προέδρου Yeltsin. Τα πρώτα χρόνια, η Υπηρεσία υπέφερε από έλλειψη εξουσίας καθώς τα ισχυρά γραφεία σχεδιασμού αγωνίστηκαν για να προστατεύσουν τις δικές τους σφαίρες λειτουργίας και να επιβιώσουν. Για παράδειγμα, η απόφαση να διατηρήσει τη λειτουργία του Mir μετά το 1999 δεν ελήφθη από τον οργανισμό. Αντ' αυτού, έγινε από το ιδιωτικό συμβούλιο μετόχων του γραφείου σχεδιασμού Energia. Ένα άλλο παράδειγμα είναι ότι η απόφαση για την ανάπτυξη του νέου πυραύλου Angara ήταν

μάλλον συνάρτηση της ικανότητας του σχεδιαστικού γραφείου/εταιρίας Khrgunichev να προσελκύσει πόρους από μια συνειδητή μακροπρόθεσμη απόφαση του οργανισμού.

Ως αποτέλεσμα μιας σειράς προβλημάτων αξιοπιστίας και πλησίον της αποτυχίας της εκτόξευσης Proton M τον Ιούλιο του 2013, πραγματοποιήθηκε μια σημαντική αναδιοργάνωση της ρωσικής διαστημικής βιομηχανίας. Η United Rocket and Space Corporation ιδρύθηκε ως κοινή εταιρεία από την Ρωσική κυβέρνηση τον Αύγουστο του 2013 για την ενοποίηση του ρωσικού διαστημικού τομέα. Ο αντιπρόεδρος της κυβέρνησης Ντμίτρι Ρογκοζίν δήλωσε ότι «ο διαστημικός τομέας που είναι επιρρεπής σε αποτυχία είναι τόσο παραγμένος που χρειάζεται κρατική επίβλεψη για να ξεπεράσει τα προβλήματά του.» Τρεις ημέρες μετά την αποτυχία του Proton M από λάθη στην συναρμολόγηση του πυραύλου και την λανθασμένη τοποθέτηση γυροσκοπίων, η ρωσική κυβέρνηση ανακοίνωσε ότι «εξαιρετικά σκληρά μέτρα» θα λαμβανόταν και ότι η κυβέρνηση σκόπευε να αναδιοργανώσει κατά τέτοιο τρόπο ώστε να «διατηρήσει και να ενισχύσει τον διαστημικό οργανισμό της Roscosmos». Πιο αναλυτικά σχέδια που κυκλοφόρησαν τον Οκτώβριο του 2013 πρότειναν την επανεθνικοποίηση της «προβληματικής διαστημικής βιομηχανίας», με εκτεταμένες μεταρρυθμίσεις που περιλαμβάνουν μια νέα «ενοποιημένη δομή διοίκησης και μείωση των περιττών δυνατοτήτων, πράξεις που θα μπορούσαν να οδηγήσουν σε δεκάδες χιλιάδες απολύσεις». Σύμφωνα με τον Rogozin, ο ρωσικός διαστημικός τομέας απασχολεί περίπου 250.000 άτομα, ενώ οι Ηνωμένες Πολιτείες χρειάζονται μόνο 70.000 για να επιτύχουν παρόμοια αποτελέσματα. Είπε: "Η ρωσική παραγωγικότητα του διαστήματος είναι οκτώ φορές χαμηλότερη από την Αμερική, με εταιρείες να αλληλεπιδρούν μεταξύ τους και να λειτουργούν με απόδοση 40% περίπου." Σύμφωνα με το σχέδιο του 2013, η Roscosmos επρόκειτο να «ενεργήσει ως ομοσπονδιακό εκτελεστικό όργανο και αναθέτουσα αρχή για προγράμματα που θα εφαρμοστούν από τη βιομηχανία». Το 2016, η κρατική υπηρεσία διαλύθηκε και η Roscosmos μεταφέρθηκε στην κρατική εταιρεία, η οποία είχε δημιουργηθεί το 2013 ως United Rocket and Space Corporation, με τη συγκεκριμένη αποστολή να επανεθνικοποιήσει τον ρωσικό διαστημικό τομέα. Το 2018, ο Ρώσος πρόεδρος Βλαντιμίρ Πούτιν είπε "είναι απαραίτητο να βελτιωθεί δραστικά η ποιότητα και η αξιοπιστία του διαστήματος και να εκτοξευθούν οχήματα" ... για να διατηρηθεί η αυξανόμενη απειλούμενη ηγεσία της Ρωσίας στο διάστημα. Η Ρωσία διατηρεί πολλές διαστημικές δραστηριότητες βασιζόμενη στην τεχνολογία και διαστημικά οχήματα/πυραύλους που αναπτύχθηκαν κατά την Σοβιετική περίοδο (1960-1990) με τους διαστημικούς φορείς Soyuz να είναι από τους πιο εμπορικούς δημοφιλείς φορείς εκτόξευσης (εκτοξευόμενοι και από την βάση εκτόξευσης του ΕΟΔ/ESA στην Γαλλική Γουιάνα), την επανδρωμένη έκδοση του φορέα Soyuz που μεταφέρει αστροναύτες/κοσμοναύτες σε τροχιά (και μόνο φορέα που το έκανε αυτό μετά την απόσυρση των διαστημικών λεωφορείων της NASA και την πτήση Κινεζικών φορέων με αστροναύτες από το 2003 και της Αμερικανικής SpaceX με την κάψουλα Dragon το 2020) τον φορέα Proton, την συμμετοχή στον ΔΔΣ με πολλαπλά διαμερίσματα και τις αποστολές ανεφοδιασμού με το διαστημικό οχήματα Progress και την κατασκευή πλειάδας διαστημικών οχημάτων/δορυφόρων τηλεπαρατήρησης, μετεωρολογίας, άμυνας, πλοήγησης και εξερεύνησης του διαστήματος. Πρέπει να προστεθεί ότι η Ρωσία ως αποτέλεσμα της κατάρρευσης της Σοβιετικής Ένωσης την δεκαετία του 1990 αξιοποίησε την πρωτοπορία της στις διαστημικές τεχνολογίες και έχει εξάγει τεχνολογίες στην κατασκευή επανδρωμένων οχημάτων στην Κίνα, Ινδία, πυραυλοκινητήρες (ως προϊόντα αλλά και με μεταφορά τεχνολογίας) στην Κίνα, Ινδία, Ν. Κορέα αλλά και στις ΗΠΑ (ATLAS V, Antares).

Ο Ευρωπαϊκός Οργανισμός Διαστήματος (ΕΟΔ) (*European Space Agency, ESA*) είναι ευρωπαϊκός οργανισμός με έδρα το Παρίσι. Δημιουργήθηκε στις 30 Μαΐου 1975 με σκοπό τον καλύτερο συντονισμό των ευρωπαϊκών διαστημικών δραστηριοτήτων, ως αποτέλεσμα της κατανόησης ότι ήταν ασύμφορο να έχει η κάθε χώρα μέλος ένα ξεχωριστό διαστημικό πρόγραμμα και με απώτερο σκοπό να ανταγωνιστεί την τεχνολογική υπεροχή

της ΕΣΣΔ και των ΗΠΑ στον συγκεκριμένο τομέα. Έχει 22 κράτη μέλη και 2.000 εργαζόμενους. Αυτά τα ιδιαίτερα εξειδικευμένα άτομα προέρχονται από όλα τα κράτη μέλη και περιλαμβάνουν επιστήμονες, μηχανικούς, ειδικούς πληροφορικής και διοικητικό προσωπικό. Τα κράτη μέλη δεν είναι αναγκαστικά μέλη της ΕΕ και αντίστροφα. Ωστόσο υπάρχει συνεργασία μεταξύ των δύο οργανισμών. Μέχρι το 2020, ο ΕΟΔ ήταν ένας διακυβερνητικός οργανισμός 22 κρατών μελών. Τα κράτη μέλη συμμετέχουν σε διαφορετικό βαθμό στα υποχρεωτικά και τα προαιρετικά διαστημικά προγράμματα. Τα 22 Κράτη Μέλη της ESA είναι η Αυστρία, το Βέλγιο, η Γαλλία, η Γερμανία, η Δανία, η Ελβετία, η Ελλάδα, η Εσθονία, το Ηνωμένο Βασίλειο, η Ιρλανδία, η Ισπανία, η Ιταλία, το Λουξεμβούργο, η Νορβηγία, η Ολλανδία, η Ουγγαρία, η Πολωνία, η Πορτογαλία, η Ρουμανία, η Σουηδία, η Τσεχία και η Φιλανδία. Ο Καναδάς συμμετέχει επίσης σε ορισμένα προγράμματα κατόπιν συμφωνιών συνεργασίας. Ο συνολικός προϋπολογισμός ανήλθε σε περίπου 4,02 δισ. Ευρώ το 2012, 4,28 δισ. Ευρώ το 2013, 4,10 δισ. Ευρώ το 2014, 4,43 δισ. Ευρώ το 2015, 5,25 δισ. Ευρώ το 2016 και 5,75 δισ. Ευρώ το 2017. Ο ΕΟΔ έχει έξι διαφορετικά κέντρα ώστε το καθένα ξεχωριστά να χειρίζεται διαφορετικά καθήκοντα. Αυτά είναι το Ευρωπαϊκό Κέντρο Διαστημικής Έρευνας και Τεχνολογίας (ESTEC) στο Νόρνττβαϊκ της Ολλανδίας που έχει ως σκοπό τον σχεδιασμό και ανάπτυξη διαστημικής τεχνολογίας, το Ευρωπαϊκό Ινστιτούτο Διαστημικών Ερευνών (ESRIN), στο Φρασκάτι της Ιταλίας, όπου εκεί συλλέγονται και αποθηκεύονται τα δεδομένα του οργανισμού, το Ευρωπαϊκό Κέντρο Διαστημικών Επιχειρήσεων (ESOC) στο Ντάρμστατ της Γερμανίας που έχει ως σκοπό τον έλεγχο και την παρακολούθηση των δορυφόρων που βρίσκονται σε τροχιά και τέλος το Ευρωπαϊκό Κέντρο Αστροναυτικής Αστροναυτών (EAC) στην Κολωνία της Γερμανίας με αντικείμενο την εκπαίδευση αστροναυτών, το Ευρωπαϊκό Κέντρο Διαστημικών Εφαρμογών και Τηλεπικοινωνιών (ECSAT) στο Χάργουελ της Μεγάλης Βρετανίας, το Ευρωπαϊκό Κέντρο Διαστημικής Αστρονομίας στο Villanueva de la Cañada της Ισπανίας.

Κάποια από τα προγράμματα που χειρίζεται ο ΕΟΔ είναι:

- το Διαστημικό τηλεσκόπιο Χαμπλ, σε συνεργασία με τη NASA.
- το πρόγραμμα GALILEO (Η ευρωπαϊκή απάντηση για το GPS) που εκτελείται σε συμφωνία με την ΕΕ
- η μη επανδρωμένη αποστολή Mars Express για την παρατήρηση του Άρη.
- η μη επανδρωμένη αποστολή Venus Express για την παρατήρηση της Αφροδίτης.
- η αποστολή Ροζέττα, που πέτυχε την πρώτη είσοδο σε τροχιά γύρω από κομήτη και την πρώτη προσεδάφιση σε κομήτη
- το ΒερίColombo για την παρατήρηση του Ερμή (2018).
- το ExoMars που θα εκτοξευθεί στον Άρη και θα τον ερευνήσει το 2022
- Το πρόγραμμα Copernicus (επτά δορυφόροι) σε συνεργασία με την ΕΕ (Το Copernicus είναι ένα πρόγραμμα της Ευρωπαϊκής Ένωσης που αποσκοπεί στην ανάπτυξη ευρωπαϊκών υπηρεσιών πληροφόρησης που βασίζονται σε γεωσκόπηση με δορυφόρους και σε επιτόπιες αναλύσεις (μη διαστημικών) δεδομένων. Επικεφαλής στην εν λόγω πρωτοβουλία είναι η Ευρωπαϊκή Επιτροπή σε συνεργασία με τον Ευρωπαϊκό Οργανισμό Διαστήματος (ΕΟΔ) και τον Ευρωπαϊκό Οργανισμό Περιβάλλοντος (ΕΟΠ). Το Copernicus καλύπτει έξι θεματικούς τομείς: παρακολούθηση της ατμόσφαιρας, παρακολούθηση της θάλασσας, κλιματική αλλαγή, ασφάλεια, διαχείριση καταστάσεων έκτακτης ανάγκης και παρακολούθηση της ξηράς.

Ευρωπαϊκή Ένωση: Η Ευρώπη — τα κράτη μέλη, ο Ευρωπαϊκός Οργανισμός Διαστήματος (ΕΟΔ), η Ευρωπαϊκή Οργάνωση για την Εκμετάλλευση Μετεωρολογικών Δορυφόρων (EUMETSAT) και η ΕΕ — έχει στο ενεργητικό της πολλές επιτυχίες στο διάστημα, με

τεχνολογίες αιχμής και αποστολές εξερεύνησης, όπως η αποστολή Rosetta του ΕΟΔ, μοναδικές ικανότητες γεωσκόπησης και μετεωρολογίας, όπως οι δορυφόροι Meteosat και κορυφαία σε παγκόσμιο επίπεδο εμπορικά συστήματα τηλεπικοινωνιών και εκτόξευσης, με την οικογένεια εκτοξευτών Ariane και τον εκτοξευτή Vega. Η Ευρώπη διαθέτει επί του παρόντος τον δεύτερο υψηλότερο δημόσιο προϋπολογισμό για το διάστημα στον κόσμο, με προγράμματα και εγκαταστάσεις σε διάφορες ευρωπαϊκές χώρες. Μεταξύ 2014 και 2020 η ΕΕ θα επενδύσει 12 δισ. EUR σε διαστημικές δραστηριότητες. Διαθέτει διαστημικά συστήματα παγκόσμιου κύρους, το Copernicus για υπηρεσίες γεωσκόπησης, τα προγράμματα EGNOS και Galileo για υπηρεσίες δορυφορικής πλοήγησης και γεωεντοπισμού. Με 18 δορυφόρους που βρίσκονται επί του παρόντος σε τροχιά και πάνω από 30 προγραμματισμένους δορυφόρους μέσα στα επόμενα 10-15 χρόνια, η ΕΕ είναι ο μεγαλύτερος θεσμικός πελάτης υπηρεσιών εκτόξευσης στην Ευρώπη.

Η διαστημική πολιτική της ΕΕ υλοποιείται με τρία εμβληματικά διαστημικά προγράμματα:

- Copernicus: το πιο προηγμένο σύστημα γεωσκόπησης στον κόσμο
- Galileo: το παγκόσμιο δορυφορικό σύστημα πλοήγησης της Ευρώπης, το οποίο παρέχει εξαιρετικά ακριβή δεδομένα παγκόσμιου εντοπισμού θέσης
- EGNOS: σύστημα που παρέχει κρίσιμες για την ασφάλεια υπηρεσίες πλοήγησης σε χρήστες αεροπορικών, θαλάσσιων και χερσαίων μέσων σε ολόκληρη την Ευρώπη

Έχοντας δημιουργήσει διαστημικά συστήματα παγκόσμιας κλάσης τα οποία παράγουν ήδη αποτελέσματα, η ΕΕ επικεντρώνεται τώρα στην καλύτερη δυνατή χρήση των διαστημικών δεδομένων που συλλέγονται. Τα δεδομένα αυτά μπορούν να φανούν χρήσιμα τόσο στον δημόσιο όσο και στον ιδιωτικό τομέα.

Μεταξύ των πολλών οφελών που προσφέρουν, τα διαστημικά δεδομένα:

- καθοδηγούν ομάδες διάσωσης σε τοποθεσίες που πλήττονται από φυσικές καταστροφές
- βελτιώνουν τη χρήση της γης στη γεωργία
- κάνουν ασφαλέστερες τις μεταφορικές και ενεργειακές υποδομές

Η ΕΕ επενδύει περισσότερα από 12 δισ. € σε διαστημικές δραστηριότητες για την περίοδο 2014-2020. Η απόδοση της επένδυσης κρίνεται υψηλή: άμεση απόδοση 3-4 € για κάθε διατιθέμενο ευρώ.

ΕΠΙΤΡΟΠΗ ΓΙΑ ΤΙΣ ΕΙΡΗΝΙΚΕΣ ΧΡΗΣΕΙΣ ΤΟΥ ΔΙΑΣΤΗΜΑΤΟΣ, **COPUOS**, COMMITTEE ON THE PEACEFUL USES OF OUTER SPACE: Η Επιτροπή για τις Ειρηνικές Χρήσεις του Διαστήματος (COPUOS) ιδρύθηκε από τη Γενική Συνέλευση του ΟΗΕ για να εξετάζει τη συνεργασία των κρατών για την ειρηνική χρήση του διαστήματος, να οργανώσει προγράμματα στον τομέα αυτό που πραγματοποιούνται υπό την αιγίδα των Ηνωμένων Εθνών, να ενθαρρύνει τη συνεχιζόμενη έρευνα και τη διάδοση πληροφοριών για θέματα διαστήματος, και να μελετάει νομικά προβλήματα που προκύπτουν από την εξερεύνηση του διαστήματος.

Η EUMETSAT είναι ένας διακυβερνητικός οργανισμός και ιδρύθηκε το 1986. Σκοπός της είναι να παρέχει δορυφορικά δεδομένα, εικόνες και προϊόντα που σχετίζονται με τον καιρό και το κλίμα - 24 ώρες την ημέρα, 365 ημέρες το χρόνο - στις Εθνικές Μετεωρολογικές Υπηρεσίες των κρατών μελών της στην Ευρώπη, και άλλους χρήστες παγκοσμίως. Η EUMETSAT λειτουργεί ένα σύστημα μετεωρολογικών δορυφόρων που παρατηρούν την ατμόσφαιρα και τις επιφάνειες των ωκεανών και της ξηράς - 24 ώρες την ημέρα, 365 ημέρες το χρόνο. Αυτά τα δεδομένα παρέχονται στις Εθνικές Μετεωρολογικές Υπηρεσίες των Μελών του Οργανισμού και των Συνεργαζόμενων Κρατών στην Ευρώπη, καθώς και σε άλλους χρήστες παγκοσμίως. Η υπηρεσία που παρέχεται από το EUMETSAT συμβάλλει στη βελτίωση και τη διαφύλαξη της καθημερινής ζωής των ευρωπαίων πολιτών. Βοηθούν τους μετεωρολόγους

στον εντοπισμό και την παρακολούθηση της εξέλιξης δυνητικά επικίνδυνων καιρικών καταστάσεων και στην έκδοση έγκαιρων προβλέψεων και προειδοποιήσεων στις υπηρεσίες έκτακτης ανάγκης και στις τοπικές αρχές, συμβάλλοντας στον μετριασμό των επιπτώσεων του καιρού και στην προστασία της ανθρώπινης ζωής και περιουσίας. Αυτές οι πληροφορίες είναι επίσης κρίσιμες για την ασφάλεια των αεροπορικών ταξιδιών, της ναυτιλίας και της οδικής κυκλοφορίας, καθώς και για την καθημερινή δραστηριότητα της γεωργίας, των κατασκευών και πολλών άλλων βιομηχανιών. Η EUMETSAT λειτουργεί έναν στόλο δορυφόρων σε γεωστατική και πολική τροχιά, οι οποίοι παρέχουν ένα ευρύ φάσμα δεδομένων παρατήρησης της Γης για παρακολούθηση του καιρού, του κλίματος και του περιβάλλοντος. Σε γεωστατική τροχιά 36.000 χλμ., πάνω από τον ισημερινό, οι δορυφόροι της EUMETSAT περιστρέφονται γύρω από τη Γη με την ίδια ταχύτητα που περιστρέφεται η Γη, παρατηρώντας έτσι συστηματικά το ίδιο τμήμα της Γης (ο λεγόμενος Γήινος δίσκος) κάτω από την ίδια γεωμετρία. Αυτό επιτρέπει να φωτογραφίζονται εικόνες της Γης σε πολύ υψηλή συχνότητα, με τη σειρά μερικών λεπτών. Οι δορυφόροι Meteosat -9, -10 και -11 βρίσκονται σε γεωστατική τροχιά πάνω από την Ευρώπη και την Αφρική, ενώ ο Meteosat-8 λειτουργεί πάνω από τον Ινδικό Ωκεανό. Ο Meteosat-10 είναι ο πρωταρχικός λειτουργικός γεωστατικός δορυφόρος, τοποθετημένος σε κλίση 0 μοιρών και παρέχει πλήρη εικόνα της Γης κάθε 15 λεπτά. Ο Meteosat-9 παρέχει την υπηρεσία ταχείας σάρωσης, παρέχοντας συχνότερες εικόνες κάθε πέντε λεπτά σε μέρη της Ευρώπης, της Αφρικής και των παρακείμενων θαλασσών. Οι δορυφόροι Metop πετούν σε χαμηλότερη πολική τροχιά, σε υψόμετρο 817 χιλιομέτρων, και παρέχουν πιο λεπτομερείς παρατηρήσεις της παγκόσμιας ατμόσφαιρας, των ωκεανών και των ηπείρων. Ο Metop-A, ο πρώτος ευρωπαϊκός δορυφορικός μετεωρολογικός δορυφόρος σε τροχιά, ξεκίνησε τον Οκτώβριο του 2006 και παραδίδει επιχειρησιακά δεδομένα από τις 15 Μαΐου 2007. Το Metop-B ξεκίνησε στις 17 Σεπτεμβρίου 2012 και είναι ο κύριος επιχειρησιακός δορυφόρος από τις 24 Απριλίου 2013 Το Metop-A θα συνεχίσει να λειτουργεί για όσο διάστημα οι διαθέσιμες δυνατότητές του αποφέρουν οφέλη στους χρήστες.

Ελληνικό Κέντρο Διαστήματος: Οι σκοποί του ΕΛ.ΚΕ.Δ. είναι οι ακόλουθοι: Η διαμόρφωση πρότασης για τη στρατηγική στον τομέα του διαστήματος και η εκπόνηση κυλιόμενου-δυναμικού σχεδίου δράσης της διαστημικής στρατηγικής σε συνεργασία με την πανεπιστημιακή και ερευνητική κοινότητα, τον Δημόσιο και τον Ιδιωτικό Τομέα που προσδιορίζει στόχους, τομείς συνεργασίας και διαδικασίες για την επίτευξη των στόχων. Η συνεργασία, ο συντονισμός, η υποστήριξη και η κινητοποίηση φορέων, υπηρεσιών και νομικών προσώπων του Δημοσίου και του Ιδιωτικού Τομέα για την προώθηση, διάχυση και αξιοποίηση της διαστημικής στρατηγικής της Ελλάδας, καθώς και η συμμετοχή σε ευρωπαϊκούς και διεθνείς οργανισμούς και ομάδες που δραστηριοποιούνται σε διαστημικά θέματα και προγράμματα. Η προώθηση και συμμετοχή ως συντονιστής δημόσιων φορέων σε έργα και προγράμματα, καθώς και η διαχείριση εθνικών προγραμμάτων και έργων σε τομείς του Διαστήματος, όπως η επιστημονική έρευνα, η τεχνολογία, οι τηλεπικοινωνίες, η ασφάλεια, η οικονομία, το περιβάλλον, η αγροτική ανάπτυξη, οι μεταφορές, η ηλεκτρονική διακυβέρνηση και το εμπόριο. Η συμμετοχή σε ευρωπαϊκούς και διεθνείς οργανισμούς, πρωτοβουλίες, φόρουμ και δραστηριότητες για θέματα Διαστήματος, ο συντονισμός των εθνικών εκπροσώπων στον τομέα του Διαστήματος, η ανάπτυξη ευρωπαϊκών και διεθνών συνεργασιών, η ανταλλαγή και σύνθεση γνώσεων, καινοτομίας και δράσεων προκειμένου να μεγιστοποιηθεί η ανταποδοτική συμμετοχή της χώρας στους ευρωπαϊκούς και διεθνείς οργανισμούς Διαστήματος, σε ευρωπαϊκά ή διεθνή διαστημικά προγράμματα, καθώς και η συμμετοχή στη σχεδίαση προγραμμάτων για την εξυπηρέτηση εθνικών, επιστημονικών, επιχειρησιακών και αναπτυξιακών αναγκών στις οποίες το Διάστημα έχει πρωταρχικό ρόλο. Η συμβολή στην ανάπτυξη και ενίσχυση της τεχνολογίας και των διαστημικών εφαρμογών, υπηρεσιών και επίγειων υποδομών προς όφελος της εγχώριας βιομηχανίας και έρευνας, καθώς και η υποστήριξη στο σχεδιασμό δορυφόρων, δορυφορικών συστημάτων, υλικών και



εξοπλισμού, συμπεριλαμβανομένων των δραστηριοτήτων τηλεπισκόπησης, μέσω και της αξιοποίησης της συμμετοχής της χώρας στους διεθνείς και ευρωπαϊκούς οργανισμούς και προγράμματα, καθώς και στις πάσης φύσεως επιστροφές που δικαιούται η χώρα. Η συνεργασία με αρμόδιους φορείς και υπηρεσίες για τη συνεχή επιμόρφωση των φοιτητών, των νέων ερευνητών και των δημόσιων λειτουργών σε θέματα Διαστήματος, καθώς και η σχεδίαση και η συμμετοχή στην υλοποίηση δράσεων για την κατανόηση των διαστημικών δραστηριοτήτων και εφαρμογών. Η προώθηση θεμάτων τυποποίησης και η μεταφορά τεχνογνωσίας και καλών πρακτικών στον τομέα των διαστημικών εφαρμογών και υπηρεσιών. Η πειραματική ή εμπορική αξιοποίηση των δικαιωμάτων του Δημοσίου σε δορυφορικά και διαστημικά αντικείμενα, καθώς και η αξιοποίηση των συναφών υπηρεσιών, πόρων και περιουσιακών στοιχείων, κινητών και ακινήτων, κατόπιν σχετικής εκχωρήσεως ή άδειας του Υπουργού Ψηφιακής Διακυβέρνησης. Η παροχή συνδρομής προς το Δημόσιο αναφορικά με δορυφορικά και διαστημικά θέματα, καθώς και η παροχή συμβουλευτικών υπηρεσιών και η εκπόνηση μελετών προς το Υπουργείο Ψηφιακής Διακυβέρνησης αναφορικά με τη διαχείριση των δικαιωμάτων και των υποχρεώσεων του Δημοσίου στο Διάστημα, την καταχώριση και αξιολόγηση διαστημικών αντικειμένων, καθώς και την ανάπτυξη δορυφορικών συστημάτων.

### 1.3 Πολιτική του Διαστήματος

Το Διάστημα αποτέλεσε αρχικά, ιδιαίτερα κατά την διάρκεια του ψυχρού πολέμου στις δεκαετίες 1950-1980, μία αρένα προβολής ισχύος (η προβολής σημαίας), τεχνολογικών ικανοτήτων και πολιτικής ισχύος. Η διπλή χρήση του διαστήματος από την άλλη μεριά, όπου η ανάπτυξη διαστημικών φορέων σήμαινε την δυνατότητα τοποθέτησης, μεταφοράς και κατεύθυνσης στρατιωτικών φορτίων/κεφαλών από τον χρήστη οπουδήποτε στον πλανήτη μας σε χρόνο 5-10 λεπτών από την στιγμή της εκτόξευσης, αλλά και η δυνατότητα παρατήρησης της Γης (εικόνες) από τροχιές που δεν ήταν δυνατό να καταρριφθούν δορυφόροι (εξαιτίας της συμφωνίας του ΟΗΕ για την ειρηνική χρήση του Διαστήματος) αποτέλεσε αλλά και αποτελεί κύριο λόγο για αναπτυσσόμενα ή ανεπτυγμένα κράτη να αναπτύσσουν διαστημικές τεχνολογίες. Στην σημερινή εποχή, η πιο άμεση και βαθιά πρόσβαση σε υψηλές και νέες τεχνολογίες έχει βοηθήσει να δημιουργηθούν νέες διαστημικές εφαρμογές όπως η πλοήγηση, η γεωργία ακριβείας, η τηλεπαρατήρηση με διακριτική ικανότητα μικρότερη του ενός μέτρου, οι τηλεπικοινωνίες σε συνδυασμό με την παροχή ευρυζωνικού διαδικτύου από σμήνη δορυφόρων σε χαμηλή αλλά και γεωστατική τροχιά με μεγάλο εμπορικό ενδιαφέρον, με προβλέψεις να δείχνουν ότι το 2040 η αγορά του διαστήματος θα φτάσει στο €1 ΤΡΙΣ, πράγμα που σαφώς επηρεάζει την σχεδίαση διαστημικής πολιτικής.

Η Ευρώπη, έχει διαμορφώσει ξεκάθαρη πολιτική για το Διάστημα η οποία βασίζεται στην χρήση του Διαστήματος για την βελτίωση της ποιότητας ζωής των πολιτών της αλλά και για την προστασία της ασφάλειας του πολίτη, του περιβάλλοντος και για την δημιουργία αναπτυξιακών πολιτικών και θέσεων εργασίας. Τα διαστημικά προγράμματα της Ευρωπαϊκής Ένωσης διευκολύνουν τις καθημερινές δραστηριότητες των ευρωπαίων πολιτών στη Γη. Οι δορυφόροι που θέτει σε τροχιά η ΕΕ επιτρέπουν σε εκατομμύρια άτομα να επικοινωνούν χρησιμοποιώντας νέες τεχνολογίες, να ταξιδεύουν με χερσαία, θαλάσσια και αεροπορικά μέσα, καθώς και να αναπτύσσουν λύσεις που βελτιώνουν την κατάσταση του πλανήτη μας.

Η διαστημική πολιτική της ΕΕ:

- συμβάλλει στην τόνωση της απασχόλησης, της ανάπτυξης και των επενδύσεων στην Ευρώπη
- διευρύνει τα όρια της επιστήμης και της έρευνας

- εξυπηρετεί άλλες πολιτικές, όπως η ασφάλεια και η άμυνα, η βιομηχανία και ο ψηφιακός τομέας
- ενισχύει τον ρόλο της ΕΕ ως παγκόσμιου παράγοντα

Σύμφωνα με έρευνα της Ευρωπαϊκής Επιτροπής, η ευρωπαϊκή διαστημική οικονομία, συμπεριλαμβανομένης της μεταποίησης και των υπηρεσιών, απασχολεί περισσότερους από 230 000 επαγγελματίες. Το 2014, η αξία της εκτιμήθηκε σε περίπου **50 δισ. €**, ποσό που αντιστοιχεί στο ένα πέμπτο της αξίας του παγκόσμιου διαστημικού τομέα.

Το μέλλον της διαστημικής πολιτικής για το 2021-2027: Το συνολικό διεθνές διαστημικό πλαίσιο μεταβάλλεται ραγδαία. Ο ανταγωνισμός εντείνεται και οι διαστημικές δραστηριότητες γίνονται όλο και πιο εμπορικές, με μεγαλύτερη συμμετοχή του ιδιωτικού τομέα. Το κόστος μειώνεται χάρη σε σημαντικές τεχνολογικές αλλαγές, που ανατρέπουν τα παραδοσιακά μοντέλα του τομέα. Ο συνδυασμός διαστημικών δεδομένων και ψηφιακών τεχνολογιών δημιουργεί επίσης σημαντικές ευκαιρίες, γεγονός που με τη σειρά του μπορεί να προσφέρει πολλές επιχειρηματικές δυνατότητες σε όλες τις χώρες της ΕΕ. Στο πλαίσιο αυτό, τον Οκτώβριο του 2016 εγκαινιάστηκε μια διαστημική στρατηγική για την Ευρώπη.

Οι στόχοι της στρατηγικής είναι:

- να αποφέρει απτά οφέλη στους πολίτες και τις επιχειρήσεις της Ευρώπης
- να καλλιεργήσει έναν ανταγωνιστικό και καινοτόμο ευρωπαϊκό διαστημικό τομέα
- να βελτιώσει τη στρατηγική αυτονομία της ΕΕ
- να ενισχύσει την ηγετική θέση της ΕΕ στην παγκόσμια σκηνή

Συγκεκριμένα η Ε.Ε. έχει αποφασίσει να επιταχύνει τα σχέδια της για το διάστημα. Συγκεκριμένα, η ανάπτυξη των δορυφόρων Galileo επιταχύνθηκε κατά τρία έτη, στα τέλη του 2024 αντί για το 2027, ενώ για πρώτη φορά θα υπάρξει προϋπολογισμός για υποστήριξη επαναχρησιμοποιούμενων πυραύλων και άλλων νέων τεχνολογιών σχετικές με την εκτόξευση, με σκοπό η Ευρώπη να ανταγωνισθεί την ηγετική θέση της SpaceX (ΗΠΑ). Θα προταθεί επίσης κεφάλαιο 1 δισεκατομμυρίου ευρώ για χρηματοδότηση διαγωνισμών που θα συμμετέχουν startup εταιρίες, ενώ θα δοθεί άλλο 1 δισεκατομμύριο ευρώ στην Arianespace για την καλλιέργεια καινοτομιών στον τομέα των διαστημικών εκτοξευτών. Τέλος, υπάρχουν σχέδια για ένα πανευρωπαϊκό δορυφορικό δίκτυο ίντερνετ ευρείας χρήσης, καθώς και για ένα σύστημα αποφυγής συγκρούσεων δορυφόρων με άλλα αντικείμενα σε τροχιά. Σημειώνεται, πως τις τελευταίες δεκαετίες η Ευρώπη έχει κάνει μεγάλα βήματα για την ανεξαρτητοποίησή της από τις ΗΠΑ και τη Ρωσία στο χώρο του διαστήματος. «Το διάστημα είναι ένα από τα δυνατά σημεία της Ευρώπης και δίνουμε στον εαυτό μας τα μέσα για να επιταχύνουμε. Η SpaceX έχει θέσει νέα standards για τις εκτοξεύσεις, οπότε το Ariane 6 είναι ένα απαραίτητο βήμα, αλλά όχι ο απόλυτος στόχος. Πρέπει να ξεκινήσουμε να σκεφτόμαστε τον Ariane 7” ανέφερε ο Μπρετόν, Ευρωπαίος Επίτροπος υπεύθυνος για το Διάστημα. Ο Ariane 6 είναι ένας εκτοξευτής πυραύλων που αναπτύχθηκε από την Ευρωπαϊκή Υπηρεσία Διαστήματος, που θα ρίξει το κόστος εκτόξευσης σημαντικά και έχει στόχο να ανταγωνισθεί τον Falcon 9 της SpaceX που σήμερα έχει μεγάλη εμπορική που απώλεσε η Ευρώπη ύστερα από 2 δεκαετίες με τους Ariane 4 και 5. Η πρώτη του πτήση είχε προγραμματιστεί για το 2020, αλλά δεν έχει ακόμη πραγματοποιηθεί.

#### **1.4 Εξερεύνηση του Διαστήματος – Η Αρχή**

Η εξερεύνηση του διαστήματος είναι η φυσική εξερεύνηση των ουράνιων σωμάτων, του διαστημικού χώρου και γενικά οτιδήποτε περιλαμβάνει τις τεχνολογίες, την επιστήμη, και την πολιτική σχετικά με τις διαστημικές προσπάθειες.

Στις 4 Οκτωβρίου 1957 δόθηκε μεγάλη ώθηση στον συγκεκριμένο τομέα, με την εκτόξευση του Σπούτνικ 1, του πρώτου ανθρώπινου κατασκευάσματος που μπήκε σε τροχιά, η οποία έδωσε το έναυσμα για τον διαστημικό αγώνα μεταξύ των Ηνωμένων Πολιτειών και της Σοβιετικής Ένωσης. Δύο άλλα διάστημα επιτεύγματα της πρώιμης αυτής περιόδου ήταν ο πρώτος άνθρωπος στο διάστημα, ο Γιούρι Γκαγκάριν με το Βοστόκ 1 στις 12 Απριλίου 1961 (πάλι από την ΕΣΣΔ), και οι πρώτοι άνθρωποι στο φεγγάρι, οι Νηλ Άρμστρονγκ και Μπαζ Όλντριν με το Απόλλων 11 μαζί με τον Μάικλ Κόλλινς (από τις ΗΠΑ). Μετά από 30 έτη ανταγωνισμού, η εστίαση των προσπαθειών άρχισε να μετατοπίζεται από τις μεμονωμένες πτήσεις στο ανανεώσιμο υλικό (όπως το αμερικανικό διαστημικό λεωφορείο και το αντίστοιχο σοβιετικό Μπουράν) και από τον ανταγωνισμό στη συνεργασία, όπως στον διεθνή διαστημικό σταθμό.

Φθάνοντας στο διάστημα: Ο συνήθης ορισμός για το διάστημα είναι ότι αυτό αρχίζει στα 100 χιλιόμετρα (62 μίλια) επάνω από τη γήινη επιφάνεια. Οι Ηνωμένες Πολιτείες χρησιμοποιούν μερικές φορές ως όριο τα 80 χιλιόμετρα (50 μίλια). Οι διαστημικές πτήσεις διακρίνονται σε υποτροχιακές και τροχιακές. Όσον αφορά στις υποτροχιακές πτήσεις, στις 3 Οκτωβρίου 1942, με τον γερμανικό πύραυλο A-4 (ένα πρωτότυπο για τον πύραυλο V-2 που χρησιμοποιήθηκε ως βόμβα εναντίον του Λονδίνου από τη Ναζιστική Γερμανία), έγινε η πρώτη επιτυχής εκτόξευση ενός αντικειμένου στο διάστημα. Οι πρώτοι οργανισμοί που προωθήθηκαν στο διάστημα ήταν μύγες φρούτων και σπόροι καλαμποκιού σε έναν γερμανικό πύραυλο V-2, που εκτοξεύθηκε τον Ιούλιο του 1946 από τις ΗΠΑ. τα ρωσικά διαστημικά οχήματα πέτυχαν ιδιαίτερα μεγάλα ύψη χωρίς να μπουνέ σε τροχιά. Ο αρχικός προγραμματισμός της αποστολής Απόλλων περιελάμβανε επίσης μια άμεση προσέγγιση στο φεγγάρι, η οποία όμως εγκαταλείφθηκε αργότερα. Πολλά τηλεκατευθυνόμενα διαστημικά οχήματα, με προορισμό τους εξωτερικούς πλανήτες, χρησιμοποιούν την άμεση προσέγγιση και δεν μπαίνουν σε τροχιά γύρω από τη Γη πριν αναχωρήσουν.

Επειδή οι υποτροχιακές πτήσεις είναι εξ ορισμού σύντομες (λιγότερο από 1,7 ώρες), μία πιο μακροχρόνια αποστολή απαιτεί τροχιακή πτήση (με ελλειπτική ή κυκλική τροχιά), ή υπερτροχιακή πτήση (με παραβολική ή υπερβολική τροχιά). Επίσης, η τροχιακή πτήση απαιτεί πολύ υψηλότερες ταχύτητες από την υπερτροχιακή, μετατρέποντας την επίτευξή της σε τεχνολογική πρόκληση. Γι' αυτό οι τροχιακές πτήσεις είναι άκρως ουσιαστικές για τη διαστημική εξερεύνηση.

Οι πρώτες τροχιακές πτήσεις: Η πρώτη επιτυχής τροχιακή εκτόξευση ήταν η αποστολή του σοβιετικού τηλεκατευθυνόμενου δορυφόρου Σπούτνικ 1, στις 4 Οκτωβρίου 1957. Ο δορυφόρος ζύγιζε περίπου 83 κιλά. Είχε δύο ραδιοσυσκευές αποστολής σημάτων (20 και 40 MHz), σήματα τα οποία μπορούσαν να ακουστούν από κάθε ραδιόφωνο σε όλη την υδρόγειο και είχε μπει σε τροχιά σε ένα ύψος περίπου 250 χμ (150 μίλια). Η ανάλυση των ραδιοσημάτων χρησιμοποιήθηκε για να συγκεντρώσει τις πληροφορίες για την πυκνότητα των ηλεκτρονίων της ιονόσφαιρας. Η θερμοκρασία και η πίεση κωδικοποιήθηκαν στη συχνότητα των ραδιοηχητικών σημάτων. Ο Σπούτνικ 1 εκτοξεύθηκε από έναν πύραυλο R-7. Αποτεφρώθηκε κατά την επανείσοδό του στην ατμόσφαιρα, στις 4 Ιανουαρίου 1958.

Αυτή η επιτυχία οδήγησε σε μια κλιμάκωση του αμερικανικού διαστημικού προγράμματος που είχε μια ανεπιτυχή τροχιακή εκτόξευση 2 μήνες αργότερα και την πρώτη επιτυχή τροχιακή έναρξή του 4 μήνες μετά από τον Σπούτνικ. Στο μεταξύ, ένας σοβιετικός σκύλος, η Λάικα, έγινε το πρώτο ζώο σε τροχιά στις 3 Νοεμβρίου 1957 (το ζώο πέθανε πέντε με επτά ώρες μετά την έναρξη της πτήσης, μέσα στον Σπούτνικ 2 από υπερθέρμανση).

Ο πρώτος άνθρωπος στο διάστημα: Η πρώτη επανδρωμένη πτήση στο διάστημα έγινε με το Βοστόκ 1, φέρνοντας τον 27χρονο κοσμοναύτη Γιούρι Γκαγκάριν, κατά την ιστορική

ημερομηνία της 12ης Απριλίου 1961, σε τροχιά γύρω από την υδρόγειο. Αυτή η ημερομηνία γιορτάζεται ως "Ημέρα του Κοσμοναύτη" στη Ρωσία ή ως "Νύχτα του Γιούρι" παγκοσμίως.

Η πτήση του Γκαγκάριν αντήχησε σε όλη την υδρόγειο όχι μόνο επειδή παρουσίαζε την ανωτερότητα του σοβιετικού διαστημικού προγράμματος, αλλά επειδή άνοιγε εξ ολοκλήρου μια νέα εποχή στη διαστημική εξερεύνηση και στις επανδρωμένες διαστημικές πτήσεις. Οι ΗΠΑ θα εκτόξευαν τον πρώτο πολίτη τους στο διάστημα μέσα σε έναν μήνα από την πτήση Γκαγκάριν. Εντούτοις, θα χρειαζόταν στις ΗΠΑ σχεδόν ένα πλήρες έτος για να τοποθετήσουν έναν άνθρωπο σε τροχιά.

Οι άνθρωποι-κλειδιά στην πρώιμη διαστημική εξερεύνηση: Το όνειρο του να βγούμε έξω από τη γήινη ατμόσφαιρα βασίστηκε στην εξέλιξη της τεχνολογίας πυραύλων. Ο γερμανικός V-2 ήταν ο πρώτος πύραυλος που ταξίδεψε στο διάστημα, και που υπερνίκησε προβλήματα ώθησης και αστοχίας υλικών. Κατά τη διάρκεια των τελικών ημερών του Β΄ Παγκόσμιου Πολέμου αυτή η τεχνολογία κλάπηκε και από τους Αμερικανούς και από τους Σοβιετικούς. Η αρχική κατευθυντήρια δύναμη ήταν ένας αγώνας εξοπλισμών για τα διηπειρωτικά βαλλιστικά βλήματα (ICBM), ως μεγάλης ακτίνας φορείς πυρηνικών όπλων, αλλά το 1961, όταν δηλώθηκε πως η ΕΣΣΔ έστειλε τον πρώτο άνθρωπο στο διάστημα, οι ΗΠΑ δήλωσαν πως εμπλέκονται σε διαστημικό αγώνα με τη Ρωσία.

Οι Κονσταντίν Τσιολκόφσκι, Ρόμπερτ Γκόνταρντ, Χέρμαν Όμπερτ και Ράινχολτ Τίλινγκ εργάστηκαν τα πρώτα έτη του 20ού αιώνα πάνω στην τεχνολογία των πυραύλων. Ο Βέρνερ φον Μπράουν ήταν αρχιμηχανικός κατά τον Β΄ Παγκόσμιο Πόλεμο στο πυραυλικό πρόγραμμα της ναζιστικής Γερμανίας, υπεύθυνος μεταξύ άλλων και για την ανάπτυξη των πυραύλων V-2. Μετά από τον πόλεμο (μαζί με πολλούς άλλους γερμανούς πυραυλικούς επιστήμονες αλλά και δείγματα πυραύλων) μεταφέρθηκε κρυφά στις ΗΠΑ για να εργαστεί στο αμερικανικό διαστημικό πρόγραμμα. Πήρε την αμερικανική υπηκοότητα και οδήγησε την ομάδα στη δημιουργία του Εξερευνητή Ι (Explorer I), του πρώτου αμερικανικού δορυφόρου τροχιάς. Ο φον Μπράουν διηύθυνε την ομάδα της NASA στο Κέντρο Διαστημικής Πτήσης, όπου ανέπτυξε τον Saturn V («Κρόνο V»), τον πύραυλο φορέα για την αποστολή στο φεγγάρι. Ο αγώνας για το διάστημα οδήγηθηκε συχνά από τον Ρώσο Σεργκέι Κορολιόβ, του οποίου η κληρονομιά περιλαμβάνει τον πύραυλο R7 και το διαστημόπλοιο Σογιούζ, τα οποία αποτέλεσαν τη βάση του ρώσικου διαστημικού προγράμματος μέχρι και τις αρχές του 21-ου αιώνα. Ο Κορολιόβ ήταν ο εγκέφαλος πίσω από τον πρώτο δορυφόρο, τον πρώτο άνδρα (και την πρώτη γυναίκα) σε τροχιά και τον πρώτο διαστημικό περίπατο. Μέχρι το θάνατό του η ταυτότητά του ήταν πολύ καλά φρουρούμενο κρατικό μυστικό.

Άλλοι άνθρωποι-κλειδιά: Ο Βαλεντίν Γκλούσκο ήταν αρχισχεδιαστής διαστημοπλοίων και πυραύλων για την ΕΣΣΔ. Ο Γκλούσκο σχεδίασε τις μηχανές των πρώτων σοβιετικών πυραύλων. Ο Βασίλι Μίσιν, ήταν προϊστάμενος σχεδιαστής που δούλεψε κάτω από την επίβλεψη του Σεργκέι Κορολιέβ και ένας από τους πρώτους Σοβιετικούς που επιθεώρησε τις γερμανικές εγκαταστάσεις του προγράμματος V-2. Μετά από το θάνατο του Σεργκέι Κορολιέβ, ο Μίσιν θεωρήθηκε υπεύθυνος για τη σοβιετική αποτυχία να είναι η ΕΣΣΔ η πρώτη χώρα που θα έστειλε ένα άτομο στο φεγγάρι. Ο Ρόμπερτ Γκίλρουθ, ήταν προϊστάμενος της NASA στην Ομάδα Εργασίας Διαστήματος (Space Task Group) και διευθυντής του Κέντρου Επανδρωμένων Πτήσεων (Manned Flight Center, σήμερα Johnson Space Center) σε 25 επανδρωμένες διαστημικές πτήσεις. Ο Γκίλρουθ ήταν το πρόσωπο που πρότεινε στον πρόεδρο Κέννεντυ να επιχειρήσουν οι Αμερικανοί το τολμηρό εγχείρημα της προσσελήνωσης σε μια προσπάθεια να αφαιρεθεί η διαστημική ανωτερότητα από τους Σοβιετικούς. Ο Κρίστοφερ Κ. Κράφτ, , ήταν ο πρώτος διευθυντής πτήσης της NASA και επιτήρησε την ανάπτυξη του συστήματος ελέγχου αποστολής (mission control). Την περίοδο του προγράμματος Απόλλων, παραιτήθηκε από διευθυντής πτήσεων και επικεντρώθηκε στην διαχείριση και σχεδιασμό των αποστολών.

### 1.5 Σημαντικότερες Διαστημικές Αποστολές

Σε αυτήν την ενότητα παρουσιάζουμε τις κυριότερες Διαστημικές αποστολές από την αρχή της εποχή του Διαστήματος μέχρι και τις τελευταίες εξελίξεις στο χώρο.

#### 1957: Εκτόξευση του Sputnik 1

Ο Sputnik ήταν ο πρώτος τεχνητός δορυφόρος στην ιστορία της ανθρωπότητας. Εκτοξεύτηκε στις 4 Οκτωβρίου 1957 και αποτέλεσε το έναυσμα για την εξερεύνηση του διαστήματος. Ήταν ο πρώτος μιας σειράς δέκα δορυφόρων με το ίδιο όνομα. Ο δορυφόρος αυτός ουσιαστικά ήταν ένα μεταλλικό σώμα σφαιρικού σχήματος διαμέτρου 58 εκατοστών και κατασκευασμένο από αλουμίνιο με βάρος 83 κιλά περίπου. Ο Sputnik ήταν η απαρχή για το συναγωνισμό ανάμεσα σε ΗΠΑ και Σοβιετική Ένωση για την κυριαρχία στο χώρο της εξερεύνησης του διαστήματος.



Σχήμα 12: Εικόνα του Sputnik-1

#### 1961: Gagarin: ο πρώτος άνθρωπος στο διάστημα

Ο εικοσιεπτάχρονος τότε Yuri Gagarin έγινε ο πρώτος άνθρωπος που ταξίδεψε στο διάστημα και μπήκε σε τροχιά γύρω από τη Γη, στις 12 Απριλίου του 1961. Μέσα στο Vostok 1 κατάφερε να ταξιδέψει με ταχύτητα 27396 χιλιομέτρων ανά ώρα. Μετά από 67 λεπτά σε τροχιά, άρχισε η επιβράδυνση του σκάφους του και άρχισε την επανείσοδο του στην ατμόσφαιρα της Γης. Στα 7 χιλιόμετρα ύψος από το έδαφος ο Gagarin χρησιμοποίησε το εκτινασσόμενο κάθισμα του σκάφους του και προσγειώθηκε μετά από ελεύθερη πτώση με το αλεξιπτωτό του. Η συνολική διάρκεια της αποστολής του, από την ώρα της εκτόξευσης μέχρι και την ώρα της προσγείωσης ήταν 108 λεπτά. Το επίτευγμα του Gagarin είχε γίνει παγκόσμια γνωστό.



**Σχήμα 13: Πρωτοσέλιδο εφημερίδας του 1961, Η κάψουλα με την οποία είχε ταξιδέψει ο Gagarin**

1964: Mariner 4, οι πρώτες φωτογραφίες από τον Άρη  
 Ο Mariner 4 ήταν το πρώτο διαστημικό σκάφος στη ιστορία της ανθρωπότητας που κατάφερε να πάρει εικόνες από τη επιφάνεια του πλανήτη Άρη. Μετά από 7,5 μήνες πτήση κατάφερε να προσεγγίσει τον Άρη στις 15 Ιουλίου 1965. Η μικρότερη απόσταση από την επιφάνεια του Άρη, στην οποία κατάφερε να φτάσει το σκάφος ήταν 9846 χιλιόμετρα. Στις 21 Δεκεμβρίου 1967 και μετά από πολλές συγκρούσεις με μικρούς μετεωρίτες αλλά και πολλές ελλείψεις στα συστήματα του, η επικοινωνία με τη Γη, διακόπηκε οριστικά.



**Σχήμα 14: Φωτογραφία του Άρη από τον Mariner 4, το Διαστημικό Σκάφος Mariner 4, θέσεις του Mariner 4 γύρω από τον Άρη**

21 Ιουλίου 1969: Ο άνθρωπος στη σελήνη  
 Η αποστολή Apollo 11 ήταν μέρος της προσπάθειας της NASA για προσεδάφιση ανθρώπων στη σελήνη. Τελικά αυτό έγινε κατορθωτό στις 21 Ιουλίου του 1969 όταν ο Neil Armstrong έγινε ο πρώτος άνθρωπος που πάτησε στη Σελήνη. Κατά τη διάρκεια της προσσελήνωσης ο Armstrong είπε χαρακτηριστικά: « That's one small step for man, one giant leap for mankind », δηλαδή, «Ένα μικρό βήμα για έναν άνθρωπο, ένα γιγάντιο άλμα για την ανθρωπότητα», που είχε από πριν προετοιμάσει για την συγκεκριμένη στιγμή.



**Σχήμα 15: Αποστολή Apollo 11**

1971: Ο πρώτος διαστημικός σταθμός μπαίνει σε τροχιά  
 Ο Salyut 1 εκτοξεύτηκε στις 19 Απριλίου 1971. Ήταν ο πρώτος διαστημικός σταθμός που τέθηκε ποτέ σε τροχιά. Λόγω μια βλάβης στη θυρίδα εισόδου, το πρώτο του πλήρωμα που εκτοξεύτηκε με το Soyuz 10, με σκοπό να εισέλθει στο σταθμό, παρόλο που συνδέθηκε με

αυτόν, απέτυχε. Το δεύτερο πλήρωμα εκτοξεύτηκε με το Soyuz 11, όμως βρήκε τον σταθμό σε κακή κατάσταση, λόγω πυρκαγιάς σε καλώδια, αλλά κατάφερε να προσαρμοστεί και να ζήσει σε αυτόν είκοσι τρεις μέρες. Δυστυχώς, λίγο πριν την επάνοδο του πληρώματος, μια από τις βαλβίδες του Soyuz άνοιξε στο διάστημα, όταν απορρίφθηκε το τροχιακό του τμήμα. Αυτό είχε σαν αποτέλεσμα, λόγω αποσυμπίεσης οι τρεις κοσμοναύτες να σκοτωθούν και να φτάσουν στη Γη νεκροί, στις 11 Οκτωβρίου του 1971.



**Σχήμα 16: Διαστημικός Σταθμός Salyut 1, Κοσμοναύτες Dobrovolski, Volkov, Patsayev**

1976: Δύο διαστημικά οχήματα στον «κόκκινο πλανήτη»

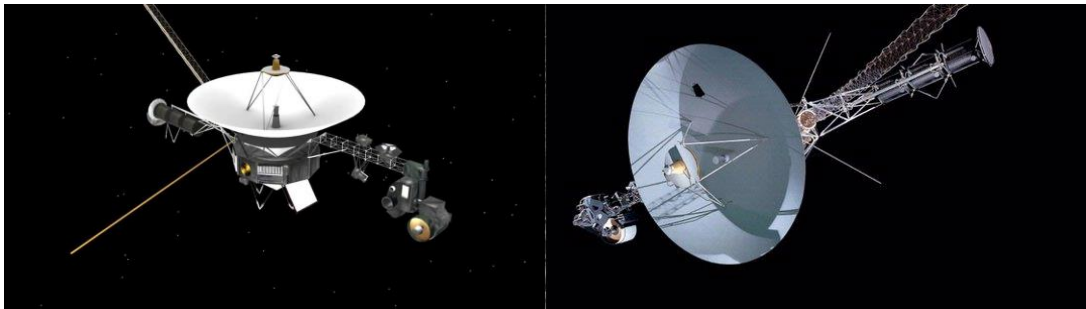
Η πρώτη σημαντική εξερεύνηση του «κόκκινου πλανήτη» έγινε από δύο σκάφη τύπου Viking της NASA που προσεδάφιστηκαν στην επιφάνεια του, τον Αύγουστο και τον Σεπτέμβριο του 1976. Αποστολή τους ήταν να στείλουν φωτογραφίες από την επιφάνεια του, να μελετήσουν το κλίμα του και να εκτελέσουν μια σειρά από πειράματα για την ύπαρξη ή όχι ζωής στον πλανήτη.



**Σχήμα 17: Διαστημικό Σκάφος Viking 1, Εικόνες από τον Viking 1 από τον Άρη**

1979: Διαπλανητικό Σκάφη Voyager 1, 2

Το Voyager 1 είναι ένα μη επανδρωμένο διαπλανητικό διαστημόπλοιο που εκτοξεύτηκε 16 ημέρες μετά το Voyager 2, στις 5 Σεπτεμβρίου 1977. Η διαστημική του τροχιά ήταν έτσι προγραμματισμένη ώστε να πλησιάσει στον Ουρανό πολύ νωρίτερα από το δίδυμο Voyager 2. Στις 12 Σεπτεμβρίου 2013 η NASA ανακοίνωσε ότι το Voyager 1 είναι επισήμως το πρώτο ανθρώπινο κατασκεύασμα που φτάνει στο διαστρικό χώρο. Η είσοδος στο διαστρικό χώρο έγινε στις 25 Αυγούστου του 2012, όπως προέκυψε από την ανάλυση της πυκνότητας του πλάσματος. Τον Μάιο του 2019 το Voyager 1 απείχε από τη Γη περίπου 21,7 δισεκατομμύρια χιλιόμετρα ή 145 AU όντας το πιο απομακρυσμένο από τη Γη αντικείμενο ανθρώπινης κατασκευής. Η αποστολή του Voyager 1 εκτιμάται πώς θα ολοκληρωθεί μέσα στο 2020 όταν πια η γεννήτρια ραδιοϊσοτόπων με την οποία είναι εξοπλισμένο δε θα μπορεί να παράξει αρκετή ενέργεια για να τροφοδοτήσει κανένα όργανό του.



**Σχήμα 18: Τα διαπλανητικά διαστημόπλοια Voyager 1 και 2**

Το Διαστημικό Λεωφορείο της NASA, που επίσημα λέγεται «Διαστημικό Σύστημα Μεταφορών» (Space Transportation System-STS), είναι ιστορικός φορέας εκτόξευσης πληρωμάτων και φορτίου των ΗΠΑ. Συνολικά, κατασκευάστηκαν πέντε διαστημικά λεωφορεία, απ'τα οποία τρία αποσύρθηκαν (Discover, Atlantis, Endeavour), δυο καταστράφηκαν σε ατυχήματα, το Challenger και το Columbia, το 1986 και 2003 αντίστοιχα. Το διαστημικό λεωφορείο εκτοξευόταν κάθετα, φέρνοντας συνήθως πέντε έως επτά αστροναύτες (αν και έχουν μεταφερθεί και οκτώ) και μέχρι περίπου 22.700 κιλά (50.000 λίβρες) ωφέλιμου φορτίου σε χαμηλή γήινη τροχιά. Όταν η αποστολή του τελείωνε, επέστρεφε μέσα στην γήινη ατμόσφαιρα, πετούσε σαν ανεμοπλάνο και προσγειωνόταν οριζοντίως σε προκαθορισμένους διαδρόμους προσγείωσης. Το διαστημικό λεωφορείο ήταν το πρώτο τροχιακό διαστημικό σκάφος που σχεδιάστηκε με μερική ικανότητα επαναχρησιμοποίησης. Ήταν επίσης το πρώτο επανδρωμένο διαστημικό σκάφος με φτερά που έχει επιτύχει να εκτοξευθεί σε τροχιά και να προσγειωθεί. Μετέφερε μεγάλα ωφέλιμα φορτία σε διάφορες τροχιές, χρησίμευσε σαν πορθμείο για την μεταφορά πληρωμάτων προς και από το Διεθνή Διαστημικό Σταθμό (ISS), και εκτέλεσε αποστολές συντήρησης και επισκευών. Η πρώτη εκτόξευση έγινε στις 12 Απριλίου 1981 με το Columbia. Σύμφωνα με το «όραμα για τη διαστημική εξερεύνηση», το νέο πρόγραμμα της NASA για την επιστροφή στη Σελήνη και την εξερεύνηση του Άρη, η χρήση του διαστημικού λεωφορείου στράφηκε στην ολοκλήρωση της συναρμολόγησης του ISS ως το 2011, οπότε και τερματίστηκε.



**Σχήμα 19: Το διαστημικό λεωφορείο Atlantis εκτοξεύεται ξεκινώντας την αποστολή STS-71, Στις εξωτερικές επιφάνειες του σκάφους αναπτύσσονται θερμοκρασίες έως και 1.500°C κατά τη διάρκεια της επανεισόδου. Το Εντέβορ στη φάση της προσγείωσης και ενώ έχει ανοίξει το αλεξίπτωτο**

#### 1990: Διαστημικό Τηλεσκόπιο 'Hubble'

Το Διαστημικό τηλεσκόπιο Χαμπλ (ΔΤΧ) (*Hubble Space Telescope, HST*) είναι τηλεσκόπιο με μάζα 11,25 τόνους, μήκους 13,2 μ. και διάμετρο 4,2 μέτρα που περιφέρεται σε ύψος 559 χλμ.. Τέθηκε σε τροχιά από το αμερικανικό Διαστημικό Λεωφορείο Discovery τον Απρίλιο του 1990 και έχει πάρει το όνομά του από τον Αμερικανό αστρονόμο Edwin Hubble. Από τότε έχει δεχτεί πέντε αποστολές επιδιόρθωσης στο διάστημα, κάτι για το οποίο και είχε κατασκευαστεί. Η πρώτη ήταν καθοριστική διότι αποδείχτηκε ότι το οπτικό σύστημα ήταν ελαττωματικό και έστειλε θαμπές φωτογραφίες και έπρεπε επειγόντως να επιδιορθωθεί. Στο



εσωτερικό του φέρει ένα κατοπτρικό τηλεσκόπιο τύπου Ritchey-Chrétien που λειτουργεί στην εγγύς υπέρυθρη ακτινοβολία, στο οπτικό φως και την υπεριώδη ακτινοβολία. Η συμβολή του ΔΤΧ στην αστρονομία είναι τεράστια αφού βοήθησε στην επίλυση κάποιων από τα προβλήματα της αστρονομίας, δίδοντας δεδομένα που χρησιμοποιήθηκαν σε νέες θεωρίες για την επίλυση αυτών των προβλημάτων.



**Σχήμα 20: Το ΔΤ Hubble σε τροχιά. Η εικόνα ‘Eagle Nebula’ από το ΔΤΧ. Το ΔΤΧ προσδεμένο στο Διαστημικό Λεωφορείο**

1995: MIR longest space mission Polyakov

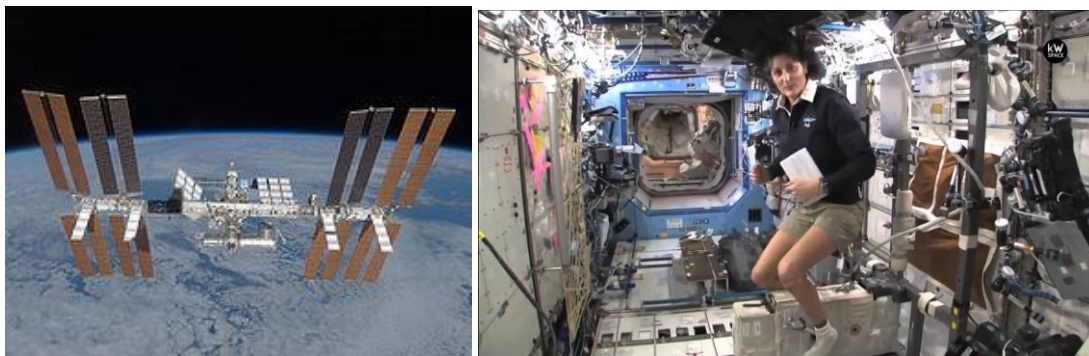
Ο MIR (σημαίνει *κόσμος* ή *ειρήνη* στα ρωσικά) ήταν σοβιετικός διαστημικός σταθμός. Τέθηκε σε τροχιά 400 χλμ στις 19 Φεβρουαρίου του 1986 και υπήρχε στο διάστημα μέχρι τις 23 Μαρτίου του 2001. Μετά τη διάλυση της ΕΣΣΔ, την διαχείριση και περαιτέρω ανάπτυξη του σταθμού ανέλαβε η Ρωσική Ομοσπονδία. Ο αστροναύτης Σεργκέι Κρικάλεφ έμεινε ολομόναχος ένα χρόνο στο Μιρ, καθώς μετά την πτώση της Σοβιετικής Ένωσης η χώρα του δεν μπορούσε να ... προσφέρει τα χρήματα για την επιστροφή του στη Γη! Ο Μιρ ήταν ο πρώτος διαστημικός σταθμός που αποτελούνταν από περισσότερα από ένα τμήματα και αποτελούσε το επόμενο εξελικτικό στάδιο μετά τους σταθμούς του προγράμματος Σαλιούτ. Χρησιμοποιήθηκε σαν τροχιακή πλατφόρμα για την διεξαγωγή πειραμάτων βιολογίας, φυσικής, αστρονομίας, μετεωρολογίας και φυσιολογίας. Επίσης, απετέλεσε πλατφόρμα μελέτης και ανάπτυξης μεθόδων και τεχνολογιών που είναι απαραίτητες για την διεξαγωγή επανδρωμένων διαστημικών αποστολών μακράς διάρκειας. Οι τεχνολογίες που αναπτύχθηκαν κατά τη διάρκεια του προγράμματος Μιρ ήταν πολύ σημαντικές για την κατασκευή του Διεθνούς Διαστημικού Σταθμού. Συνολικά επισκέφθηκαν τον σταθμό πληρώματα από 12 διαφορετικές χώρες, με τη συντριπτική πλειοψηφία αυτών να προέρχεται από την ΕΣΣΔ και μετέπειτα από τη Ρωσική Ομοσπονδία. Επίσης συμμετείχαν αστροναύτες/κοσμοναύτες προερχόμενοι από τις χώρες του Συμφώνου της Βαρσοβίας και της Ευρώπης γενικότερα, τις ΗΠΑ και την Ιαπωνία. Ο αστροναύτης Βαλερί Πολιακόφ είναι ο άνθρωπος που έχει μείνει τις πιο πολλές συνεχόμενες μέρες στο διάστημα. Τη διετία 1994-1995 έμεινε στον Μιρ για 437 μέρες. Η καταστροφή του Μιρ έγινε στις 23 Μαρτίου 2001, όταν και μπήκε στην ατμόσφαιρα. Τα κομμάτια του έπεσαν κοντά στα νησιά Φίτζι στον Ειρηνικό ωκεανό. Ο 120 τόνων διαστημικός σταθμός καταστράφηκε μετά από 15 χρόνια, παρόλο που είχε κατασκευαστεί για να μείνει 5 με 6 χρόνια.



**Σχήμα 21: MIR-Space Shuttle σε τροχιά. Ο κοσμοναύτης Onufrienko στον MIR. Ο κοσμοναύτης Polyakov στον MIR**

1998: Διεθνής Διαστημικός Σταθμός 'ISS'

Ο Διεθνής Διαστημικός Σταθμός (ΔΔΣ) είναι ένας ερευνητικός διαστημικός σταθμός σε τροχιά 400 χλμ γύρω από τη Γη. Η συναρμολόγησή του ξεκίνησε τον Νοέμβριο του 1998 ενώ το πρώτο του πλήρωμα εγκαταστάθηκε τον Νοεμβρίου του 2000. Ο ΔΔΣ αποτελεί κοινό πρόγραμμα μεταξύ των διαστημικών οργανισμών NASA των ΗΠΑ, Roscosmos (Ρωσίας), JAXA Ιαπωνίας, CSA (Καναδά) και ΕΟΔ (Ευρώπης). Ο ΔΔΣ αποτελείται από πολλαπλά διαμερίσματα (modules) που έχουν διαθέσει η NASA, Roscosmos, ESA, JAXA και αποτελεί την μεγαλύτερη και πιο πολύπλοκη κατασκευή που έχει θέσει η ανθρωπότητα σε τροχιά με όγκο 837 m<sup>3</sup>, μάζα 450 τόνους και διαστάσεις 51 μέτρα (μήκος) με 109 μέτρα (πλάτος). Ο ΔΔΣ κατοικείται συνεχώς από τότε που το πρώτο πλήρωμα μπήκε στον σταθμό στις 2 Νοεμβρίου 2000, παρέχοντας έτσι συνεχή ανθρώπινη παρουσία στο διάστημα. Ο ISS εξυπηρετείται κυρίως από τα ρωσικά διαστημόπλοια *Soyuz* και *Progress*, μέχρι το 2013 από τα αμερικανικά διαστημικά λεωφορεία, από το Ευρωπαϊκό μεταφορικό σκάφος ATV και τα τελευταία χρόνια (2012) από ιδιωτικά οχήματα της SpaceX (*Dragon*), *Cygnus* (*Northrup Grumman*) που κατασκευάστηκαν με χρηματοδότηση της NASA. Ο σταθμός πάντως έχει δεχτεί συνολικά 186 αστροναύτες από 15 χώρες. Ήταν επίσης ο προορισμός των επτά πρώτων τουριστών του διαστήματος. Ο ΔΔΣ χρησιμοποιείται ως ερευνητικό εργαστήριο μικροβαρύτητας και βιολογίας σε περιβάλλον έλλειψης βαρύτητας. Τα μέλη των πληρωμάτων του ΔΔΣ εκτελούν πειράματα στον τομέα της βιολογίας, της ανθρώπινης βιολογίας, της φυσικής, αστρονομίας, μετεωρολογίας, ιατρικής κ.α. Ο σταθμός είναι επίσης κατάλληλος για τον έλεγχο διαστημικών συστημάτων και εξοπλισμού που απαιτείται για μελλοντικές αποστολές στη Σελήνη και τον Άρη. Ο ΔΔΣ είναι αναμφισβήτητα η πιο δαπανηρή ανθρώπινη κατασκευή που κατασκευάστηκε ποτέ, με κόστος περί τα 120 δισεκατομμύρια ευρώ<sup>1</sup>. Η ύπαρξη και η λειτουργία του είναι αποτέλεσμα μιας από τις πιο σημαντικές διεθνείς συνεργασίες στη σύγχρονη ιστορία.

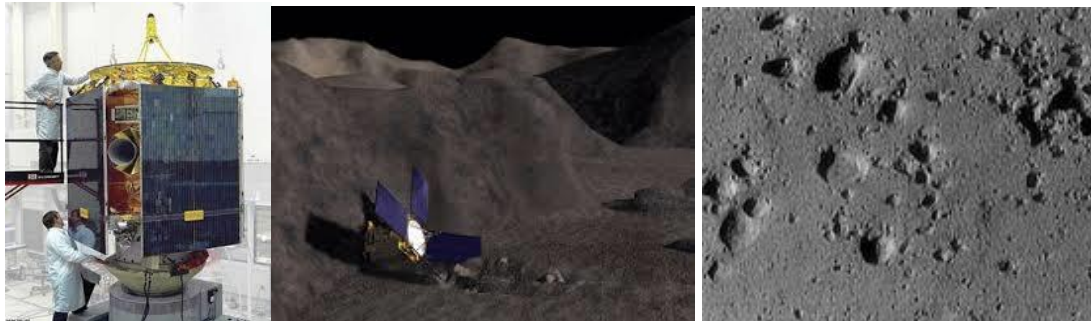


**Σχήμα 22: Ο Διεθνής Διαστημικός Σταθμός (ΔΔΣ) – International Space Station**

2000: NEAR Shoemaker

Η πρώτη αποστολή ειδικά για τη μελέτη αστεροειδών ήταν η αμερικανική NEAR-Shoemaker, που σχεδιάστηκε από το πανεπιστήμιο John Hopkins (JHU) και εκτοξεύτηκε το 1996 με επιστημονικό υπεύθυνο (principal investigator) τον Έλληνα αστροφυσικό καθ. Σ. Κριμιζή. Το 1997 φωτογράφησε τον αστεροειδή "Μαθίλδη" και το 2000 μπήκε σε τροχιά γύρω από τον αστεροειδή Έρως, στην επιφάνεια του οποίου έπεσε το 2001. Το διαστημόπλοιο NEAR Shoemaker εξερεύνησε τον αστεροειδή Έρως. Αυτή η συσκευή μπήκε σε τροχιά γύρω από αυτόν, τράβηξε φωτογραφίες της επιφάνειάς του και τις 21 Φεβρουαρίου 2001, στο τέλος της αποστολής του, προσεδάφιστηκε στην επιφάνεια του αστεροειδή χρησιμοποιώντας τους κινητήρες για τις μανούβρες. Το NEAR-Shoemaker προσεδάφιστηκε με επιτυχία και μια ώρα αργότερα το σήμα του εγκλωβίστηκε από τις κεραιές του Δικτύου Βαθέως Διαστήματος (Deep Space Network) της NASA. Στη συνέχεια συνέχισε σε διάφορες εδαφολογικές

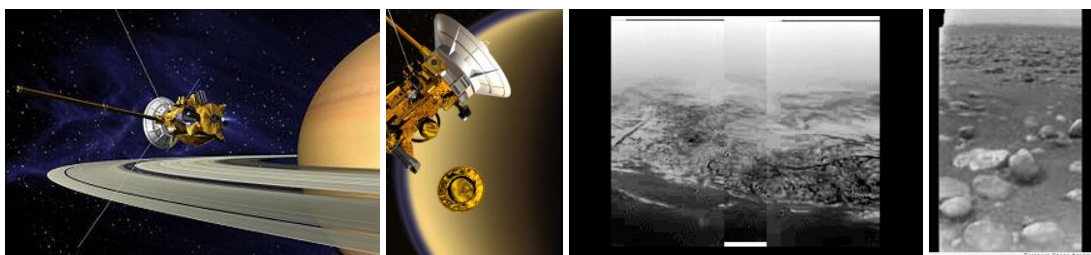
παρατηρήσεις, στέλνοντας τα δεδομένα στη Γη. Η αποστολή NEAR ήταν η πρώτη του προγράμματος Discovery της NASA που είχε στόχο την σχεδίαση και κατασκευή διαστημικών οχημάτων εξερεύνησης χρησιμοποιώντας καινοτόμες τεχνολογίες, σε λιγότερο από 3 χρόνια, με προϋπολογισμό λιγότερο των 150 εκατ. δολαρίων ΗΠΑ και ήταν η πρώτη και μοναδική αποστολή όπου ο κατασκευαστής παρέδωσε το διαστημικό όχημα με πλεόνασμα χρημάτων (38 εκατ. δολ. ΗΠΑ) τα οποία και επεστράφησαν στην NASA!



**Σχήμα 23: Το διαστημόπλοιο NEAR Shoemaker, το σχέδιο προσεδάφισης στον αστεροειδή Eros, εικόνα από το διαστημόπλοιο κατά την διαδικασία της προσεδάφισης**

2004: Cassini-Huygens

Το Κασσίνι-Χόιχενς (Cassini-Huygens) ήταν μια κοινή αποστολή ρομποτικού διαστημικού οχήματος από τη NASA, την ESA και την ιταλική ASI για την μελέτη του Κρόνου και των φυσικών δορυφόρων του. Το διαστημόπλοιο αποτελούνταν από δύο βασικά στοιχεία: το σχεδιασμένο και κατασκευασμένο από την NASA *Cassini Orbiter*, που ονομάστηκε έτσι για να τιμηθεί ο Ιταλο-Γαλλικής εθνικότητας αστρονόμος Τζιοβάνι Ντομένικο Κασίνι (Giovanni Domenico Cassini), καθώς και το συνοδευτικό σκάφος που ήταν σχεδιασμένο από την ΕΣΑ με το όνομα *Huygens* που όφειλε το όνομά του στον Ολλανδό αστρονόμο, μαθηματικό και φυσικό Κρίστιαν Χόιχενς (Christiaan Huygens). Το Κασσίνι ήταν το πρώτο διαστημόπλοιο που τέθηκε σε τροχιά γύρω από τον πλανήτη Κρόνο και το τέταρτο που επισκέφθηκε τον Κρόνο. Το Κασσίνι ξεκίνησε στις 15 Οκτωβρίου 1997 και, μετά από ένα μακρύ διαπλανητικό ταξίδι, τέθηκε σε τροχιά γύρω από τον Κρόνο την 1η Ιουλίου 2004. Στις 25 Δεκεμβρίου 2004, περίπου στις 02:00 UTC, το Χόιχενς αποχωρίστηκε από το κυρίως σώμα του Κασσίνι και στη συνέχεια, έφθασε στο δορυφόρο του Κρόνου, Τιτάνα στις 14 Ιανουαρίου 2005, όπου εισχώρησε στην ατμόσφαιρα του Τιτάνα, και προσεδάφιστηκε στέλνοντας πληροφορίες πίσω στη Γη.



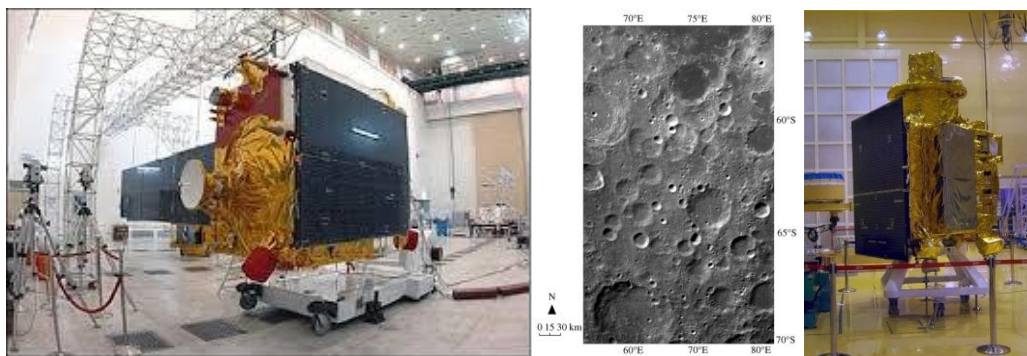
**Σχήμα 24: Η Αποστολή Cassini-Huygens (Αριστερά) Εικόνες από το Huygens από την Ατμόσφαιρα του Τιτάνα**

2007/2008: Αποστολές στη Σελήνη Chang'e (Κίνα) και Chandrayaan-1 (Ινδία)

Το Chang'e 1, ένα τηλεκατευθυνόμενο διαστημόπλοιο που μπήκε σε τροχιά γύρω από την Σελήνη, είναι μέρος της πρώτης φάσης του κινεζικού προγράμματος εξερεύνησης της σελήνης. Το διαστημικό σκάφος πήρε το όνομά του από την ομώνυμη κινέζικη θεά του φεγγαριού, την Chang'e. Σύμφωνα με το πρόγραμμα, το λεπτομερές σχέδιο του πρώτου κατά μέρους στόχου ολοκληρώθηκε τον Σεπτέμβριο του 2004. Η μελέτη έρευνας και κατασκευής

ενός δοκιμαστικού πρωτότυπου καθώς και τα σχετικά δοκιμαστικά είχαν ολοκληρωθεί πριν από το τέλος του 2005. Ακολούθησαν ο επιμελής σχεδιασμός, η κατασκευή και συναρμολόγηση του διαστημοπλοίου, καθώς και διάφορα πειράματα στο έδαφος της γης που ολοκληρώθηκαν πριν από τον Δεκέμβριο του 2006. Το Chang'e 1 εκτοξεύτηκε στις 24 Οκτωβρίου 2007, ώρα 10:05 GMT από το διαστημικό κέντρο Xichang. Πέρασε από τη σεληνιακή τροχιά μεταφοράς στις 31 Οκτωβρίου και μπήκε στην τροχιά γύρω από τη σελήνη στις 5 Νοεμβρίου. Οι πρώτες εικόνες της σελήνης αναμεταδόθηκαν στις 26 Νοεμβρίου 2007. Η αποστολή πρόκειται να διαρκέσει ένα έτος.

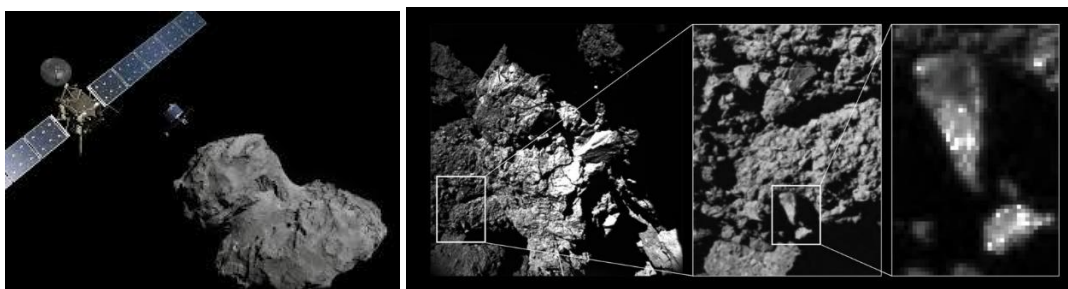
Η Ινδία το 2008 πραγματοποίησε μια απόλυτα επιτυχημένη εκτόξευση μη επανδρωμένου διαστημοπλοίου το οποίο τέθηκε σε τροχιά γύρω από τη Σελήνη προκειμένου να ανιχνεύσει νερό ή πολύτιμα μέταλλα. Η εκτόξευση αποτελεί απόδειξη της επιστημονικής επάρκειας και της τεχνολογίας των Ινδών ως εχέγγυων στη διεκδίκηση μεγαλύτερου κομματιού της παγκόσμιας οικονομικής δραστηριότητας όσον αφορά το Διάστημα. Το μη επανδρωμένο διαστημόπλοιο, το «Chandrayaan-1» («Σεληνάκατος 1», στα ινδικά) στοίχισε 56 εκατ. ευρώ, έχει βάρος 1,3 τόνο και θα περιφέρεται γύρω από τη Σελήνη για δύο χρόνια. Αργότερα αποσπάρθηκε από αυτό μια ειδική συσκευή, το Moon Impactor Probe, το οποίο προσεδάφιστηκε με σκοπό να δημιουργήσει νέφος σεληνιακής σκόνης, το οποίο θα αναλυθεί από τα μηχανήματα της σεληνακάτου, όπως εξήγησαν οι ινδοί επιστήμονες.



**Σχήμα 25: Το Διαστημόπλοιο Chandrayaan-1**

#### 2014 Αποστολή Rosetta σε Κομήτες

Η αποστολή Rosetta της ESA έχει σκοπό τη μελέτη του κομήτη 67P/Τσουριούμοφ-Γκερασιμένκο. Αποτελείται από δύο στοιχεία, τη ρομποτική διαστημική συσκευή Ροζέττα και τη συσκευή προσεδάφισης Φίλαι. Η Ροζέττα αποτελεί το πρώτο σκάφος που τέθηκε σε τροχιά γύρω από κομήτη. Θα τον ακολουθήσει στην πορεία του γύρω από τον Ήλιο και θα πραγματοποιήσει τη λεπτομερέστερη μελέτη κομήτη που έχει γίνει μέχρι σήμερα από το διάστημα. Η αποστολή ενδέχεται να αποφέρει σημαντικά δεδομένα για την προέλευση και την ιστορία του ηλιακού μας συστήματος, ενώ για να υλοποιηθεί συνεργάστηκαν όλες οι χώρες-μέλη της Ε.Ε., καθώς και τρίτες χώρες. Η αρχική ιδέα για την αποστολή γεννήθηκε τη δεκαετία του 1980 και το χρονικό πλαίσιο της μελέτης, κατασκευής και εκτέλεσης της αποστολής καλύπτει σχεδόν τρεις δεκαετίες. Η Ροζέττα εκτοξεύτηκε στις 2 Μαρτίου 2004 από την διαστημική βάση της ESA στην Γαλλική Γουιάνα. Η αποστολή πέρασε επιτυχημένα κοντά από δύο αστεροειδείς, τον 2867 Στέινς τον Σεπτέμβριο του 2008 και τον 21 Λουθησία τον Ιούλιο του 2010. Στις 6 Αυγούστου 2014, η Ροζέττα έφτασε στον κομήτη Τσουριούμοφ-Γκερασιμένκο και τέθηκε σε τροχιά γύρω από αυτόν. Στις 12 Νοεμβρίου, η αποστολή πέτυχε την πρώτη επιτυχημένη προσεδάφιση πάνω σε κομήτη, όταν το Φίλαι, μετά από κάθοδο περίπου επτά ωρών, επικάθισε ομαλά πάνω στην επιφάνεια του 67P.



**Σχήμα 26: Η Αποστολή Rosetta με το Διαστημικό Όχημα Φίλαι το οποίο προσεδαφίστηκε στον κομήτη Τσουριούμοφ-Γκερασιμένκο**

2015 Falcon 9, ο Πρώτος Επαναχρησιμοποιούμενος Εκτοξευτής

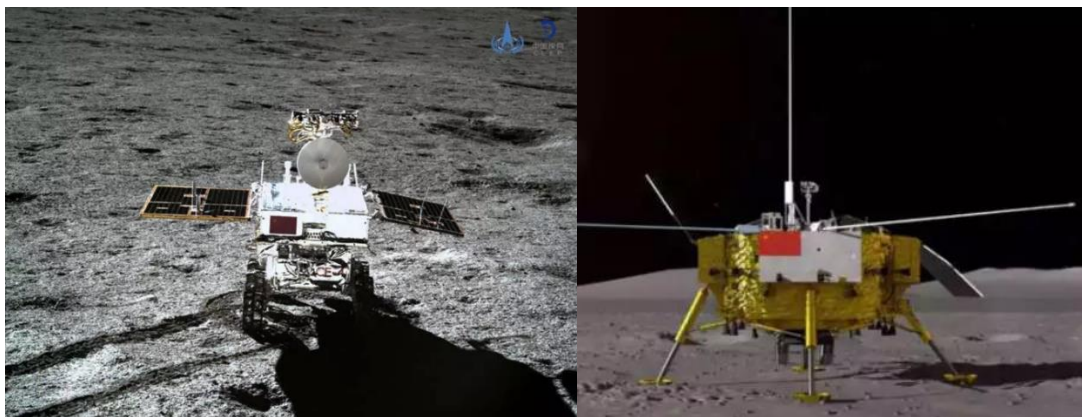
Η SpaceX έχει στο ενεργητικό της αρκετά σημαντικά επιτεύγματα: ήταν η πρώτη εταιρεία που βασιζόμενη σε ιδιωτική χρηματοδότηση έθεσε σε τροχιά πύραυλο υγρών καυσίμων (τον πύραυλο Falcon 1 το 2008), η πρώτη ιδιωτική εταιρεία που κατάφερε επιτυχημένα να εκτοξεύσει, να θέσει σε τροχιά και να ανακτήσει ένα διαστημικό σκάφος (το Dragon το 2010) και η πρώτη ιδιωτική εταιρεία που έστειλε διαστημικό σκάφος στον Διεθνή Διαστημικό Σταθμό (το Dragon το 2012). Επίσης, πέτυχε την πρώτη κάθετη προσγείωση πυραύλου που είχε χρησιμοποιηθεί για την αποστολή φορτίου σε τροχιά και την πρώτη επαναχρησιμοποίηση πυραύλου που είχε αποστείλει φορτίο σε τροχιά (με τον Falcon 9 το 2015 και το 2017 αντίστοιχα), ενώ έγινε και η πρώτη ιδιωτική εταιρεία που εκτόξευσε φορτίο σε τροχιά γύρω από τον Ήλιο (με τον πύραυλο Falcon Heavy το 2018). Η SpaceX έχει πραγματοποιήσει 14 αποστολές ανεφοδιασμού προς τον Διεθνή Διαστημικό Σταθμό, στα πλαίσια σχετικής συμφωνίας συνεργασίας που έχει συνάψει με τη NASA.



**Σχήμα 27: Προσγείωση των προωθητών (booster) του Falcon 9 Heavy το 2018, Προσγείωση του προωθητή Falcon 9 στην τηλεκατευθυνόμενη πλατφόρμα 'Of Course I still love you' (2016)**

2018 Chang'e-4

Η αποστολή Chang'e-4 της Κίνας παρλάμβανε μια πλατφόρμα προσγείωσης και ένα ρομπότ/rover με το όνομα Yutu-2 στην άκρη της Σελήνης - η πρώτη αποστολή εκεί από οποιαδήποτε χώρα. Ο Chang'e-4 προσγειώθηκε στον κρατήρα Von Kármán, στη λεκάνη του Νότιου Πόλου-Aitken της Σελήνης, το Δεκέμβριο του 2018. Μια αρχαία σεληνιακή επίδραση εκεί ενδέχεται να έχει εκθέσει τον μανδύα της Σελήνης. Μελετώντας απευθείας αυτήν την περιοχή, οι επιστήμονες θα μάθουν περισσότερα για το πρώιμο ηλιακό σύστημα και τη Γη. Η αποστολή δείχνει επίσης τη σκοπιμότητα μελλοντικών ανθρώπινων και ρομποτικών απομακρυσμένων αποστολών. Τα Chang'e-4 και Yutu-2 συνεχίζουν να διεξάγουν επιστημονικές επιχειρήσεις. Και τα δύο οχήματα απενεργοποιούνται κατά τη σεληνιακή βραδιά των 2 εβδομάδων, όταν οι θερμοκρασίες πέφτουν στους -173 βαθμούς Κελσίου, για να αποφευχθεί η καταστροφή των οργάνων τους. Πρέπει επίσης να απενεργοποιούνται όταν ο Ήλιος είναι άμεσα πάνω από αυτά για να αποφύγουν την υπερθέρμανση.



**Σχήμα 28: Το ρομπότ Yutu-2 όπως φαίνεται από το Chang'e-4 (Αριστερά) Εικόνα του Διαστημοπλοίου Chang'e-4**

2018 NewSpace, Ιδιωτική Πρωτοβουλία στο Διάστημα

Η ανάπτυξη νέων τεχνολογιών στους τομείς των υλικών, μικροηλεκτρονικής, παραγωγής (3D printing) σε συνδυασμό με την παγκοσμιοποίηση, την έντονη πλέον ανάπτυξη νεοφυών εταιρειών και ιδεών, έχει οδηγήσει στην δημιουργία ενός νέου οικοσυστήματος, μίας νέας φιλοσοφίας ανάπτυξης νέων διαστημικών τεχνολογιών και εφαρμογών βασιζόμενα στην ιδιωτική πρωτοβουλία. Το 'NewSpace' αντιπροσωπεύει την ιδιωτική πρωτοβουλία όπου ιδιωτικές εταιρείες, όχι πάντα σχετικές με το διάστημα, νεοφυείς εταιρείες αναπτύσσουν νέες τεχνολογίες και διαστημικές εφαρμογές ξέχωρα και ανεξάρτητα από τους παραδοσιακούς 'παίχτες' της διαστημικής κοινότητας, όπως δημόσιους οργανισμούς ή προγράμματα χρηματοδοτούμενα από δημόσιους οργανισμούς, με στόχο την ταχύτερη πρόσβαση στο διάστημα, την ταχύτερη ανάπτυξη οικονομικά βιώσιμων προϊόντων. Υπάρχουν ήδη σημαντικά παραδείγματα επιτυχιών του ρεύματος 'NewSpace' όπου μικρές εταιρείες όπως η SpaceX, OneWeb έχουν γίνει πραγματικοί κολοσσοί στην βιομηχανία της διαστημικής έχοντας αναπτύξει νέους οικονομικούς, επαναχρησιμοποιούμενους διαστημικούς εκτοξευτές, συστοιχίες τηλεπικοινωνιακών δορυφόρων για την χαμηλού κόστους παροχή ιντερνετ (Starlink). Παράλληλα νέοι μη παραδοσιακοί επενδυτές από άλλους τομείς όπως ο Jeff Bezos της Amazon, επενδύουν στο διάστημα μεγάλα ποσά (Blue Origin) χρησιμοποιώντας κεφάλαια αλλά και την επενδυτική νοοτροπία της Silicon Valley.

2019 Αποστολές στην Σελήνη (Κίνα, Ισραήλ)

Το Chandrayaan-2/Τσαντραγιάν-2 είναι η δεύτερη ινδική αποστολή εξερεύνησης της Σελήνης, μετά το Τσαντραγιάν-1. Αναπτύχθηκε από τον Ινδικό Οργανισμό Εξερεύνησης του Διαστήματος και εκτοξεύτηκε στις 22 Ιουλίου 2019, από το διαστημικό κέντρο Σατίς Νταβάν με προορισμό τη Σελήνη. Η σχεδιασμένη τροχιά έχει απόγειο 170 χλμ. και απόγειο 45.475 χλμ. Το σύστημα περιλαμβάνει τροχιακό μηχανισμό, ένα όχημα προσεδάφισης και ένα ρόβερ με το όνομα Πραγκιάν, ενώ τα υποσυστήματα του Τσαντραγιάν κατασκευάστηκαν εξολοκλήρου στην Ινδία. Ο κύριος στόχος του Τσαντραγιάν είναι να μελετήσει την ύπαρξη νερού στην σελήνη. εκτοξεύτηκε στις 14:43 ώρα Ινδίας στις, από το διαστημικό κέντρο Σατίς Νταβάν στην Σριχαρικότα της επαρχίας Νελόρ του κρατιδίου Άντρα Πραντές. Δυστυχώς το διαστημόπλοιο απέτυχε στην διαδικασία της προσγείωσης και καταστράφηκε.



**Σχήμα 29: Τα Οχήματα Προσεδάφησης Chandrayaan-2 (Αεριστέρα) και Beresheet (Δεξιά)**

Το 2019, το Ισραήλ έγινε η έβδομη χώρα στην ιστορία που έθεσε σε τροχιά μια διαστημοσυσκευή γύρω από το φεγγάρι. Το μικρό ρομποτικό ισραηλινό σκάφος Beresheet (Γένεσις), που είχε εκτοξευθεί στις 21 Φεβρουαρίου, εισήλθε σε ελλειπτική τροχιά γύρω από τη Σελήνη με στόχο να προσσεληνωθεί. Η τροχιά του θα το φέρει πλέον για λίγες μέρες να κινείται σε απόσταση 500 έως 10.000 χιλιομέτρων από το φεγγάρι. Είναι το πρώτο κρίσιμο βήμα, προκειμένου στις 11 Απριλίου, το σκάφος, ύψους ενάμισι μέτρου, να επιχειρήσει αυτόνομη προσσεληνώση - κάτι που θα καταστήσει το Ισραήλ την τέταρτη χώρα που θα έχει «πατήσει» στο φεγγάρι, μετά τις ΗΠΑ, την ΕΣΣΔ-Ρωσία και την Κίνα. Το βάρος 585 κιλών και κόστους 100 εκατομμυρίων δολαρίων Beresheet, αναπτύχθηκε με την υποστήριξη της ιδιωτικής επιχειρηματικής πρωτοβουλίας από τον μη κερδοσκοπικό οργανισμό SpaceIL και από την κρατική ισραηλινή αεροδιαστημική εταιρεία Israel Aerospace Industries. Δυστηχώς, το Beresheet καταστράφηκε κατά την διαδικασία της προσγείωσης. Η αποτυχία του *Beresheet* να φτάσει στη Σελήνη αποδίδεται πιθανόν σε δυσλειτουργία της κύριας μηχανής του (βρετανικής κατασκευής) κατά τη στιγμή της καθόδου στο φεγγάρι. Το αποτέλεσμα ήταν το σκάφος να μην κόψει ταχύτητα. Παρά την αποτυχία να ολοκληρώσει την αποστολή του με επιτυχία, το διαστημικό σκάφος Beresheet έγραψε -ούτως ή άλλως- ιστορία αφού είναι η πρώτη ιδιωτική διαστημοσυσκευή που έφτασε ως το φεγγάρι. Ακόμη, με τη συγκεκριμένη αποστολή, το Ισραήλ έγινε η έβδομη χώρα που έθεσε μια διαστημοσυσκευή σε τροχιά γύρω από τη Σελήνη. Ο Ελληνο-αμερικανός επιχειρηματίας Πίτερ Διαμαντής, ιδρυτής του Ιδρύματος X Prize, ανακοίνωσε ότι η ισραηλινή Space IL που συμμετείχε στον διαγωνισμό X-Prize, θα λάβει το βραβείο του ενός εκατομμυρίου δολαρίων, προκειμένου να συνεχίσει τις προσπάθειες της παρά την αποτυχημένη πρώτη αποστολή.

#### 2020 Διαδίκτυο από το Διάστημα - Starlink

Το Starlink είναι ένα σύστημα δορυφόρων που κατασκευάζεται από την SpaceX για την παροχή δορυφορικού διαδικτύου. Το σύστημα θα αποτελείται από χιλιάδες μικρούς δορυφόρους σε χαμηλή γήινη τροχιά (LEO), σε συνδυασμό με πομποδέκτες εδάφους. Το συνολικό κόστος του δεκαετούς έργου για το σχεδιασμό, την κατασκευή και την ανάπτυξη του Starlink από την SpaceX τον Μάιο του 2018 εκτιμήθηκε περίπου στα 10 δις \$. Η ανάπτυξη του προγράμματος ξεκίνησε το 2015, με τους δύο πρώτους δοκιμαστικούς δορυφόρους να μπαίνουν σε τροχιά τον Φεβρουάριο του 2018. Ένα δεύτερο ζευγάρι δοκιμαστικών δορυφόρων και η πρώτη μαζική εκτόξευση δορυφόρων πραγματοποιήθηκε τον Μάιο του 2019 όταν οι πρώτοι 60 λειτουργικοί δορυφόροι μπήκαν σε τροχιά. Από το 2020, η SpaceX εκτοξεύει 60 δορυφόρους ανά φορά, με στόχο την ανάπτυξη των 1.584 δορυφόρων για την παροχή διαδικτύου παγκόσμιος έως τα τέλη του 2021- 2022. Η SpaceX θα παρέχει ένα δοκιμαστικές υπηρεσίες σε χρήστες που κατοικούν στους βόρειες Ηνωμένες Πολιτείες και τον Καναδά έως τον Αύγουστο του 2020. Τον Σεπτέμβριο του 2020 είχαν εκτοξευτεί 715 δορυφόροι.

## 2020 Οι Πρώτοι Αμερικανοί Πίσω στο Διάστημα από το 2011– Επανδρωμένη Κάψουλα Dragon

SpaceX Demo-2 ήταν μια δοκιμαστική πτήση του διαστημικού σκάφους Crew Dragon, που εκτοξεύθηκε στον Διεθνή Διαστημικό Σταθμό στις 30 Μαΐου 2020 στις 19:22:45 UTC. Το Demo-2 είναι η πρώτη επανδρωμένη αποστολή που εκτοξεύθηκε από τις Ηνωμένες Πολιτείες μετά την τελική αποστολή του Διαστημικού Λεωφορείου, STS-135, το 2011, στην οποία, πιλότος ήταν ο Douglas G. Hurley. Ο Hurley μαζί με τον Robert L. Behnken ήταν το πλήρωμα της αποστολής Crew Dragon Demo-2. Η πρώτη προσπάθεια εκτόξευσης στις 27 Μαΐου ακυρώθηκε λόγω κακοκαιρίας, που προκλήθηκε από τροπική καταιγίδα, 16 λεπτά και 53 δευτερόλεπτα πριν από την εκτόξευση. Η δεύτερη προσπάθεια εκτοξεύθηκε επιτυχώς στις 30 Μαΐου 2020 στις 19:22:45 UTC. Η κάψουλα Dragon με τους αστροναύτες προσγειώθηκαν επιτυχώς στις 2 Αυγούστου 2020.



Σχήμα 30: Εικόνες από τη Αποστολή SpaceX Demo-2 στον ΔΔΣ/ISS

## Κεφάλαιο 2

### Διαστημικές Εφαρμογές

#### 2.0 Εφαρμογές του Διαστήματος

Η χρήση της αεροδιαστημικής/δορυφορικών μέσων/εφαρμογών είναι ζωτική ανάγκη και καθοριστικός παράγοντας της καθημερινότητας μας (παραδείγματα):

- Τηλεπικοινωνίες/δορυφορική τηλεόραση/internet
- Τηλεπαρατήρηση-συλλογή πληροφοριών
- Μετεωρολογία
- Πλοήγηση (πλοίων, αεροσκαφών κλπ)
- Εξερεύνηση του Διαστήματος/ρομποτική
- Έρευνα και Διάσωση
- Εθνική Ασφάλεια





**Σχήμα 31: Εφαρμογές της Αεροδιαστημικής**

Όπως έχουμε αναφέρει, το Διάστημα αποτελεί αναπόσπαστο κομμάτι της ζωής μας και της καθημερινότητάς μας. Μέρα με την μέρα, η εξάρτηση μας από το Διάστημα για καθημερινές μας δραστηριότητες όπως οι επικοινωνίες, χρήση του διαδικτύου, τραπεζικές συναλλαγές, τηλεόραση, προβλέψεις του καιρού. Τίθεται λοιπόν το ερώτημα, τι θα γίνονταν αν όλοι οι δορυφόροι 'κλείνανε', δηλαδή σταματούσαν για κάποιο λόγο να λειτουργούν; Η απάντηση στο ερώτημα αυτό μελετήθηκε από τον Βρετανικό Τηλεοπτικό Οργανισμό BBC<sup>1</sup> και εν συντομία τα συμπεράσματα της μελέτης ήταν ότι θα πρόκυπταν οι εξής συνέπειες:

- Κλειστή τηλεόραση, ράδιο, περιορισμός/διακοπή ενημέρωσης
- Διακοπή ασφαλών επικοινωνιών (ΕΔ, Αστυνομία κλπ)
- Διακοπή/καθυστερήσεις στις μεταφορές, πιθανή κατάρρευση συστημάτων εναέριας κυκλοφορίας και γενικότερα στις εφαρμογές πλοήγησης
- Κατάρρευση δικτύων ασφάλειας, ηλεκτρισμού, άρδευσης, επικοινωνιών, χρηματοπιστωτικών συναλλαγών, συστημάτων ασφαλείας (λαμβάνουν μετρήσεις χρόνου/ώρας από το σύστημα GPS)
- Καθυστέρηση/διακοπή παγκόσμιου δικτύου Internet
- Κινητοποίηση μεγάλων δυνάμεων ασφάλειας

Στις επόμενες παραγράφους θα προσπαθήσουμε να περιγράψουμε, εν συντομία, τις κυριότερες εφαρμογές του Διαστήματος, πολλές από τις οποίες έχουν ιδιαίτερα σημαντικά οικονομικά, πολιτικά αλλά και κοινωνικά οφέλη και στις οποίες η Ευρώπη πρωταγωνιστεί.

### **2.1 Τηλεπαρατήρηση/Τηλεπισκόπηση**

Η παρατήρηση της γης είναι η συλλογή πληροφοριών σχετικά με τα φυσικά, χημικά και βιολογικά συστήματα του πλανήτη Γη μέσω τεχνολογιών τηλεπισκόπησης, που συνήθως

<sup>1</sup> <http://www.bbc.com/future/story/20130609-the-day-without-satellites>

περιλαμβάνουν δορυφόρους που μεταφέρουν συσκευές απεικόνισης. Η παρατήρηση της γης χρησιμοποιείται για την παρακολούθηση και αξιολόγηση της κατάστασης και των αλλαγών στο φυσικό και ανθρωπογενές περιβάλλον. Οι διαστημικές τεχνολογίες παρέχουν αξιόπιστα σύνολα δεδομένων επαναλαμβανόμενης κάλυψης, τα οποία σε συνδυασμό με την έρευνα και την ανάπτυξη κατάλληλων μεθόδων, παρέχουν ένα μοναδικό μέσο για τη συλλογή πληροφοριών σχετικά με τον πλανήτη. Τα παραδείγματα περιλαμβάνουν την παρακολούθηση της κατάστασης και της εξέλιξης του περιβάλλοντος μας, είτε πρόκειται για ξηρά, θάλασσα ή αέρα, και την ικανότητα γρήγορης εκτίμησης καταστάσεων κατά τη διάρκεια κρίσεων όπως ακραία καιρικά φαινόμενα ή σε περιόδους ανθρώπινης σύγκρουσης. Η τηλεπισκόπηση είναι η απόκτηση πληροφοριών σχετικά με ένα αντικείμενο ή ένα φαινόμενο χωρίς να κάνετε φυσική επαφή με το αντικείμενο και έτσι σε αντίθεση με την επιτόπια παρατήρηση, ειδικά τη Γη. Η τηλεπισκόπηση χρησιμοποιείται σε πολλούς τομείς, όπως η γεωγραφία, η έρευνα γης και οι περισσότεροι επιστημονικοί κλάδοι της Γης (για παράδειγμα, υδρολογία, οικολογία, μετεωρολογία, ωκεανογραφία, δασολογία, γεωλογία). Έχει επίσης στρατιωτικές, εμπορικές, οικονομικές, σχεδιαστικές και ανθρωπιστικές εφαρμογές.

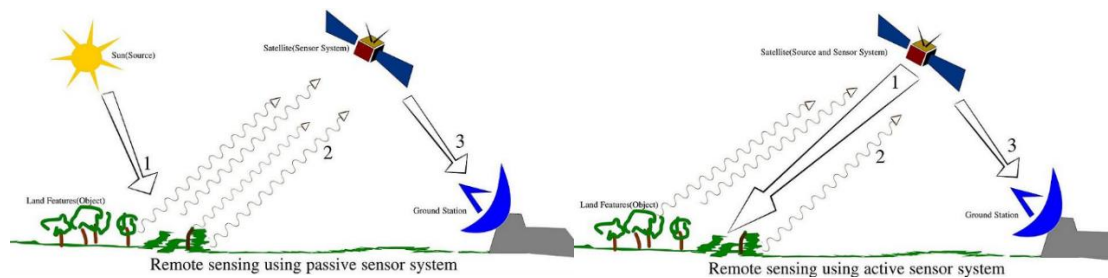


**Σχήμα 32: Πυρκαγιές στην Πελοπόννησο το 2007. Το καλοκαίρι του 2007 μια σειρά από δασικές πυρκαγιές σε πολλούς νομούς της Ελλάδας είχαν ως αποτέλεσμα να χάσουν τη ζωή τους 84 άνθρωποι και να καούν 1.500 σπίτια και περισσότερα από 268.834 εκτάρια (περ. 2.700km<sup>2</sup>) γης, 4,5 εκατομμύρια ελαιόδεντρα και 60.000 ζώα**

Στην τρέχουσα χρήση, ο όρος «τηλεπισκόπηση» αναφέρεται γενικά στη χρήση τεχνολογιών αισθητήρων μέσω δορυφόρου ή αεροσκάφους για τον εντοπισμό και την ταξινόμηση αντικειμένων στη Γη. Περιλαμβάνει την επιφάνεια και την ατμόσφαιρα και τους ωκεανούς, με βάση τα πολλαπλασιαζόμενα σήματα (π.χ. ηλεκτρομαγνητική ακτινοβολία). Μπορεί να χωριστεί σε "ενεργή" τηλεπισκόπηση (όταν εκπέμπεται σήμα από δορυφόρο ή αεροσκάφος στο αντικείμενο και ανιχνεύεται η αντανάκλασή του από τον αισθητήρα) και "παθητική" τηλεπισκόπηση (όταν η αντανάκλαση του ηλιακού φωτός ανιχνεύεται από τον αισθητήρα) .

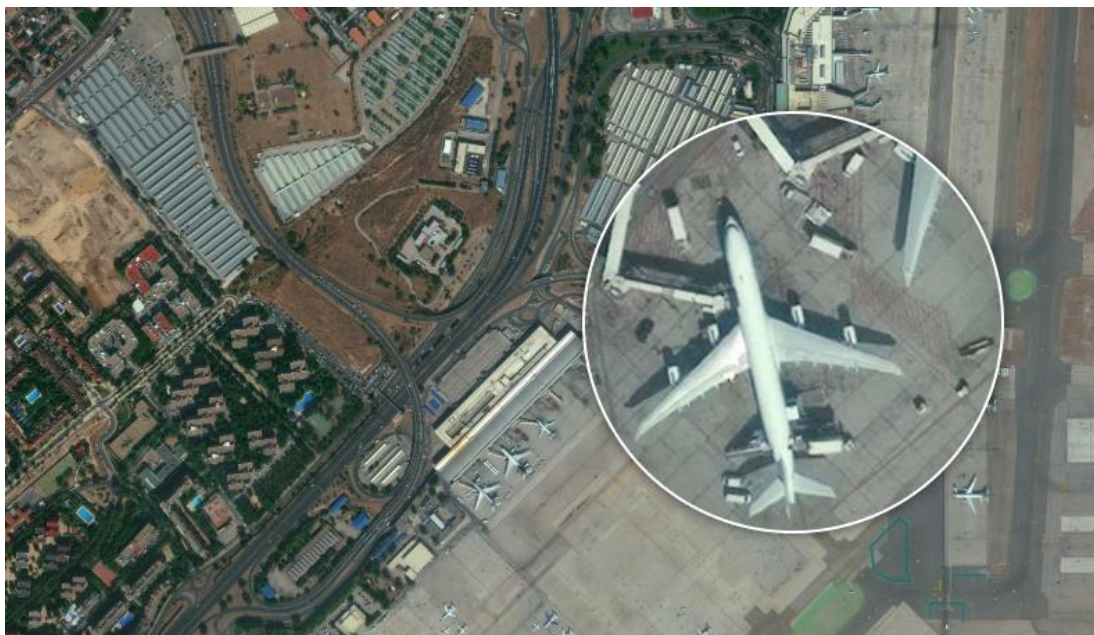
Οι παθητικοί αισθητήρες συλλέγουν ακτινοβολία που εκπέμπεται ή αντανακλάται από το αντικείμενο ή τις γύρω περιοχές. Το ανακλώμενο φως του ήλιου είναι η πιο κοινή πηγή ακτινοβολίας που μετράτε από παθητικούς αισθητήρες. Παραδείγματα παθητικών απομακρυσμένων αισθητήρων περιλαμβάνουν φωτογράφιση ταινιών, υπέρυθρες, συζευγμένες με φορτίο συσκευές και ραδιομετρητές. Η ενεργή συλλογή, από την άλλη πλευρά, εκπέμπει ενέργεια για τη σάρωση αντικειμένων και περιοχών, οπότε ένας αισθητήρας ανιχνεύει και μετρά την ακτινοβολία που αντανακλάται ή διασκορπίζεται από τον στόχο. Τα RADAR και LiDAR είναι παραδείγματα ενεργού τηλεπισκόπησης όπου μετράτε

η χρονική καθυστέρηση μεταξύ εκπομπής και επιστροφής, καθορίζοντας τη θέση, την ταχύτητα και την κατεύθυνση ενός αντικειμένου. Η τηλεπισκόπηση επιτρέπει τη συλλογή δεδομένων επικίνδυνων ή δυσπρόσιτων περιοχών. Οι εφαρμογές τηλεπισκόπησης περιλαμβάνουν παρακολούθηση της αποψίλωσης δασών σε περιοχές όπως η λεκάνη του Αμαζονίου, τα χαρακτηριστικά παγετώνων στις περιοχές της Αρκτικής και της Ανταρκτικής και ηχητική ακτινοβολία σε βάθος παράκτιων και ωκεανών. Στρατιωτική συλλογή κατά τη διάρκεια του Ψυχρού Πολέμου χρησιμοποίησε ανεξάρτητη συλλογή δεδομένων σχετικά με επικίνδυνες παραμεθόριες περιοχές. Η τηλεπισκόπηση αντικαθιστά επίσης την δαπανηρή και αργή συλλογή δεδομένων στο έδαφος, διασφαλίζοντας ότι κατά τη διαδικασία δεν ενοχλούνται περιοχές ή αντικείμενα. Οι τροχιακές πλατφόρμες συλλέγουν και μεταδίδουν δεδομένα από διαφορετικά μέρη του ηλεκτρομαγνητικού φάσματος, τα οποία, σε συνδυασμό με την ανίχνευση και την ανάλυση επίγειας ή επίγειας κλίμακας, παρέχουν στους ερευνητές αρκετές πληροφορίες για την παρακολούθηση καιρικών φαινομένων/τάσεων όπως το El Niño και άλλα φυσικά μακροπρόθεσμα και βραχυπρόθεσμα φαινόμενα. Άλλες χρήσεις περιλαμβάνουν διαφορετικές περιοχές των επιστημών της γης, όπως διαχείριση φυσικών πόρων, γεωργικές εφαρμογές όπως η έξυπνη χρήση και εκμετάλλευση της γης, ανίχνευση και παρακολούθηση πετρελαιοκηλίδων και εθνική ασφάλεια και γενικά, συλλογή πληροφοριών σε κρίσιμες περιοχές όπως οι παραμεθόριες περιοχές/σύνορα



**Σχήμα 33: Απεικόνιση Τηλεπισκόπησης**

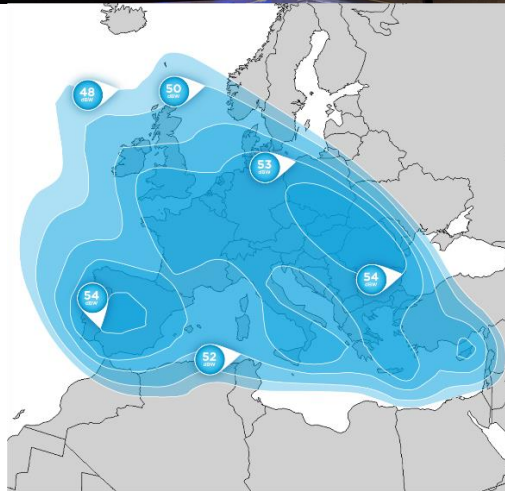
Στις στρατιωτικές εφαρμογές, η συλλογή πληροφοριών από τη δορυφορική παρατήρηση της Γης (εικόνες) συμβάλλουν στη λήψη απόφασης αλλά και χρησιμοποιούνται ως υπόβαθρο Γεωγραφικών Συστημάτων Πληροφοριών (πχ για εντοπισμό φίλιων και εχθρικών δυνάμεων, απεικόνιση απειλών, επιλογή συντομότερης οδού). Ιδιωτικοί/εμπορικοί δορυφόροι μπορούν να αποτυπώσουν αντικείμενα με μέγεθος ~20-30 cm με τους στρατιωτικούς δορυφόρους των ΗΠΑ να θεωρούνται ότι μπορούν να έχουν διακριτική ικανότητα μικρότερη των 8cm και με ικανότητα μετάδοσης δεδομένων για 5-10 λεπτά σε πραγματικό χρόνο πάνω από συγκεκριμένους στόχους.



**Σχήμα 34:** Δορυφορική εικόνα του δορυφόρου WorldView-3 από το Αεροδρόμιο της Μαδρίτης Barajas στην Ισπανία με διακριτική ικανότητα (χωρίς ηλεκτρονική επεξεργασία) στα 31 cm.

## 2.2 Δορυφορικές Επικοινωνίες

Η τεχνολογία των δορυφόρων έχει εξελιχθεί παρά πολύ κατά τη διάρκεια των τελευταίων 70 ετών, από τότε δηλαδή που την πρότεινε αρχικά ο Arthur C. Clarke. Σήμερα, τα δορυφορικά συστήματα μπορούν να παρέχουν ποικίλες υπηρεσίες, συμπεριλαμβανομένων των ευρυζωνικών επικοινωνιών, των ακουστικών/τηλεοπτικών δικτύων διανομής, της θαλάσσιας ναυσιπλοΐας, της παγκόσμιας εξυπηρέτησης και υποστήριξης πελατών, καθώς επίσης και των στρατιωτικών συστημάτων. Σήμερα, οι δορυφόροι χρησιμοποιούνται σε μια ευρεία γκάμα υπηρεσιών, όπως η εκπομπή τηλεοπτικού σήματος, οι τοπικές και διεθνείς κλήσεις, η μεταφορά δεδομένων και η πρόσβαση στο Διαδίκτυο. Η ανάπτυξη των δορυφορικών επικοινωνιών προσφέρει πλήθος νέων δυνατοτήτων και είναι σχεδόν σίγουρο ότι και στο προσεχές μέλλον οι δορυφόροι θα συνεχίσουν να κατέχουν εξέχοντα ρόλο στις τηλεπικοινωνίες. Χώρες, όπως ο Καναδάς, οι ΗΠΑ, η Σοβιετική Ένωση και η Ινδονησία κατάφεραν να δημιουργήσουν ένα επικερδές επικοινωνιακό σύστημα μέσω δορυφόρων γεωστατικής τροχιάς, πράγμα το οποίο ήταν μέχρι τότε αντικοινομικό. Από το 1970 και για τα επόμενα 20 χρόνια, τα δορυφορικά συστήματα επικοινωνιών με χρήση δορυφόρων γεωστατικής τροχιάς (GEO) αυξήθηκαν κατακόρυφα, παρόλο που ήδη είχαν αναπτυχθεί πλήρως οι τεχνολογίες των οπτικών ινών. Τα επόμενα χρόνια στις ΗΠΑ η επέκταση στράφηκε προς τη μετάδοση και διανομή βίντεο και την ανάπτυξη δικτύων τερματικών σταθμών πολύ μικρής επιφάνειας (Very Small Aperture Terminals, VSATs).



**Σχήμα 35:** Ο Hellas Sat 4 ή Saudigeosat-1 είναι δορυφόρος επικοινωνιών που ανήκει στην ελληνοκυπριακή εταιρείας δορυφορικών επικοινωνιών Hellas Sat που ανήκει στην Arabsat κατά 99%. Κατασκευάστηκε από την Lockheed Martin και εκτοξεύτηκε στις 05/02/2019 από το Κουρού της Γαλλικής Γουιάνας. Ο δορυφόρος θα παρέχει τις υπηρεσίες του από την τροχιακή θέση της Ελλάδας και της Κύπρου, 39 μοίρες ανατολικά. Είναι σχεδιασμένος έτσι ώστε να παρέχει τηλεπικοινωνιακές δυνατότητες, όπως τηλεόραση, διαδίκτυο, τηλεφωνία και ασφαλείς στρατιωτικές επικοινωνίες σε πελάτες στη Μέση Ανατολή, την Αφρική και την Ευρώπη

Τα τελευταία χρόνια οι δορυφόροι GEO αποτελούν την κύρια αιχμή στην ανάπτυξη των δορυφορικών επικοινωνιών. Λόγω των χαρακτηριστικών τους μπορούν να καλύψουν το 1/3 της επιφάνειας της Γης, ενώ με τις τεχνολογικές εξελίξεις στη δομή και τα λειτουργικά τους χαρακτηριστικά έχουν φτάσει τα 10.000 κιλά βάρος, παραγόμενη ισχύ στα 25kW και κεραιές με εκατοντάδες δέσμες. Η μετάδοση τηλεοπτικών προγραμμάτων και DBS-TV (Direct Broadcast Satellite Television) αποτελεί την κύρια πηγή εσόδων για τις εταιρίες παροχής δορυφορικών προϊόντων, παρέχοντας παραπάνω από τα μισά κέρδη στον τομέα αυτό. Η αυξημένη ισχύς εκπομπής και η χρήση κεραιών υψηλού κέρδους στους επίγειους σταθμούς εξασφαλίζει υψηλή χωρητικότητα για τα GEO συστήματα, η οποία μεταφράζεται σε οικονομικό όφελος. Σήμερα επικρατεί μία νέα τάση στις δορυφορικές επικοινωνίες καθώς η ανάπτυξη νέων τεχνικών μεταγωγής, κεραιών αλλά και η δυνατότητα εκτόξευσης μικροδορυφόρων σε τροχιά LEO (χαμηλή Γήινη τροχιά) έχει οδηγήσει στην ανάπτυξη των 'mega-constellations' δηλαδή συστοιχιών από εκατοντάδες μικροδορυφόρους (OneWeb, Kuiper, Starlink) για την δημιουργία δικτύων τηλεπικοινωνίας με μικρή χρονο-καθυστέρηση

(latency) σε σύγκριση με την γεωστατική τροχιά (GEO). Έτσι, με την ανάπτυξη, τεχνικών μεταγωγής και επεξεργασίας επί του δορυφόρου (on-board switching and processing), τη χρήση πολλαπλών δεσμών (multi-beams), τη χρήση υψηλότερων συχνοτήτων και άρα διαθέσιμου εύρους ζώνης, την αύξηση του ρυθμού μετάδοσης πληροφορίας και τη μείωση του μεγέθους των κινητών τερματικών και του κόστους των παρεχόμενων υπηρεσιών, τα δορυφορικά συστήματα κινητών υπηρεσιών έχουν βρει ευρεία εφαρμογή.



**Σχήμα 36:** Το Starlink είναι ένα σύστημα δορυφόρων που κατασκευάζεται από την SpaceX για την παροχή δορυφορικού διαδικτύου. Το σύστημα θα αποτελείται από 1584 δορυφόρους σε χαμηλή γήινη τροχιά (LEO), σε συνδυασμό με πομποδέκτες εδάφους.

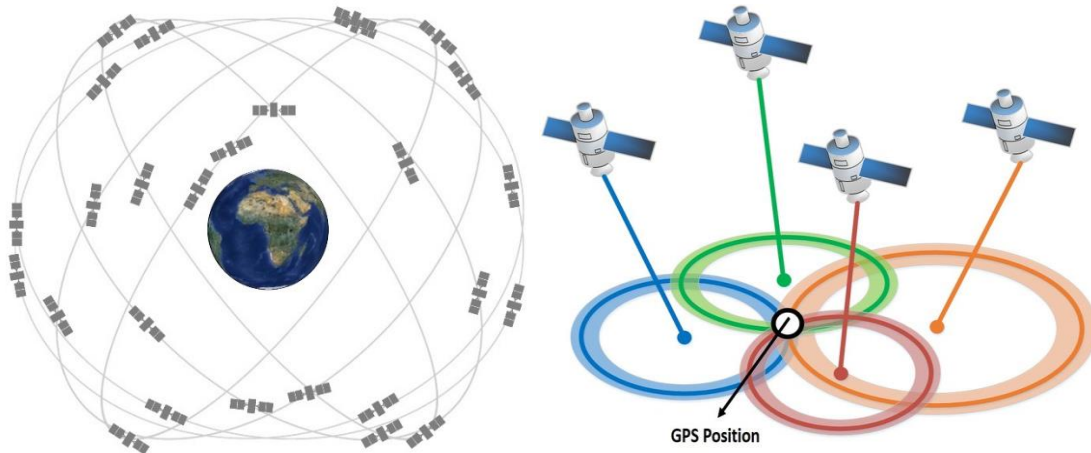
### 2.3 Πλοήγηση - Εντοπισμός Θέσης – Χρονισμός (Positioning, Navigation, Timing – PNT)

Η διαθεσιμότητα σε πραγματικό χρόνο του ακριβούς καθορισμού θέσης, της πλοήγησης με ακρίβεια καθώς και τα δεδομένα χρονισμού από δορυφορικά συστήματα είναι ζωτικής σημασίας για την αποτελεσματική διεξαγωγή των κάθε είδους λειτουργιών που απαιτούνται για τις μεταφορές, εμπορικές εφαρμογές πλοήγησης και για την αντιμετώπιση κρίσεων.

Την πρώτη εφαρμογή πλοήγησης το Applied Physics Laboratory του John Hopkins University, το 1959, με το στρατιωτικό σύστημα 'Transit Navigation System' το οποία μπορούσε να δίνει στα πλοία του Αμερικανικού πολεμικού ναυτικού τις συντεταγμένες τους οπουδήποτε στον ωκεανό, ανεξαρτήτως των καιρικών συνθηκών και το οποίο μετέπειτα το 1967 εφαρμόστηκε η χρήση του στον εμπορικό στόλο όλου του κόσμου. Το σύστημα 'Transit' αποτέλεσε τον πρόγονο των συστημάτων πλοήγησης που αναπτύχθηκαν το 1970-1980 (Global Positioning System – GPS, Αμερική), το 2015 και ύστερα με το Ευρωπαϊκό σμήνος Galileo (Ευρώπη) και το Κινεζικό Beidou.

Το GPS (Global Positioning System), Παγκόσμιο Σύστημα Στιγματοθέτησης, ή Θέσης είναι παγκόσμιο σύστημα εντοπισμού γεωγραφικής θέσης, ακίνητου ή κινούμενου χρήστη, το οποίο βασίζεται σε ένα "πλέγμα" 24 δορυφόρων γύρω από της Γη (στα 22000 km), εφοδιασμένων με ειδικές συσκευές εντοπισμού, οι οποίες ονομάζονται "πομποδέκτες GPS". Οι πομποδέκτες αυτοί παρέχουν ακριβείς πληροφορίες για τη θέση ενός σημείου, το υψόμετρό του, την ταχύτητα και την κατεύθυνση της κίνησης του. Επίσης, σε συνδυασμό με ειδικό λογισμικό χαρτογράφησης μπορούν να απεικονίσουν γραφικά τις πληροφορίες αυτές. Το σύστημα ξεκίνησε από το Υπουργείο Άμυνας των ΗΠΑ και ονομάστηκε NAVSTAR GPS (Navigation Signal Timing and Ranging Global Positioning System). Το δορυφορικό αυτό σύστημα ρυθμίζεται καθημερινά από τη Βάση Πολεμικής Αεροπορίας Στριβερ (Schriever) με κόστος 400 εκατομμύρια δολάρια το χρόνο. Ανάλογα με την ισχύ του σήματος που λάμβανε κάθε δέκτης από σταθμούς γνωστής γεωγραφικής θέσης, σχηματίζονταν δύο ή περισσότερες συντεταγμένες, μέσω των οποίων προσδιοριζόταν η θέση των σημείων ενδιαφέροντος επάνω σε ένα χάρτη. Στην περίπτωση αυτή, όμως, υπήρχαν δύο διαφορετικά προβλήματα: Στην πρώτη περίπτωση η χρήση σταθμών βάσης, που θα εξέπεμπαν σήμα σε υψηλή συχνότητα, διέθεταν μεν υψηλή ακρίβεια εντοπισμού, αλλά είχαν μικρή εμβέλεια. Στη

δεύτερη περίπτωση συνέβαινε το ακριβώς αντίθετο, δηλαδή ο σταθμός βάσης χρησιμοποιούσε μεν χαμηλή συχνότητα εκπομπής σήματος, προσφέροντας έτσι υψηλότερη εμβέλεια, αλλά και η ακρίβεια που παρείχε ήταν χαμηλή.



**Σχήμα 37: Τροχιές του δικτύου δορυφόρων GPS (Δεξιά) Αρχή λειτουργίας του GPS (προσδιορισμός GPS)**

Η αρχή της χρήσης ραδιοκυμάτων για τον εντοπισμό της θέσης ενός σημείου είχε ήδη γίνει, όπως είναι γνωστό στον 2<sup>ο</sup> Παγκόσμιο Πόλεμο με την ανακάλυψη και χρήση των RADAR. Το Global Positioning System στη σημερινή του μορφή βασίζεται σε παρεμφερή τεχνολογία. Συνδυάζει όλες τις μεθόδους που είχαν χρησιμοποιηθεί στον ουρανό, δηλαδή την τεχνολογία των ηλεκτρομαγνητικών κυμάτων καθώς και την παρατήρηση ενός –τεχνητού αυτή τη φορά– ουράνιου σώματος. Οι σταθμοί βάσης που λαμβάνουν και δέχονται τα απαραίτητα ηλεκτρομαγνητικά κύματα δεν είναι πλέον επίγειοι, αλλά εδρεύουν σε δορυφόρους. Ένα δίκτυο πολυάριθμων (24 - 32) δορυφόρων που βρίσκεται σε σταθερή θέση γύρω από τον πλανήτη μας, βοηθά τους δέκτες GPS να παραγάγουν το ακριβές στίγμα ενός σημείου οπουδήποτε στον κόσμο. Όταν, το 1957, πραγματοποιήθηκε η εκτόξευση του δορυφόρου Σπούτνικ, οι άνθρωποι είχαν ήδη αντιληφθεί ότι ένα τεχνητό ουράνιο σώμα κοντά στη Γη είναι δυνατό να χρησιμοποιηθεί για να εντοπιστεί η θέση ενός σημείου πάνω στον πλανήτη. Αμέσως μετά την εκτόξευσή του, ερευνητές διαπίστωσαν ότι το σήμα που λαμβανόταν από τον δορυφόρο αυξανόταν καθώς αυτός πλησίαζε προς το επίγειο σημείο παρατήρησης και μειωνόταν όταν ο δορυφόρος απομακρυνόταν από αυτό. Αυτό ήταν και το πρώτο βήμα για την υλοποίηση της τεχνολογίας που σήμερα αποκαλείται Global Positioning System. Με τον ίδιο τρόπο που η θέση ενός δορυφόρου μπορούσε να εντοπιστεί ανάλογα με την ισχύ του σήματος που λαμβάνεται από αυτόν, υπήρχε και η δυνατότητα να συμβεί το ακριβώς αντίθετο: Ο δορυφόρος να εντοπίσει την ενός σημείου θέση με ιδιαίτερη ακρίβεια. Στην πραγματικότητα ένας δορυφόρος δεν είναι αρκετός για να υπάρξουν ακριβή αποτελέσματα, αλλά απαιτούνται τουλάχιστον τρεις, όπως θα δούμε στη συνέχεια.

Το GPS αρχικά δημιουργήθηκε αποκλειστικά για στρατιωτική χρήση και ανήκε στη δικαιοδοσία του αμερικανικού Υπουργείου Εθνικής Άμυνας. Στα μέσα της δεκαετίας του 1960 το σύστημα δορυφορικής πλοήγησης, γνωστό τότε με την ονομασία Transit System, χρησιμοποιήθηκε ευρέως από το αμερικανικό ναυτικό το 1959 το οποίο ανέπτυξε το Applied Physics Laboratory του John Hopkins University. Απαιτήθηκαν αρκετές δεκαετίες, μέχρι δηλαδή τα μέσα της δεκαετίας του 1990, ώστε το σύστημα GPS να εξελιχθεί, να γίνει ιδιαίτερα ακριβές και να αρχίσει να διατίθεται για ελεύθερη χρήση από το ευρύ κοινό.

Το GALILEO είναι το ευρωπαϊκό πρόγραμμα ραδιοπλοήγησης και προσδιορισμού θέσης μέσω δορυφόρου. Δρομολογήθηκε από την Ευρωπαϊκή Επιτροπή και αναπτύχθηκε από κοινού με την Ευρωπαϊκή Υπηρεσία Διαστήματος με στόχο να προσφέρει στην Ευρωπαϊκή Ένωση (ΕΕ)

τεχνολογική ανεξαρτησία από το αμερικανικό σύστημα GPS και το ρωσικό GLONASS. Το Galileo είναι ένα παγκόσμιο δορυφορικό σύστημα πλοήγησης (GNSS) που κυκλοφόρησε το 2016 [5], το οποίο δημιουργήθηκε από την Ευρωπαϊκή Ένωση μέσω του Ευρωπαϊκού Οργανισμού Διαστήματος (ESA), το οποίο διαχειρίζεται ο Ευρωπαϊκός Οργανισμός GNSS (GSA), με έδρα στην Πράγα, Τσεχική Δημοκρατία, με δύο κέντρα επίγειων επιχειρήσεων στο Fucino της Ιταλίας και στο Oberpfaffenhofen, Γερμανία. Το έργο των 10 δισεκατομμυρίων ευρώ πήρε το όνομά του από τον Ιταλό αστρονόμο Galileo Galilei. Ένας από τους στόχους του Galileo είναι να παρέχει ένα ανεξάρτητο σύστημα εντοπισμού θέσης υψηλής ακρίβειας, ώστε τα ευρωπαϊκά έθνη να μην χρειάζεται να βασίζονται στο GPS των ΗΠΑ ή στα ρωσικά συστήματα GLONASS, τα οποία θα μπορούσαν να απενεργοποιηθούν ή να υποβαθμιστούν από τους χειριστές τους ανά πάσα στιγμή. Η χρήση βασικών (χαμηλότερης ακρίβειας) υπηρεσιών Galileo είναι δωρεάν και ανοιχτή σε όλους. Οι δυνατότητες υψηλότερης ακρίβειας είναι διαθέσιμες για εμπορικούς χρήστες – με κόστος χρήσης. Το Galileo προορίζεται να παρέχει οριζόντιες και κατακόρυφες μετρήσεις θέσης με ακρίβεια 1 μέτρου και καλύτερες υπηρεσίες τοποθέτησης σε υψηλότερα πλάτη από άλλα συστήματα προσδιορισμού θέσης. Το Galileo πρόκειται επίσης να παρέχει μια νέα παγκόσμια λειτουργία αναζήτησης και διάσωσης (SAR) ως μέρος του συστήματος MEOSAR. Το Galileo άρχισε να προσφέρει την Πρώιμη Λειτουργική Ικανότητα (EOC) στις 15 Δεκεμβρίου 2016, παρέχοντας αρχικές υπηρεσίες με ένα αδύναμο σήμα και έφτασε στην Πλήρη Λειτουργική Ικανότητα (FOC) το 2019. Το πλήρες σύστημα 30 δορυφορικών Galileo (24 λειτουργικά και 6 ενεργά ανταλλακτικά) αναμένεται έως το τέλος του 2020. Σε παρόμοια τροχιά με το Galileo και GPS, βρίσκονται το Ρωσικό σύστημα πλοήγησης GLONASS και το Κινεζικό Beidou.

#### 2.4 Έρευνα-Διάσωση

Η έρευνα-διάσωση από το Διάστημα είναι η εφαρμογή κατά την οποία είναι εφικτή η ταχύτερη διάσωση προσωπικού που βρίσκεται σε κίνδυνο κατά τη διάρκεια επιχειρήσεων ή εκτάκτων αναγκών (πχ εξοπλισμός μονάδων μέσων με δορυφορικά συστήματα (πομπούς/δέκτες). Το κύριο δίκτυο με πομπούς/δέκτες που χρησιμοποιείται βασίζεται στο Διεθνές Πρόγραμμα Cospas-Sarsat το οποίο είναι μια πρωτοβουλία αναζήτησης και διάσωσης μέσω δορυφόρου. Είναι ως ένας μη κερδοσκοπικός, διακυβερνητικός, ανθρωπιστικός συνεταιρισμός 45 εθνών και οργανισμών που βασίζονται σε συγκεκριμένες συνθήκες και πρωτόκολλα λειτουργίας. Είναι αφιερωμένο στην ανίχνευση και τον εντοπισμό ραδιοφάρων/πομπών που ενεργοποιούνται από άτομα, αεροσκάφη ή πλοία που βρίσκονται σε κίνδυνο, καθώς και τη διαβίβαση αυτών των πληροφοριών συναγερμού σε αρχές που μπορούν να αναλάβουν δράση για διάσωση. Το σύστημα χρησιμοποιεί ένα δίκτυο δορυφόρων που παρέχουν κάλυψη παντού στη Γη. Ανιχνεύονται ειδοποιήσεις κινδύνου, εντοπίζονται και προωθούνται σε περισσότερες από 200 χώρες και εδάφη, χωρίς κόστος στους ιδιοκτήτες αναγνωριστικών σημάτων ή στις κυβερνητικές υπηρεσίες που λαμβάνουν. Ο Cospas-Sarsat σχεδιάστηκε και ξεκίνησε από τον Καναδά, τη Γαλλία, τις Ηνωμένες Πολιτείες και την πρώην Σοβιετική Ένωση το 1979. Η πρώτη διάσωση που χρησιμοποιεί την τεχνολογία της Cospas-Sarsat πραγματοποιήθηκε τον Σεπτέμβριο του 1982. Η οριστική συμφωνία του οργανισμού υπογράφηκε την 1η Ιουλίου 1988.

Το Cospas-Sarsat είναι πιο γνωστό ως το σύστημα που ανιχνεύει και εντοπίζει φάρους έκτακτης ανάγκης που ενεργοποιούνται από αεροσκάφη, πλοία και άτομα που ασχολούνται με ψυχαγωγικές δραστηριότητες σε απομακρυσμένες περιοχές και, στη συνέχεια, στέλνει αυτές τις ειδοποιήσεις κινδύνου στις αρχές αναζήτησης και διάσωσης (Search and Rescue - SAR). Οι φάροι κινδύνου μπορούν να εντοπιστούν από το σύστημα Cospas-Sarsat (φάροι 406-MHz) διατίθενται από διάφορους κατασκευαστές και αλυσίδες πωλητών.





**Σχήμα 38: Αρχιτεκτονική Λειτουργίας του Συστήματος Cospas-Sarsat**

Μεταξύ Σεπτεμβρίου 1982 και Δεκεμβρίου 2019, το Σύστημα Cospas-Sarsat παρείχε βοήθεια στη διάσωση τουλάχιστον 51.429 ατόμων σε 15.523 συμβάντα SAR. Το 2017, 2018 και 2019 συμπεριλαμβάνεται η βοήθεια της Cospas-Sarsat σε ~2000-2700 πολίτες (έχουν διασωθεί).

Το σύστημα αποτελείται από ένα τμήμα εδάφους και ένα διαστημικό τμήμα που περιλαμβάνει:

- Ραδιοφάρων/πομπών για ενεργοποίηση σε περίπτωση απειλητικής για τη ζωή έκτακτης ανάγκης
- Επαναλήπτες σήματος SAR (SARR) και επεξεργαστές σήματος SAR (SARP) πάνω σε δορυφόρους
- Δορυφορικοί σταθμοί λήψης και επεξεργασίας σήματος επίγειοι σταθμοί που ονομάζονται LUT (τοπικά τερματικά χρηστών)
- Κέντρα ελέγχου αποστολής (MCC) που διανέμουν σε κέντρα συντονισμού διάσωσης δεδομένα συναγερμού κινδύνου (ιδίως δεδομένα θέσης φάρου) που παράγονται από τα LUT
- Κέντρα συντονισμού διάσωσης (RCC) που διευκολύνουν τον συντονισμό της υπηρεσίας SAR και της αντίδρασης του προσωπικού σε μια κατάσταση κινδύνου.

Ένας φάρος κινδύνου Cospas-Sarsat είναι ένας ψηφιακός πομπός ραδιοφώνου 406 MHz που μπορεί να ενεργοποιηθεί σε περίπτωση απειλητικής για τη ζωή έκτακτης ανάγκης για να καλέσει βοήθεια από κυβερνητικές αρχές. Οι πομποί ή αλλιώς 'beacons' κατασκευάζονται και πωλούνται από δεκάδες πωλητές. Κατατάσσονται σε τρεις κύριους τύπους. Ένας ραδιοφάρος 406 MHz σχεδιασμένος για χρήση σε αεροσκάφος είναι γνωστός ως πομπός εντοπισμού έκτακτης ανάγκης (ELT). Ο πομπός που έχει σχεδιαστεί για χρήση σε ένα θαλάσσιο σκάφος ονομάζεται ραδιοφάρος ένδειξης θέσης έκτακτης ανάγκης (EPIRB) και αυτό που έχει σχεδιαστεί για να μεταφέρεται από ένα άτομο είναι γνωστό ως προσωπικό αναγνωριστικό σήμα (PLB). Μερικές φορές τα PLB μεταφέρονται σε αεροσκάφη ή πλοία, αλλά αν αυτό πληροί τις απαιτήσεις ασφαλείας εξαρτάται από τους τοπικούς κανονισμούς. Ένας ραδιοφάρος Cospas-Sarsat 406-MHz δεν εκπέμπει έως ότου ενεργοποιηθεί σε περίπτωση έκτακτης ανάγκης (ή όταν ενεργοποιούνται ορισμένα χαρακτηριστικά δοκιμών

από τον χρήστη). Ορισμένοι ραδιοφάροι έχουν σχεδιαστεί για να ενεργοποιούνται χειροκίνητα από ένα άτομο που πατάει ένα κουμπί και κάποιοι άλλοι έχουν σχεδιαστεί για αυτόματη ενεργοποίηση σε ορισμένες περιπτώσεις (π.χ., τα ELT μπορεί να ενεργοποιούνται αυτόματα από ένα φυσικό σοκ, όπως σε περίπτωση σύγκρουσης και τα EPIRBs μπορεί να ενεργοποιούνται αυτόματα ενεργοποιείται με επαφή με νερό). Το διαστημικό τμήμα συστήματος Cospas-Sarsat αποτελείται από όργανα SARR ή / και SARP (πομποί/δέκτες). Το δορυφορικό δίκτυο Cospas-Sarsat αποτελείται από τα εξής δορυφορικά μέσα:

- Πέντε δορυφόροι σε πολική γήινη τροχιά χαμηλού υψομέτρου με ωφέλιμα φορτία LEOSAR (τροχιά γης χαμηλής υψομέτρου αναζήτησης και διάσωσης)
- Δέκα δορυφόροι σε γεωστατική τροχιά της Γης με ωφέλιμα φορτία GEOSAR (γεωστατική Γήινη τροχιά αναζήτησης και διάσωσης)
- Περισσότεροι από 40 δορυφόροι σε τροχιά Γης μεσαίου υψομέτρου με ωφέλιμα φορτία MEOSAR (τροχιά αναζήτησης και διάσωσης μέσης υψομέτρου)

Ένα όργανο SARR ή SARP είναι ένα δευτερεύον ωφέλιμο φορτίο και συναφείς κεραίες που συνδέονται με αυτούς τους δορυφόρους ως συμπλήρωμα της πρωτεύουσας δορυφορικής αποστολής. Ένα όργανο SARR εκπέμπει σήμα κινδύνου φάρου σε δορυφορικό επίγειο σταθμό σε πραγματικό χρόνο. Ένα όργανο SARP καταγράφει τα δεδομένα από το σήμα κινδύνου, έτσι ώστε οι πληροφορίες να μπορούν να συγκεντρωθούν αργότερα από έναν σταθμό εδάφους όταν ο δορυφόρος περνά από πάνω.

## 2.5 Μετεωρολογία

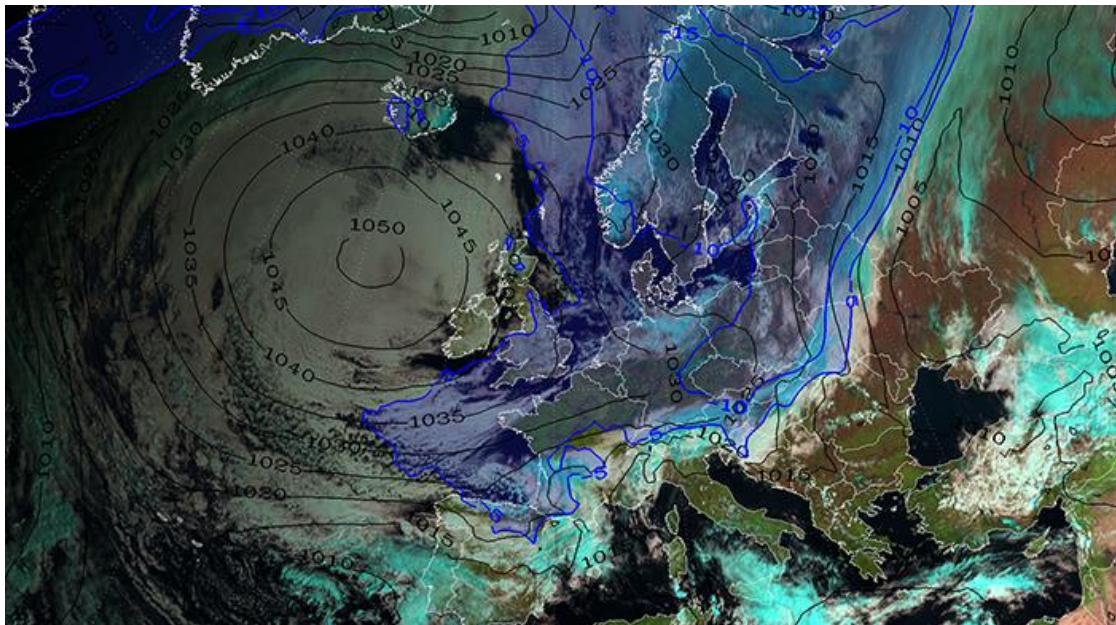
Μετεωρολογία, καιρός, ωκεανογραφία και χαρτογράφηση είναι πλέον ιδιαίτερα προηγμένη χάρη στα δορυφορικά μέσα.. Η ανάλυση των καιρικών συνθηκών, του εδάφους και άλλων περιβαλλοντικών παραγόντων είναι ένα κρίσιμο βήμα για την προετοιμασία και τη διεξαγωγή των επιχειρήσεων.

Μετεωρολογικοί δορυφόροι ή δορυφόροι καιρού ονομάζονται ειδικές διαστημικές μηχανές, σύγχρονα επιτεύγματα της διαστημικής, που εκτοξεύονται με διαστημικά οχήματα και θέτονται στη συνέχεια σε τροχιά γύρω από τη Γη, για την παρακολούθηση και πρόβλεψη των γήινων καιρικών φαινομένων. Στη σύγχρονη εποχή των διαστημικών ερευνών πράγματι λέξεις όπως "πύραυλος", "διαστημόπλοιο", "τεχνητός δορυφόρος" θεωρούνται πλέον συνήθεις και κοινότυπες αφού αποτελούν πλέον μέρος της καθημερινής ζωής. Η επιστήμη όμως που θεωρείται πως έχει ευεργετηθεί περισσότερο από κάθε άλλη από αυτή την δραστηριότητα είναι αναμφίβολα η Μετεωρολογία. Οι πληροφορίες που στέλνουν οι μετεωρολογικοί δορυφόροι ειδικά από το διάστημα είναι περισσότερο ικανές να προβλέψουν την εξέλιξη των καιρικών φαινομένων σε ένα τόπο για τις επόμενες 4, 5 ή και 10 ημέρες αυξάνοντας έτσι το εύρος της πρόγνωσης.

Τέτοιου είδους δυνατότητες θεωρούνται ιδιαίτερα σημαντικές στην ανθρώπινη διαβίωση. Δεν θα πρέπει να λησμονείται ότι κύματα ψύχους, ή πλημμυρών, τυφώνες και άλλα φαινόμενα που κυριολεκτικά παραλύουν συχνά ολόκληρες ηπείρους θα μπορούν να είναι λιγότερο καταστροφικά αν υπάρχει έγκαιρη πρόβλεψη. Έτσι η περαιτέρω ανάπτυξη των μετεωρολογικών παρατηρήσεων, μέσω των δορυφόρων αυτών, καθιστούν συνέχεια περισσότερο μακροπρόθεσμη την πρόγνωση του καιρού. ο πρώτος τεχνητός δορυφόρος που εκτοξεύθηκε ειδικά για ανάγκες μετεωρολογίας ήταν το 1960 που έφερε το όνομα TIROS-1 ο οποίος και έστειλε στη Γη περίπου 23.000 φωτογραφίες. Από τότε εκατομμύρια άλλες φωτογραφίες έχουν σταλεί στη Γη από τους μετεωρολογικούς δορυφόρους που εκτοξεύθηκαν στη συνέχεια και τοποθετήθηκαν σε τροχιές γύρω από τη Γη. Οι δορυφόροι αυτοί θέτονται σε τροχιές περιστροφής με την ίδια ταχύτητα περιστροφής της Γης ούτως ώστε να βρίσκονται συνέχεια πάνω από το ίδιο σημείο του γήινου ισημερινού. Οι δορυφόροι αυτοί είναι διαφόρων εθνικοτήτων που σχηματίζουν μεταξύ τους ένα δίκτυο μετεωρολογικής

παρατήρησης και πληροφόρησης για τη σφαιρική κατανομή των καιρικών φαινομένων του πλανήτη Γη. Το σύστημα αυτό βρίσκεται σε συνεχή λειτουργία όλο το 24ωρο, σε διάφορα μήκη κύματος, παρέχοντας έτσι πληροφορίες μέρα και νύκτα.

Νεότερες σειρές μετεωρολογικών δορυφόρων περισσότερο εξελιγμένοι άνοιξαν πραγματικά νέους ορίζοντες στους μετεωρολόγους. Όπως σημειώνει χαρακτηριστικά σε διαλέξεις του ο διακεκριμένος επιστήμονας και διευθυντής του Ευγενιδείου Πλανηταρίου, Διονύσης Σιμόπουλος "οι σύγχρονοι μετεωρολογικοί δορυφόροι ξεπερνούν κάθε προηγούμενο αφού οι δυνατότητές τους σε σχέση μ' εκείνον του 1960 είναι όσο το ακόντιο με το πολυβόλο"!



**Σχήμα 39: Καιρική Εικόνα της Ευρώπης από τον METEOSAT-11, με μέτωπο παγετού να κατευθύνεται νοτιοανατολικά (COLD SPELL IN EUROPE, METEOSAT-11 NATURAL COLOUR RGB, 30 MARCH 09:00 UTC)**

Σήμερα ένας ολόκληρος στόλος από σύγχρονους μετεωρολογικούς δορυφόρους λειτουργεί κάτω από την επίβλεψη της Ευρώπης, των ΗΠΑ, της Ρωσίας, της Κίνας, της Ιαπωνίας αλλά και της Ινδίας. Συγκεκριμένα:

1. Ευρώπης, κινούνται ήδη τρεις παλαιότεροι δορυφόροι οι Μετεοστάτ 5, 6 και 7, ένας νεότερος ο MSG-1 και ο ακόμα πιο εξελιγμένος, ο "Μέτοπ 1" (Metop-1) που παρέχουν πολύ ανώτερης ποιότητας παρατηρήσεις. Σύνολο 5.
2. ΗΠΑ, λειτουργού σήμερα οι GOES-8, 10, 11 και 12, και οι NOAA-12, 15 και 16. Σύνολο 7
3. Ρωσίας, λειτουργούν οι περιορισμένοι δυνατοτήτων (λόγω τροχιάς) Meteor-2 και 3, ο νεότερος Meteor-3M-N1 και ο τελευταίος, πλέον σύγχρονος, GOMS-N2. Σύνολο 4.
4. Κίνας, υπεύθυνη για την παρακολούθηση των παρατηρήσεων των FY-2A, FY-2B, FY-1C, του νεότερου FY-1D και του πλέον σύγχρονου FY-3A. Σύνολο 5.
5. Ινδίας, λειτουργούν οι InSat-1D, InSat-2B ο νεότερος InSat-3A και οι τελευταίοι νέας γενιάς MetSat-1R και InSat-3D. Σύνολο 5
6. Ιαπωνία, που έχει την ευθύνη του GMS-5 και των δύο τελευταίας γενιάς δορυφόρων MTSAT-1R και MTSAT-2. Σύνολο 3.

Οι τελευταίας γενιάς μετεωρολογικοί δορυφόροι είναι εφοδιασμένοι με πλείστα ηλεκτρονικά όργανα όχι μόνο αυτόματης ανάλυσης και καταγραφής φωτογραφιών αλλά και λήψης συγκέντρωσης και ανάλυσης εκπομπών γήινων αυτόματων μετεωρολογικών σταθμών που βρίσκονται σε απρόσιτες περιοχές (π.χ. ερήμους, θάλασσες, πολικές ζώνες, απρόσιτες

κορφές οροσειρών κλπ) που περιέχουν αναγκαία φυσικά τοπικά μεγέθη όπως η θερμοκρασία, ατμοσφαιρική πίεση, υγρασία ατμόσφαιρας, ταχύτητα και φορά ανέμων κ.λπ. Έτσι επιτυγχάνεται συλλογή πλούσιου υλικού που μετά από ηλεκτρονική επεξεργασία, σε πολλές των περιπτώσεων οι δορυφόροι αυτοί να παραδίδουν (συντάσσουν) ακόμη και τον μετεωρολογικό χάρτη πρόβλεψης καιρού συγκεκριμένου τόπου και χρόνου. Με τις δορυφορικές παρατηρήσεις των παραπάνω μετεωρολογικών δορυφόρων διαμορφώνονται οι σύγχρονοι καθημερινοί μετεωρολογικοί χάρτες ταχύτερα και σε συντομότερα διαστήματα.

## Κεφάλαιο 3

# Αγορά/Οικονομία του Διαστήματος

### 3.0 Εισαγωγή

Η παγκόσμια αγορά (οικονομία) του διαστήματος είναι περίπου 345 δισεκατομμύρια δολάρια ΗΠΑ το 2016, με το ένα τρίτο από αυτά να είναι κρατικοί προϋπολογισμοί και τρία τέταρτα εμπορικά έσοδα. Κοντά στα 50 είναι τα έθνη έχουν κρατικούς διαστημικούς προϋπολογισμούς, με εννέα από αυτά άνω του 1 δισεκατομμυρίου δολαρίων και σχεδόν 20

κάτω από τα 100 εκατομμύρια δολάρια. Πέντε τάσεις ξεχωρίζουν στη σημερινή διαστημική οικονομία: δημιουργία τεχνολογικών εξελίξεων με προσδοκίες για αποδοτικότερες (και επομένως προσοδοφόρες) διαστημικές δραστηριότητες, αυξημένες ιδιωτικές επενδύσεις από επενδυτές που είναι νέοι στο διάστημα, μια παγκόσμια οικονομία που είναι όλο και περισσότερο εξαρτώνται από δεδομένα με διαφορετικές επιπτώσεις στις διαστημικές δυνατότητες και τις αγορές, όλο και πιο ευρέως διαδεδομένο όραμα του διαστήματος ως μετασχηματισμού για την ανθρωπότητα και στρατιωτική/στρατηγικές εξελίξεις γύρω από το διάστημα ως στρατηγικό 'έδαφος'. Οι παγκόσμιες διαστημικές αγορές/τάσεις με βάση τη μελλοντική ανάπτυξη είναι:

- Ευρυζωνική σύνδεση καταναλωτών (consumer broadband)
- Διαχειριζόμενες υπηρεσίες
- Αναλυτικά δεδομένα με βάση τη γεωσκόπηση
- Δορυφορικό ραδιόφωνο
- Συσκευές και εφαρμογές πλοήγησης
- Επίγνωση της κατάστασης στο διάστημα (κυκλοφορία δορυφόρων, διαστημικών συντριμμιών)
- Κατασκευή μικροδορυφόρων (μάζα δορυφόρου < 500kg)
- Πιθανά οφέλη από εγκατάσταση εκτόξευσης
- Εξόρυξη μετάλλων/υλικών από αστεροειδή-μετεωρίτες

Όπως αναφέραμε, η παγκόσμια αγορά (οικονομία) του διαστήματος είναι περίπου 345 δισεκατομμύρια δολάρια ΗΠΑ το 2016, με το ένα τρίτο από αυτά να είναι κρατικοί προϋπολογισμοί και τρία τέταρτα εμπορικά έσοδα.

### 3.1 Δημόσια/κρατικά προγράμματα διαστημικής

Οι κρατικές/δημόσιες διαστημικές δραστηριότητες περιλαμβάνουν στρατιωτικές εφαρμογές για τηλεπαρατήρηση, επικοινωνίες και άλλες δραστηριότητες, συμπεριλαμβανομένης της πρόγνωσης καιρού, επιστήμη του διαστήματος και ανθρώπινη εξερεύνηση του διαστήματος (human exploration). Επιπλέον, οι κυβερνήσεις, ιδιαίτερα εκείνων των Ηνωμένων Πολιτειών και της Ευρώπης, προμηθεύονται επίσης εμπορικές υπηρεσίες, όπως εκτοξεύσεις, δορυφορικές εικόνες και επικοινωνίες. Ιστορικά, πολλές κυβερνήσεις έχουν αναλάβει ρόλο ανάπτυξης δορυφορικών επικοινωνιών μέσω τηλεφωνικών οργανισμών, οι οποίοι σε πολλές περιπτώσεις έχουν ιδιωτικοποιηθεί. Οι κυβερνήσεις επίσης επιδιώκουν την τόνωση της οικονομικής ανάπτυξης μέσω του διαστημικών δραστηριοτήτων/προγραμμάτων.

Οι εννέα εθνικοί διαστημικοί προϋπολογισμοί (θεωρώντας συλλογικά την Ευρώπη) υπερβαίνουν 1 δισεκατομμύριο δολάρια: αυτά των Ηνωμένων Πολιτειών, της Κίνας, της Ευρώπης (συλλογικά), Ρωσία, Ινδία, Ιαπωνία, Γαλλία, Γερμανία και Ιταλία. Οι Ηνωμένες Πολιτείες οδηγούν στις κυβερνητικές δαπάνες διαστήματος, με εκτιμώμενα 48 δισεκατομμύρια δολάρια. Η Κίνα ακολουθεί τα 11 δισεκατομμύρια δολάρια, με τον προϋπολογισμό να διατίθεται στον στρατιωτικό και πολιτικό διαστημικό οργανισμό που υποστηρίζεται από μία μόνο οντότητα που ονομάζεται China Aerospace Science and Technology Corporation (CASC). Ο διαστημικός προϋπολογισμός του Ευρωπαϊκού Οργανισμού Διαστήματος (ESA) είναι περίπου 7 δισεκατομμύρια δολάρια. Η ESA λαμβάνει συνεισφορές από 22 κράτη μέλη, κάθε κράτος συνεισφέρει κεφάλαια βάσει του ακαθάριστο εγχώριο προϊόν (ΑΕΠ). Ο προϋπολογισμός της Ρωσίας σημείωσε σημαντική μείωση το 2016 (μέρος ενός σχεδίου που αποσκοπεί στη μείωση των πολυετών κυβερνητικών δαπανών υπό το φως της πτώσης των τιμών του πετρελαίου) και εκτιμάται ότι ανέρχεται σε περίπου 4 δισεκατομμύρια δολάρια. Το 2013, η Ρωσία άρχισε να εδραιώνει τη διαστημική βιομηχανία της φέρνοντας τους διαστημικούς εργολάβους/εταιρείες κάτω υπό μια οργάνωση-ομπρέλα που ονομάζεται Roscosmos, ολοκληρώνοντας τη διαδικασία το 2016. Οι διαστημικές

δυνάμεις του υψηλότερου επιπέδου - οι Ηνωμένες Πολιτείες, η Κίνα, η Ευρώπη και η Ρωσία - είναι οι κορυφαίες στον κόσμο γεωπολιτική και ταυτόχρονα σημαντικές οικονομικές δυνάμεις. Διαθέτουν το πλήρες φάσμα διαστημικών δυνατοτήτων απαραίτητων για τη διατήρηση και ενίσχυση της στρατιωτικής και οικονομικής τους δύναμης και του κύρους τους. Άλλες διαστημικές δυνάμεις όπως η Ινδία, η Ιαπωνία, η Γαλλία, η Γερμανία και η Ιταλία διαθέτουν τεχνικές ικανότητες που ανταγωνίζονται και σε ορισμένες περιπτώσεις ξεπερνούν αυτές των κορυφαίων διαστημικών δυνάμεων (σε περιοχές όπως παγκόσμιες δορυφορικές υπηρεσίες πλοήγησης ή GNSS, συλλογή πληροφοριών/εικόνων, και διαστημική επίγνωση), αλλά τα προγράμματά τους είναι μικρότερα σε κλίμακα και προϋπολογισμό. Οι στρατηγικές διαστημικών επενδύσεων για αυτές τις χώρες ποικίλλουν. Το πρόγραμμα της Ινδίας (με προϋπολογισμό άνω των 4 δισεκατομμυρίων δολαρίων) αντικατοπτρίζει την από καιρό αυτάρκεια που έχει αποκτήσει η Ινδία, την οικονομική ανάπτυξη, και στρατηγικούς-στρατιωτικούς στόχους, αν και τα τελευταία χρόνια η Ινδία προσπάθησε να ενισχύσει τους στόχους της και το διεθνές κύρος αναλαμβάνοντας αποστολές στη Σελήνη και τον Άρη. Για την Ιαπωνία (με προϋπολογισμό άνω των 3 δισεκατομμυρίων δολαρίων), τα επιστημονικά και τεχνικά επιτεύγματα ήταν παραδοσιακά το κύριο επίκεντρο, αλλά η απειλή της Βόρειας Κορέας έχει ωθήσει το Τόκιο να συνεχίσει προγράμματα που έχουν περισσότερο στρατιωτικό χαρακτήρα (π.χ. δορυφόρους τηλεπαρατήρησης). Η Ιαπωνία και η Ινδία έχουν τη δικές τους εγχώριες δυνατότητες εκτόξευσης, ενώ η Γαλλία, η Γερμανία και η Ιταλία, με διαστημικούς προϋπολογισμούς 2,4 δισεκατομμυρίων δολαρίων, 1,6 δισεκατομμύρια και 1,2 δισεκατομμύρια δολάρια αντίστοιχα, είναι οι κορυφαίοι εταίροι της ArianeGroup, της Ευρώπης έναρξη κοινοπραξίας που διαχειρίζεται τους διαστημικούς φορείς Ariane 5/6, VEGA που εκτοξεύονται από την Γαλλική Γουιάνα στην Νότιο Αμερική με την υποστήριξη και χρηματοδότηση του ΕΟΔ και ΕΕ.

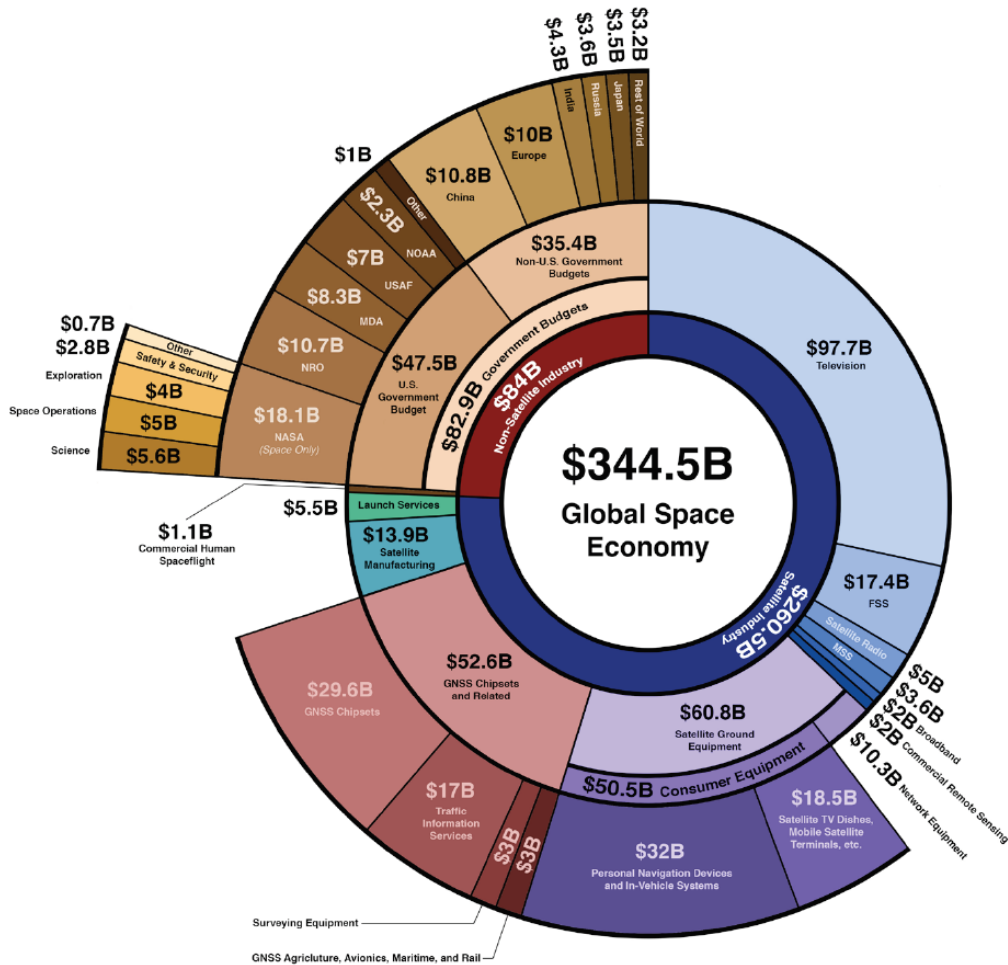
Όλα αυτά τα έθνη με διαστημικούς προϋπολογισμούς άνω του 1 δισεκατομμύριο έχουν ανθρώπινα προγράμματα επανδρωμένων διαστημικών πτήσεων, εγχώριες δυνατότητες εκτόξευσης (σημειώνοντας ότι η Γαλλία, η Γερμανία και η Ιταλία το επιτυγχάνουν μέσω της συμμετοχής τους στο ESA), και σημαντικά εθνικά διαστημικά συστήματα ασφαλείας. Οι δυνατότητες τείνουν να είναι διαφορετικές μεταξύ των μεγαλύτερων διαστημικών παραγόντων και της επόμενης βαθμίδας (με προϋπολογισμούς κάτω του 1 δισεκατομμυρίου). Από τα 40 περίπου έθνη με διαστημικούς προϋπολογισμούς κάτω από 1 δισεκατομμύριο δολάρια, πέντε έχουν εγχώρια δυνατότητα εκτόξευσης (Ισραήλ, Νότια Κορέα, Βόρεια Κορέα, Ιράν και, ενδεχομένως, Νέα Ζηλανδία) αλλά κανένα από αυτά δεν έχει πρόγραμμα επανδρωμένης διαστημικής πτήσης (σημειώνοντας ότι πολλές ευρωπαϊκές χώρες και Ο Καναδάς συμβάλλει είτε μέσω της NASA είτε του ESA σε αυτό το θέμα). Ορισμένες χώρες, όπως Το Ισραήλ και η Τουρκία λειτουργούν δορυφόρους τηλεπαρατήρησης με σημαντικές ικανότητες.

### 3.2 Εμπορικές Δραστηριότητες

Η εμπορική διαστημική οικονομία κυριαρχείται από τις υπηρεσίες και τα προϊόντα που παρέχουν δορυφόροι: δορυφορική τηλεόραση σε σπίτια, ευρυζωνικές συνδέσεις, παρακολούθηση κινητών στοιχείων (mobile asset tracking), κινητή τηλεφωνία/επικοινωνίες και συνδέσεις δεδομένων για οργανισμούς σε όλο τον κόσμο. Η ώριμος πλέον δορυφορική βιομηχανία περιλαμβάνει επίσης δορυφορικές κατασκευές, υπηρεσίες εκτόξευσης και επίγειο εξοπλισμό (δορυφορικοί σταθμοί). Επιπλέον, εμφανίστηκαν νέα επιχειρηματικά μοντέλα και δυνατότητες δορυφόρων τα τελευταία χρόνια, που βρίσκονται ακόμη σε μεγάλο βαθμό στη φάση επενδύσεων και ανάπτυξης (δηλαδή χωρίς να παράγονται ουσιαστικά έσοδα). Αρκετές εταιρείες και κυβερνητικές υπηρεσίες επιδιώκουν να εξυπηρετούνται/ανεφοδιάζονται δορυφόροι σε τροχιά. Δεκάδες μεγάλες συστοιχίες (constellations) μικρών δορυφόρων (δεκάδες ή εκατοντάδες κιλιά σε μέγεθος, αντί χιλιάδες)

αναπτύσσονται /κατασκευάζονται να παρέχουν νέες υπηρεσίες τηλεπαρατήρησης και επικοινωνιών με παγκόσμια κάλυψη, όπως και πολύ μικρά οχήματα εκτόξευσης με στόχο την εκτόξευσή τους. Νέες διαστημικές εφαρμογές (downstream) βασιζόμενοι σε προηγμένα αναλυτικά δεδομένα και μηχανική μάθηση σχεδιάζονται να εκμεταλλευτούν νέα δορυφόρο δεδομένα (big data) για την παροχή πληροφοριών για την επίγεια οικονομία, καθώς και για την παροχή δεδομένων επίγνωσης της κυκλοφορίας διαστημικών οχημάτων/αντικειμένων σε τροχιά (space situational awareness). Πέρα από τη βιομηχανία δορυφόρων, ο εμπορικός τομέας περιλαμβάνει επίσης τις επανδρωμένες διαστημικές πτήσεις, πλατφόρμες, κατασκευή δορυφόρων, εξόρυξη και χρήση διαστημικών πόρων (πλανήτες/αστεροειδής) και άλλες αγορές. Αυτά τα οι αγορές βρίσκονται σε σχετικά πρώιμο στάδιο, προσελκύνοντας αρχικές επενδύσεις και εξακολουθούν να αναζητούν ισχυρά επιχειρηματικά σχέδια (business case) ενόψει της αβέβαιης ή ρευστής ζήτησης. Συνήθως, απαιτούν υψηλές κεφαλαιακές δαπάνες. Αυτοί οι παράγοντες αυξάνουν τον επιχειρηματικό τους κίνδυνο. Ο εμπορικός διαστημικός τομέας αντιπροσωπεύει περίπου 262 δισεκατομμύρια δολάρια του ετήσιου παγκόσμιου διαστημική οικονομία, προερχόμενα σχεδόν εξ ολοκλήρου από τη δορυφορική βιομηχανία.

Τα δορυφορικά έσοδα έχουν περισσότερο από υπερδιπλασιαστεί την τελευταία δεκαετία, αν και η ανάπτυξη έχει επιβραδυνθεί τα τελευταία χρόνια λόγω της παγκόσμιας οικονομικής κρίσης (2012-2016). Τα δορυφορικά έσοδα κυριαρχούνται από δύο τεράστιες δορυφορικές αγορές: απευθείας στο σπίτι δορυφορική τηλεόραση (Direct to Home TV - DTH, περίπου 100 δισεκατομμύρια \$) και προϊόντα και υπηρεσίες παγκόσμιας δορυφορικής πλοήγησης - GNSS (περίπου 85 δισεκατομμύρια δολάρια, προσμετρώντας τις αυτόνομες συσκευές πλοήγησης και υποστηριζόμενα chipset GNSS που υποστηρίζουν υπηρεσίες προσδιορισμού τοποθεσίας σε κινητές συσκευές, συστήματα κυκλοφορίας, αεροσκάφη, θαλάσσια σκάφη/οχήματα, τοπογραφία, και σιδηροδρομικές μεταφορές). Το GNSS πρωτοστάτησε στην ανάπτυξη, με αύξηση κατά 60% στα έσοδα, κατά την πενταετή περίοδο που έληξε το 2016, από 53 δισεκατομμύρια δολάρια σε 85 δισεκατομμύρια δολάρια. Η αγορά DTH αυξήθηκε κατά 11% σε σχέση με το την ίδια περίοδο, από 88 δισεκατομμύρια \$ σε 98 δισεκατομμύρια δολάρια. Άλλες δορυφορικές αγορές περιλαμβάνουν το δορυφορικό ραδιόφωνο (υπηρεσία ψηφιακού ραδιοφώνου ή DARS), δορυφορική ευρυζωνική σύνδεση, μίσθωση αναμεταδοτών, διαχειριζόμενες υπηρεσίες δικτύου και κινητή δορυφορική υπηρεσία (MSS), με συνολικά έσοδα περίπου 28 δισεκατομμυρίων δολαρίων. Οι ταχύτεροι ρυθμοί ανάπτυξης προέρχονται από τους μικρότερους, λιγότερο ώριμους υποτομείς όπως οι διαχειριζόμενες υπηρεσίες δικτύου, οι οποίες περιλαμβάνουν σύνδεση στο διαδίκτυο κατά την πτήση (αύξηση 35% για τα πέντε έτη που λήγει το 2016), ευρυζωνική σύνδεση (33%), κινητές επικοινωνίες (50%) και παρατήρηση γης (Earth Observation - EO) (54%). Αυτοί οι υποτομείς αντιπροσωπεύουν σήμερα ένα μικρό μέρος της συνολικής αγοράς υπηρεσιών. Η ευρυζωνικές συνδέσεις αντιπροσωπεύουν το 1,6% του συνόλου, ενώ τα κινητή τηλεφωνία και η παρατήρηση γης (EO) είναι 3% και 1,6% αντίστοιχα. Οι λειτουργίες υποδομών για την κατασκευή και εκτόξευση δορυφόρων αποτελούν λιγότερο από το 10% των εμπορικών εσόδων, με έσοδα από δορυφορικές κατασκευή 13,9 \$ δισεκατομμύρια και από υπηρεσίες εκτόξευσης έσοδα ύψους 5,5 δισεκατομμυρίων δολαρίων. Επιπλέον έσοδα δημιουργούνται από το ευρύ φάσμα εφαρμογών και επιχειρήσεων που κατά κάποιο τρόπο χρησιμοποιούν διαστημικές δυνατότητες ή δεδομένα. Αυτές οι ποικίλες δραστηριότητες, που κυμαίνονται από μετεωρολογικές προβλέψεις που υποστηρίζονται από τη διαφήμιση, έως τον ακριβή χρόνο για τραπεζικές συναλλαγές, σε παιχνίδια και υπηρεσίες βάσει τοποθεσίας, αλλά και πωλήσεις εκτυπώσεων και έργων τέχνης διαστημικών εικόνων, είναι δύσκολο να ποσοτικοποιηθούν συστηματικά και ρεαλιστικά.



Σχήμα 40: Η Αγορά του Διαστήματος (2016)<sup>2</sup>

### 3.3 Ιδιωτικές Επενδύσεις – Εποχή ‘New Space’

Ένας αριθμός αναπτυσσόμενων, νέων εμπορικών δραστηριοτήτων, οι οποίες δεν παράγουν ακόμη σημαντική έσοδα, προσελκύουν επενδύσεις. Αυτές οι δραστηριότητες περιλαμβάνουν δορυφορική εξυπηρέτηση/ανεφοδιασμό σε τροχιά με καύσιμα ή υποσυστήματα (π.χ. μπαταρίες), πλατφόρμες, εξόρυξη διαστήματος / αξιοποίηση πόρων, επίγνωση κατάστασης διαστημικών οχημάτων σε τροχιά, έρευνα στο διάστημα και κατασκευές σε τροχιά και άλλα. Οι επενδυτές στοχεύουν επίσης σε νέα προϊόντα στις τηλεπικοινωνίες και στην τηλεπαρατήρηση (ΕΟ). Οι επενδύσεις σε εμπορικές διαστημικές δραστηριότητες αυξήθηκαν τα τελευταία χρόνια, με ιδιαίτερη έμφαση στο δυναμικό των διαστημικών υποδομών χαμηλότερου κόστους όπως μικρότεροι, φθηνότεροι δορυφόροι (μικροδορυφόροι) και επαναχρησιμοποιήσιμα οχήματα εκτόξευσης. Οι επιχειρήσεις τηλεπικοινωνιών που συνδυάζουν μικρούς δορυφόρους και μεγάλους αστερισμούς/συστοιχίες δορυφόρων έχουν προσέλκυσε μερικές από τις μεγαλύτερες επενδύσεις. Οι OneWeb και SpaceX, μεταξύ άλλων εταιρειών, έχουν δηλώσει σχέδια για ανάπτυξη των λεγόμενων mega-αστερισμών για πανταχού παρούσα συνδεσιμότητα στο Διαδίκτυο. Η OneWeb και η SpaceX είδαν και οι δύο πρόσφατες επενδυτικές συμφωνίες δισεκατομμυρίων δολαρίων. Τρεις τύποι επενδυτών, με διαφορετικά κίνητρα, διαμορφώνουν τον νέο εμπορικό χώρο τοπίο, επενδύοντας σχεδόν 3 δισεκατομμύρια δολάρια το 2016 και σχεδόν 8 δισεκατομμύρια δολάρια τα τελευταία πέντε χρόνια.

<sup>2</sup> [https://www.industry.gov.au/sites/default/files/2019-03/global\\_space\\_industry\\_dynamics\\_research\\_paper.pdf](https://www.industry.gov.au/sites/default/files/2019-03/global_space_industry_dynamics_research_paper.pdf)



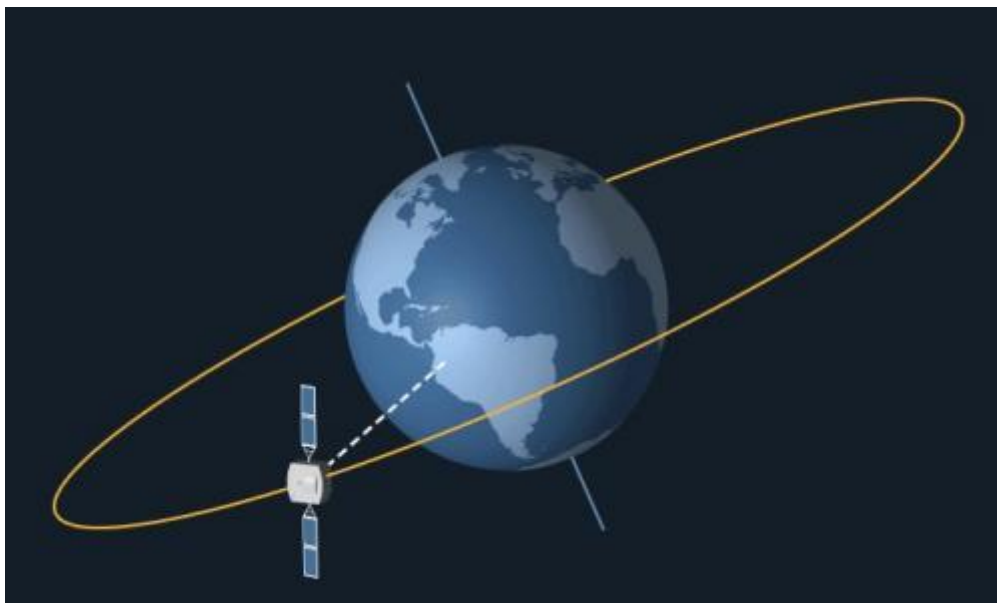
Επενδυτές όπως ο Elon Musk, ο Richard Branson και ο Jeff Bezos, χρησιμοποιούν τη δύναμη και το κεφάλαιό τους για την προώθηση του εμπορικού διαστημικού τομέα. Αυτοί οι επενδυτές παρακινούνται από την επιθυμία να δημιουργήσουν μια μεταμορφωτική ανθρώπινη εμπειρία. Επικεντρώνονται σε μεγάλο βαθμό στη διευκόλυνση της πρόσβασης στο διάστημα και στη δημιουργία ευκαιριών για επανδρωμένα διαστημικά ταξίδια. Οι προσεγγίσεις τους ήταν διαφορετικές: το SpaceX έχει εισέλθει σε πολλαπλές και διαφορετικές αγορές (συμπεριλαμβανομένων των κυβερνητικών αγορών), με βάση την εμπορική επιτυχία και απόδοση σε κάθε στάδιο. Επενδυτές και μελλοντικοί πελάτες (μέσω προκαταβολών για υποτροχιακές επανδρωμένες πτήσεις) έχουν χρηματοδοτήσει το μακρό χρονικό πλαίσιο ανάπτυξης της Virgin Galactic που στοχεύει να παρέχει υπηρεσίες διαστημικού τουρισμού με την παροχή υποτροχιακών διαστημικών πτήσεων με 3-5 τουρίστες/επιβάτες. Η Blue Origin βασίστηκε σχεδόν εξ ολοκλήρου στις βαθιές τσέπες του ιδρυτή Jeff Bezos. Όλη αυτή η κατάσταση δημιουργεί μια ενίσχυση των δυνατοτήτων εκτόξευσης αυτό που θα περιμέναμε να δούμε από την τυπική εμπορική δυναμική και τις κεφαλαιαγορές. Οι εταιρικοί στρατηγικοί επενδυτές επενδύουν για συνδυασμό οικονομικών αποδόσεων και άλλα οφέλη, συμπεριλαμβανομένων των πλεονεκτημάτων πλατφόρμας (οικοδόμηση σχέσης με έναν πελάτη, προμηθευτή, ή συνεργάτη), ευθυγράμμιση επωνυμίας (branding) και έλεγχος των διαταραχών της δυναμικής της αγοράς. Για παράδειγμα, πολλές εταιρείες επένδυσαν συνολικά 500 εκατομμύρια δολάρια στην OneWeb το 2015, από την Coca-Cola έως την Qualcomm. Οι εταιρείες επενδύουν επίσης στα δικά τους νέα προϊόντα και υπηρεσίες. Ένα πρόσφατο παράδειγμα είναι η επιχείρηση εξυπηρέτησης/ανεφοδιασμού μέσω δορυφόρου της Orbital ATK. Οι επενδυτές επιχειρηματικών κεφαλαίων που αναζητούν οικονομικά ζητούν τις καλύτερες αποδόσεις και είναι πρόθυμοι να δεχτούν σχετικά υψηλό επίπεδο κινδύνου. Οι επενδυτές επιχειρήσεων στο διάστημα προσελκύνθηκαν από δυνητικά προσοδοφόρες νέες αγορές (συνήθως βασίζονται σε αναλύσεις δεδομένων), σε συνδυασμό με βελτιωμένες δομές κόστους, συμπεριλαμβανομένων δορυφόρων χαμηλότερου κόστους, οχημάτων εκτόξευσης, εμπορικά εξαρτήματα (commercial off the shelf – COTS), στιβαρές αρχιτεκτονικές που επιτρέπουν μείωση του κόστους και αποδοχής υψηλότερης αστοχίας ανά δορυφόρο και ούτω καθεξής. Οι τυπικές επενδύσεις είναι τα εκατομμύρια ή δεκάδες εκατομμύρια δολάρια, αν και μερικές πολύ μεγαλύτερες επενδύσεις έχουν γίνει, όπως στην περίπτωση της OneWeb. Η μελλοντική απόδοση αυτών των νέων εταιρειών είναι αβέβαιη. Πολλές επιχειρήσεις που χρηματοδοτούνται από εταιρείες Venture Capitalist (έως και 3 στις 4) αποτυγχάνουν. Οι διαστημικές εταιρείες αντιμετωπίζουν επιχειρηματική αβεβαιότητα από την παροχή νέων προϊόντων και υπηρεσιών σε νέες αγορές, τεχνολογικά εμπόδια, και το φαινόμενο ντόμινο της αλληλεξάρτησης των οικοσυστημάτων (δηλαδή, μια διαστημική εταιρεία, σαν ένας μικρός πάροχος εκτόξευσης, βασίζεται στην επιτυχία μιας άλλης διαστημικής εταιρείας, όπως κατασκευαστή/χειριστή μικροδορυφόροι). Στον προγραμματισμό, είναι σημαντικό να αναγνωρίσουμε ότι όλο και περισσότερο το δυναμικό διαστημικό οικοσύστημα θα δει τόσο τις επιτυχίες όσο και τις αποτυχίες.

## Κεφάλαιο 4

### Βασικές Έννοιες Μηχανικής

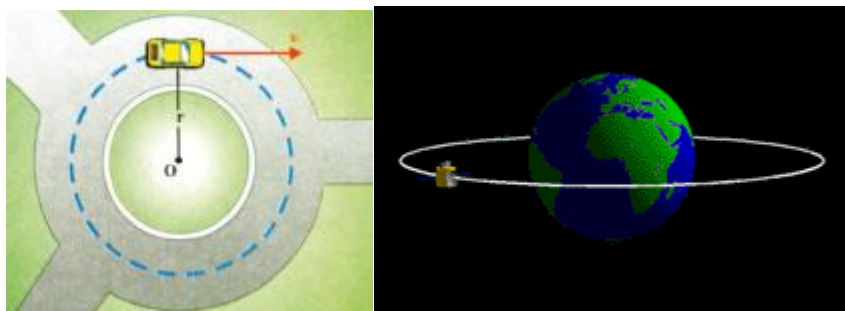
### Ομαλή κυκλική κίνηση

Ένα κινητό κάνει κυκλική κίνηση όταν η τροχιά που διαγράφει είναι περιφέρεια κύκλου (Σχ. 41).



**Σχήμα 41: Δορυφόρος σε κυκλική Γεωστατική τροχιά με σταθερή ταχύτητα**

Η πιο απλή από τις κυκλικές κινήσεις είναι η ομαλή κυκλική (Σχ. 42).



**Σχήμα 42 (Αριστερά) Το αυτοκίνητο κινείται στην κυκλική πλατεία με σταθερή ταχύτητα (Δεξιά) Δορυφόρος σε κυκλική τροχιά ισημερινού με σταθερή ταχύτητα**

Ομαλή χαρακτηρίζεται η κυκλική κίνηση ενός κινητού, όταν η τιμή της ταχύτητάς του παραμένει σταθερή. Ο χρόνος που χρειάζεται το κινητό για να κάνει μία περιφορά, λέγεται περίοδος της κυκλικής κίνησης και συμβολίζεται με  $T$ . Ο αριθμός των περιφορών που εκτελεί το κινητό στη μονάδα του χρόνου λέγεται συχνότητα της κυκλικής κίνησης και συμβολίζεται με  $f$ . Από τον ορισμό της συχνότητας προκύπτει ότι η περίοδος και η συχνότητα συνδέονται με τη σχέση:

$$f = \frac{1}{T} \quad (4-1)$$

Μονάδα της συχνότητας είναι ο κύκλος ανά δευτερόλεπτο (c/s) που λέγεται 1Hz (Χερτζ) προς τιμή του φυσικού Hertz που θεωρείται ένας από τους πρωτοπόρους στη μελέτη των ηλεκτρομαγνητικών κυμάτων. Πολλαπλάσια της μονάδας αυτής είναι:

$$1\text{kHz} = 10^3\text{Hz}, 1\text{MHz} = 10^6\text{Hz}, 1\text{GHz} = 10^9\text{Hz}.$$

Η ομαλή κυκλική κίνηση είναι γνωστή σε όλους μας. Τέτοια κίνηση κάνει το άκρο του λεπτοδείκτη του ρολογιού, ένα σημείο του περιστρεφόμενου δίσκου στο πικάπ ή ένας δορυφόρος σε τροχιά κ.τ.λ. Η ομαλή κυκλική κίνηση εντάσσεται σε μία μεγάλη κατηγορία κινήσεων που λέγονται περιοδικές. Μία τέτοια κίνηση έχει το χαρακτηριστικό ότι επαναλαμβάνεται η ίδια στον ίδιο πάντα χρόνο που λέγεται περίοδος (T).

### Γραμμική ταχύτητα

Σύμφωνα με τον ορισμό της ομαλής κυκλικής κίνησης η τιμή της ταχύτητας του κινητού παραμένει σταθερή, ενώ η κατεύθυνσή της μεταβάλλεται συνεχώς, επειδή κάθε στιγμή είναι εφαπτόμενη στην τροχιά (Σχ. 43α). Άρα τα διανύσματα τόξα είναι ανάλογα των χρόνων στους οποίους διανύονται. Μπορούμε συνεπώς να γράψουμε:

$$s = v \cdot t \quad (4-2)$$

Επομένως το μέτρο της ταχύτητάς του, που ονομάζεται γραμμική ταχύτητα θα είναι:

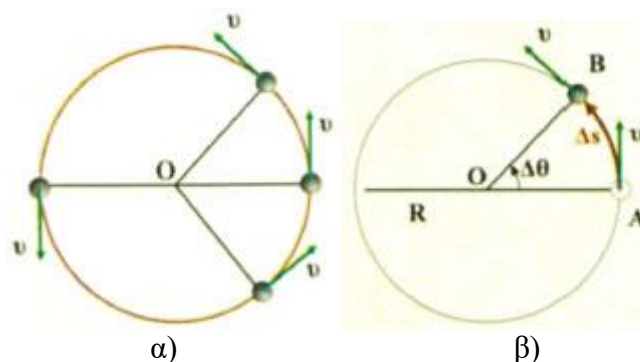
$$v = \frac{s}{t} \quad (4-3)$$

Αν στον τελευταίο τύπο θέσουμε  $t = T$ , τότε το τόξο που θα διανύσει το κινητό θα έχει μήκος  $s = 2 \cdot \pi \cdot R$  (το μήκος της περιφέρειας της κυκλικής τροχιάς), οπότε:

$$v = \frac{2 \cdot \pi \cdot R}{T} \quad (4-4)$$

Ας υποθέσουμε ότι τη χρονική στιγμή  $t = 0$  το κινητό βρίσκεται στη θέση A και μετά από χρόνο  $t$ , κινούμενο κατά τη φορά που φαίνεται στην εικόνα β, με γραμμική ταχύτητα  $v$ , βρίσκεται στη θέση B, έχοντας διανύσει το τόξο  $\Delta s$ . Η θέση του κινητού πάνω στην τροχιά του μπορεί να προσδιορισθεί, κάθε στιγμή, με δύο τρόπους (Σχ. 43β):

- 1) Με τη μέτρηση του μήκους του τόξου AB ( $\Delta s = v \cdot \Delta t$ ).
- 2) Με τη μέτρηση της γωνίας AOB ( $A\hat{O}B = \Delta\theta$ ) την οποία διαγράφει μία ακτίνα, που θεωρούμε ότι συνδέει κάθε στιγμή το κινητό με το κέντρο της τροχιάς του (επιβατική ακτίνα). Έτσι όταν το κινητό θα έχει "διανύσει" τόξο μήκους  $\Delta s$  η επιβατική ακτίνα θα έχει "διαγράψει" επίκεντρη γωνία  $\Delta\theta$ .

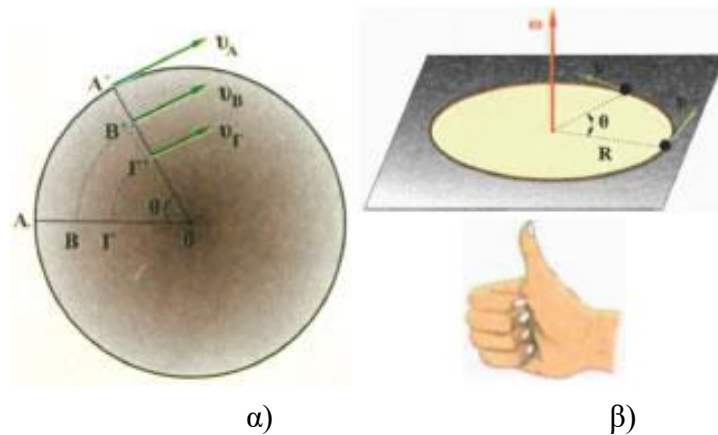


Σχήμα 43: Γραμμική Ταχύτητα

### Γωνιακή ταχύτητα

Ας θεωρήσουμε το σχήμα της εικόνας (Σχ. 44α) όπου φαίνεται ένας δίσκος που περιστρέφεται και τα σημεία του κάνουν ομαλή κυκλική κίνηση. Έστω τρία σημεία A, B και Γ του δίσκου που βρίσκονται πάνω στην ίδια ακτίνα. Σε ένα μικρό χρονικό διάστημα, τα τρία σημεία βρίσκονται στις θέσεις A', B' και Γ' αντίστοιχα και έχουν διαγράψει την ίδια γωνία  $\theta$ .

Ωστόσο τα μήκη των αντίστοιχων τόξων  $AA'$ ,  $BB'$ ,  $\Gamma\Gamma'$  είναι διαφορετικά μεταξύ τους, γεγονός που σημαίνει ότι οι γραμμικές ταχύτητες των σημείων A, B, Γ, διαφέρουν (Σχ. 44α).



Σχήμα 44: Γωνιακή Ταχύτητα

Στην ομαλή κυκλική κίνηση λοιπόν, εκτός από την ταχύτητα (γραμμική) που δίνει το ρυθμό με τον οποίο διανύει το κινητό διαστήματα, χρειαζόμαστε και ένα άλλο μέγεθος που να δείχνει με τι ρυθμό η επιβατική ακτίνα διαγράφει γωνίες. Γι' αυτό ορίζουμε ένα νέο φυσικό μέγεθος που λέγεται γωνιακή ταχύτητα και συμβολίζεται με  $\omega$ .

Γωνιακή ταχύτητα στην ομαλή κυκλική κίνηση ενός κινητού, ονομάζουμε ένα διανυσματικό μέγεθος του οποίου:

- Η τιμή είναι ίση με το σταθερό πηλίκο της γωνίας  $\theta$  που διαγράφηκε από την επιβατική ακτίνα σε χρονικό διάστημα  $t$  διά του αντίστοιχου χρονικού διαστήματος. Δηλαδή (Σχ. 44β):

$$\omega = \frac{\theta}{t} \quad (4-5)$$

- Η διεύθυνση είναι κάθετη στο επίπεδο της τροχιάς.
- Η φορά καθορίζεται με τον κανόνα του δεξιού χεριού όπως στην εικόνα. Το διάνυσμα  $\vec{\omega}$  έχει τη φορά, του αντίχειρα του δεξιού χεριού όταν η φορά περιστροφής του κινητού συμπίπτει με τη φορά των υπόλοιπων δακτύλων.

Στην ομαλή κυκλική κίνηση σε χρόνο μίας περιόδου  $T$  η επιβατική ακτίνα θα έχει διαγράψει γωνία  $2 \cdot \pi$  rad.

Αρα η σχέση (5) γράφεται:

$$\omega = \frac{2 \cdot \pi}{T} \quad (4-6)$$

Επειδή  $\frac{1}{T} = f$  η σχέση (6) γράφεται:  $\omega = 2 \cdot \pi \cdot f$ .

### Μονάδα γωνιακής ταχύτητας

Ως μονάδα γωνιακής ταχύτητας, σύμφωνα με τη σχέση (5), χρησιμοποιούμε το ακτίνο ανά δευτερόλεπτο (1rad/s).

### Σχέση μεταξύ της γραμμικής και της γωνιακής ταχύτητας

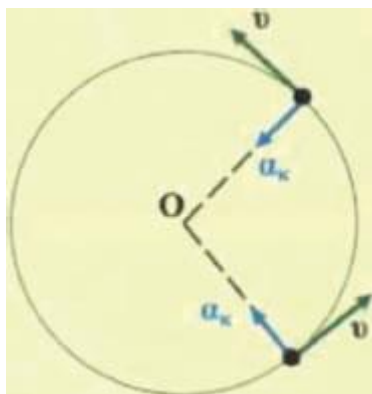
Για να βρούμε τη σχέση που συνδέει τη γραμμική με τη γωνιακή ταχύτητα αντικαθιστούμε στη σχέση (4) το πηλίκο  $2 \cdot \pi / T$  με το  $\omega$ , οπότε προκύπτει:

$$v = \omega \cdot R \quad (4-7)$$

Η σχέση αυτή συνδέει τη γραμμική ταχύτητα με τη γωνιακή και με την ακτίνα της τροχιάς. Φαίνεται απ' αυτήν πως όλα τα σημεία ενός περιστρεφόμενου δίσκου (Σχ. 44α), ενώ έχουν την ίδια γωνιακή ταχύτητα ( $\omega$ ), έχουν γραμμικές ταχύτητες ( $v$ ) η τιμή των οποίων είναι ανάλογη με την απόστασή τους από τον άξονα (κέντρο) περιστροφής.

### Κεντρομόλος επιτάχυνση

Στην ομαλή κυκλική κίνηση η τιμή της ταχύτητας είναι σταθερή, όμως η διεύθυνση και η φορά αλλάζουν συνεχώς. Άρα το διάνυσμα της ταχύτητας αλλάζει με αποτέλεσμα να εμφανίζεται επιτάχυνση που έχει κατεύθυνση προς το κέντρο της κυκλικής τροχιάς (Σχ. 45) και λέγεται κεντρομόλος επιτάχυνση  $a_k$ .



Σχήμα 45: Κεντρομόλος Επιτάχυνση

Αποδεικνύεται ότι το μέτρο της κεντρομόλου επιτάχυνσης δίνεται από τη σχέση:

$$a_k = \frac{v^2}{R} \quad (4-8)$$

### Κεντρομόλος δύναμη

Οι κυκλικές και γενικά οι καμπυλόγραμμες κινήσεις είναι μία μεγάλη κατηγορία κινήσεων. Έχετε αναρωτηθεί ποιο είναι το αίτιό τους; Ποια είναι παραδείγματος χάρη η αιτία που κρατά σε τροχιά ένα τεχνητό δορυφόρο γύρω από την Γη; (Σχ. 41) Για ποιο λόγο η Τροχαία βάζει όριο ταχύτητας στις στροφές; Αυτά είναι μερικά από τα ερωτήματα στα οποία θα προσπαθήσουμε να δώσουμε απάντηση στην παράγραφο αυτή.

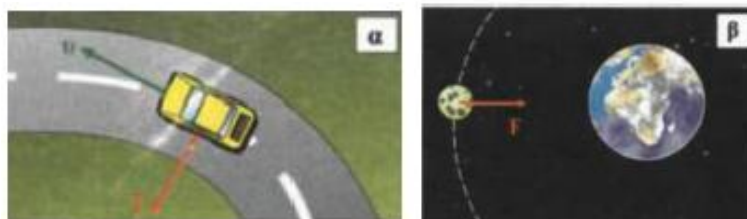
Οι δύο πρώτοι νόμοι του Νεύτωνα μας επιτρέπουν να περιγράψουμε την κίνηση που κάνει ένα σώμα όταν γνωρίζουμε τη συνισταμένη των δυνάμεων που ενεργούν σ' αυτό, την αρχική θέση του καθώς και την αρχική του ταχύτητα. Έτσι αν σε ένα σώμα δεν ασκούνται δυνάμεις, ή αν ασκούνται και έχουν συνισταμένη μηδέν, τότε σύμφωνα με τον πρώτο νόμο του Νεύτωνα αυτό θα ηρεμεί ή θα κινείται με κίνηση ευθύγραμμη ομαλή.

Αν η συνισταμένη των δυνάμεων που ασκούνται σε ένα σώμα δεν είναι μηδέν, τότε σύμφωνα με το δεύτερο νόμο του Νεύτωνα αυτό έχει επιτάχυνση  $\vec{a}$  ομόρροπη της δύναμης, που προσδιορίζεται από τη σχέση  $\vec{F} = m \cdot \vec{a}$ , όπου  $m$  είναι η μάζα του σώματος.

Ας θεωρήσουμε την περίπτωση που ένα σώμα εκτελεί κυκλική κίνηση με ταχύτητα σταθερής τιμής. Επειδή η κατεύθυνση της ταχύτητας συνεχώς μεταβάλλεται, άρα υπάρχει επιτάχυνση (κεντρομόλος) και σύμφωνα με το δεύτερο νόμο του Νεύτωνα στο σώμα ασκείται δύναμη. Η δύναμη αυτή έχει κατεύθυνση προς το κέντρο της κυκλικής τροχιάς και γι' αυτό λέγεται κεντρομόλος δύναμη (Σχ. 45).

Η κεντρομόλος δύναμη είναι γενικά η συνισταμένη των δυνάμεων που ασκούνται στο σώμα κατά τη διεύθυνση της ακτίνας της κυκλικής τροχιάς με φορά προς το κέντρο του κύκλου. Δεν πρόκειται για μία ακόμα δύναμη πάνω στο σώμα. Λέμε συνήθως ότι η συνισταμένη των δυνάμεων (κατά τη διεύθυνση της ακτίνας) παίζει ρόλο κεντρομόλου δύναμης.

Την έννοια της κεντρομόλου δύναμης συναντάμε σε κάθε φαινόμενο που υπάρχει κυκλική κίνηση. Παραδείγματος χάρη, όταν ένα αυτοκίνητο εκτελεί ομαλή κυκλική κίνηση σε ένα επίπεδο δρόμο, η κεντρομόλος δύναμη είναι η δύναμη τριβής (Σχ. 46α). Η Σελήνη περιφέρεται γύρω από τη Γη λόγω της ελκτικής δύναμης που δέχεται από αυτή. Η δύναμη αυτή παίζει τότε το ρόλο της κεντρομόλου δύναμης (Σχ. 46β).



**Σχήμα 46: Δυνάμεις που δρουν ως κεντρομόλες (α) η τριβή (β) η βαρυτική έλξη F**

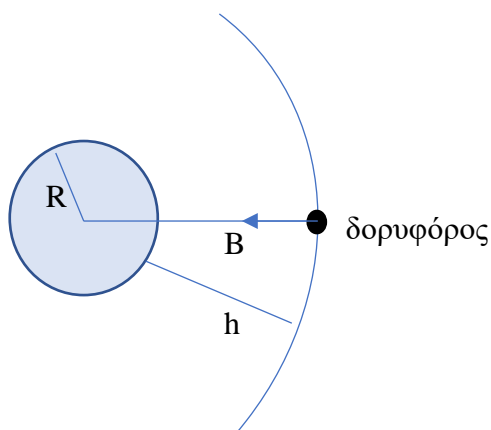
Γενικά κάθε δύναμη που αναγκάζει ένα σώμα να εκτελεί ομαλή κυκλική κίνηση λέγεται κεντρομόλος δύναμη. Η κεντρομόλος επιτάχυνση έχει την ίδια κατεύθυνση με την κεντρομόλο δύναμη. Όπως είδαμε, η τιμή της κεντρομόλου επιτάχυνσης δίνεται από τη σχέση (8).

Έτσι η τιμή της κεντρομόλου δύναμης δίνεται από τη σχέση:

$$F = m \cdot a = \frac{m \cdot v^2}{R} \quad (4-9)$$

#### Παράδειγμα 4-1

Με ποια ταχύτητα πρέπει να κινείται κάποιος δορυφόρος έτσι ώστε να διαγράφει κυκλική τροχιά από μικρό ύψος  $h$  από την επιφάνεια της Γης;



Το κέντρο της τροχιάς είναι το κέντρο της γης. Ακτίνα τροχιάς είναι  $r=R+h$  όπου R η ακτίνα της Γης.

$$F_{κεν} = B = m \cdot g = \frac{m \cdot v^2}{R + h}, \quad v = \sqrt{g(R + h)}$$

Για μικρά ύψη σε σχέση με την ακτίνα της Γης  $g = 9.8 \text{ m/s}^2$

$$\text{Αν } h = 100 \text{ miles} = 1/40 R_{Γης} \text{ τότε } v = \sqrt{(9.8) \text{ m/s}^2 (6.4 \times 10^6 \text{ m} + 1.6 \times 10^5 \text{ m})} = 8 \times \frac{10^5 \text{ m}}{\text{s}} = 8 \text{ km/s}$$

### Ασκήσεις

- Ένας αστροναύτης βρίσκεται στη Σελήνη, και αφήνει ένα σώμα από ύψος 7,2m που φτάνει στο έδαφος μετά από 3s.
  - Πόση είναι η επιτάχυνση βαρύτητας στη Σελήνη;
  - Αν ο αστροναύτης πετάξει το σώμα οριζόντια με ταχύτητα 12m/s από το ίδιο ύψος,
    - Πόσος χρόνος χρειάζεται μέχρι να φτάσει το σώμα στο έδαφος;
    - Πόση οριζόντια απόσταση θα διανύσει μέχρι να φτάσει στο έδαφος;
- Υπολογίστε την ταχύτητα και την κεντρομόλο επιτάχυνση που οφείλεται στην περιστροφή της Γης, ενός αντικειμένου που βρίσκεται στον Ισημερινό της Γης. Δίνεται ότι η ακτίνα του Ισημερινού είναι 6.380km. Η περίοδος περιστροφής της Γης είναι  $T = 24\text{h}$ .
  - Η ταχύτητα περιστροφής του δορυφόρου.
  - Η γωνιακή ταχύτητα περιστροφής του δορυφόρου.
- Θεωρούμε τη Γη σφαιρική με ακτίνα  $R=6400 \text{ km}$  και με περίοδο περιστροφής  $T=24 \text{ h}$ . Να υπολογιστούν:
  - Η γραμμική ταχύτητα ενός σημείου του ισημερινού
  - Το διάστημα που διανύει αυτό το σημείο σε μία μέρα
  - Η γραμμική ταχύτητα ενός σημείου σε γεωγραφικό πλάτος  $\phi=60$  μοίρες.

### 4.2 Η Έννοια της Ορμής

Η μελέτη του φαινομένου της κρούσης και η περιγραφή του με τη βοήθεια κατάλληλα επινοημένων μεγεθών, απασχόλησε τους επιστήμονες πολύ πριν από την εποχή του Νεύτωνα. Το αποτέλεσμα ήταν να καταλήξουν, περί τα τέλη του 17<sup>ου</sup> αιώνα, στην εισαγωγή ενός νέου φυσικού μεγέθους που σήμερα χαρακτηρίζεται με το όνομα ορμή. Το ερώτημα που προέκυπτε κάθε φορά που μελετούσαν μία σύγκρουση ήταν: το φαινόμενο θα είναι άραγε πιο έντονο αν τα συγκρουόμενα σώματα έχουν μεγάλη μάζα, ή μεγάλη ταχύτητα;

Η απάντηση στην οποία κατέληγαν και που σήμερα και εμείς επιβεβαιώνουμε με την καθημερινή μας εμπειρία ήταν πως το αποτέλεσμα της κρούσης επηρεάζεται τόσο από τη μάζα, όσο και από την ταχύτητα των συγκρουόμενων σωμάτων.

Έτσι ορίζουμε την ορμή  $p$  ενός σώματος ως το φυσικό μέγεθος που η τιμή του εξαρτάται από τη μάζα και την ταχύτητα του σώματος. Συγκεκριμένα είναι:

$$\vec{p} = m \cdot \vec{u} \quad (4-10)$$

Η ορμή, όπως προκύπτει από τη σχέση (9), είναι μέγεθος διανυσματικό που έχει κατεύθυνση την κατεύθυνση της ταχύτητας του σώματος και η τιμή του είναι:  $p = m \cdot u$

Η μονάδα μέτρησής της στο Διεθνές Σύστημα Μονάδων S.I. είναι το 1 kgm/s.

Όπως ήδη έχουμε αναφέρει, η σημασία της έννοιας της ορμής είναι πολύ μεγάλη για τη Φυσική, αφού με αυτήν μπορούμε να μελετήσουμε φαινόμενα κρούσης. Ωστόσο, πολλές φορές χρησιμοποιούμε την έννοια της ορμής για να μελετήσουμε εξίσου καλά μία κίνηση.

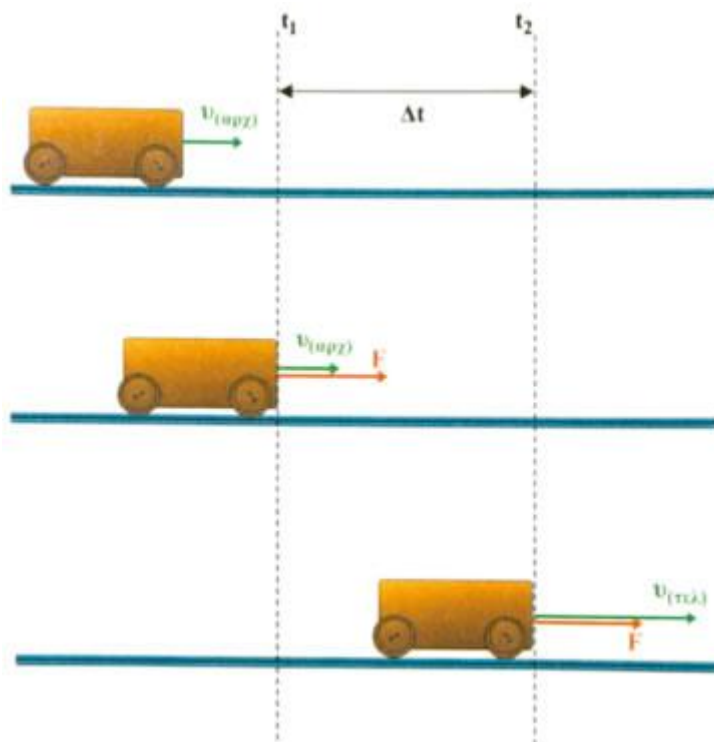
Όπως θα δούμε στις επόμενες παραγράφους, η περιγραφή της κρούσης με τη βοήθεια της έννοιας της ορμής, πλεονεκτεί της περιγραφής με τη βοήθεια της έννοιας της ταχύτητας, γιατί η ορμή ως φυσικό μέγεθος διατηρείται. Η ιδιότητα αυτή της ορμής είναι πολύ χρήσιμη, αφού μας επιτρέπει να κάνουμε προβλέψεις και να καταλήγουμε σε συμπεράσματα που αφορούν στην κίνηση ενός σώματος ή ενός συστήματος, χωρίς να χρειάζεται ο κουραστικός υπολογισμός όλων των λεπτομερειών της κίνησης.

#### Η δύναμη και η μεταβολή της ορμής

Όπως γνωρίζουμε, κατά τη διάρκεια της κρούσης εμφανίζονται δυνάμεις μεγάλου μέτρου. Αυτές οι δυνάμεις προκαλούν τις αλλαγές στην ταχύτητα και την ορμή των σωμάτων που συγκρούονται. Συνεπώς πρέπει να αναζητήσουμε σχέση μεταξύ δύναμης και ορμής, Σχ. 47. Τη σχέση αυτή μπορούμε να τη βρούμε, αν συνδυάσουμε το θεμελιώδη νόμο της Μηχανικής:

$$\vec{F} = m \cdot \vec{a}$$





**Σχήμα 47:** Η άσκηση της δύναμης  $F$  προκάλεσε την αύξηση της ταχύτητας από  $v_{αρχ}$  σε  $v_{τελ}$  και συνεπώς αύξηση της ορμής του σώματος.

με τη σχέση:

$$\vec{a} = \frac{\vec{v}_{τελ} - \vec{v}_{αρχ}}{\Delta t}$$

που ορίζει την επιτάχυνση.

Αντικαθιστώντας στην πρώτη την τιμή της επιτάχυνσης από τη δεύτερη προκύπτει ότι:

$$\vec{F} = m \frac{\vec{v}_{τελ} - \vec{v}_{αρχ}}{\Delta t} \quad \text{ή} \quad \vec{F} = \frac{m \vec{v}_{τελ} - m \vec{v}_{αρχ}}{\Delta t}$$

Γνωρίζουμε όμως ότι το γινόμενο  $m \vec{v}_{τελ}$  είναι η τελική ορμή  $\vec{p}_{τελ}$  του σώματος και  $m \vec{v}_{αρχ}$  η αρχική ορμή του  $\vec{p}_{αρχ}$ .

Η παραπάνω σχέση γράφεται έτσι:

$$\vec{F} = \frac{\vec{p}_{τελ} - \vec{p}_{αρχ}}{\Delta t} \tag{4-11}$$

Στην περίπτωση που τα διανύσματα  $\vec{p}_{αρχ}$  και  $\vec{p}_{τελ}$  είναι συγγραμικά, η σχέση (11) γράφεται:

$$F = \frac{p_{τελ} - p_{αρχ}}{\Delta t} \tag{4-12}$$

Από τη σχέση (4-12) προκύπτει ότι η μεταβολή της ορμής ( $\vec{p}_{τελ} - \vec{p}_{αρχ}$ ) διά του χρόνου  $\Delta t$  εντός του οποίου συμβαίνει αυτή, ισούται με τη δύναμη  $\vec{F}$  που την προκαλεί. Συνεπώς για να αλλάξει η ορμή ενός σώματος απαιτείται η άσκηση δύναμης.

### 4.3 Αρχή Διατήρησης της Ορμής (ΑΔΟ)

Με τη βοήθεια της έννοιας της ορμής οι επιστήμονες απλοποίησαν τη μελέτη των πολύπλοκων φαινομένων της κρούσης και κατέληξαν στο ακόλουθο συμπέρασμα:

**Η συνολική ορμή ενός μονωμένου συστήματος σωμάτων διατηρείται σταθερή.**

Η πρόταση αυτή είναι άμεση συνέπεια του τρίτου νόμου του Νεύτωνα σύμφωνα με τον οποίο η δράση είναι ίση με την αντίδραση.

Ας θεωρήσουμε δύο σώματα που αλληλεπιδρούν. Εφ' όσον οι δυνάμεις που ασκούνται σ' αυτά είναι αντίθετες, θα ισχύει  $\vec{F}_1 = -\vec{F}_2$  ή:

$$\frac{m_1 \Delta \vec{v}_1}{\Delta t} = - \frac{m_2 \Delta \vec{v}_2}{\Delta t}$$

Όμως ο χρόνος αλληλεπίδρασης  $\Delta t$  είναι ίδιος και για τα δύο σώματα και κατά συνέπεια  $m_1 \Delta \vec{v}_1 = m_2 \Delta \vec{v}_2$ .

Συνεπώς για τις μεταβολές της ορμής θα ισχύει:

$$\Delta \vec{p}_1 = \Delta \vec{p}_2 \quad \text{ή} \quad \Delta \vec{p}_1 + \Delta \vec{p}_2 = 0$$

Εφ' όσον όμως το άθροισμα των μεταβολών των ορμών είναι μηδέν, έπεται ότι το άθροισμα των ορμών των σωμάτων του συστήματος δεν μεταβάλλεται, διότι από την προηγούμενη σχέση προκύπτει:

$$\vec{p}_{1(\text{τελ})} + \vec{p}_{2(\text{τελ})} = \vec{p}_{1(\text{αρχ})} + \vec{p}_{2(\text{αρχ})} \quad \text{ή} \quad \vec{p}_{ολ(\text{αρχ})} + \vec{p}_{ολ(\text{αρχ})}$$

Τα πορίσματα που προκύπτουν αν εφαρμόσουμε τη διατήρηση της ορμής για την κίνηση των σωμάτων που συγκρούονται, έχουν ελεγχθεί πειραματικά πάρα πολλές φορές, ώστε σήμερα δεν υπάρχει καμία αμφιβολία για την εγκυρότητά τους. Έτσι η διατήρηση της ορμής έχει αναβαθμιστεί στη σκέψη των επιστημόνων και ονομάζεται **Αρχή διατήρησης της ορμής**. Η αρχή αυτή δεν περιορίζεται σε απλές περιπτώσεις, όπως αυτή που εξετάσαμε στο παράδειγμα, αλλά επεκτείνεται και σε περιοχές όπως η Πυρηνική Φυσική, όπου πυρήνες βομβαρδίζονται με σωματίδια όπως τα πρωτόνια ή τα νετρόνια.

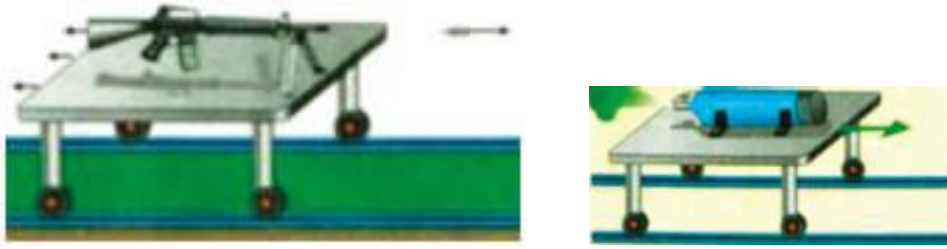
Στη Φυσική ισχύουν και άλλες αρχές όπως π.χ. η αρχή διατήρησης της ενέργειας, του ηλεκτρικού φορτίου, κ.τ.λ.

#### 4.3.1 Η Αρχή Κίνησης των Πυραύλων

Την αρχή διατήρησης της ορμής μπορούμε να τη χρησιμοποιήσουμε στην κίνηση των πυραύλων. Ας θεωρήσουμε το αυτόματο όπλο που βρίσκεται πάνω σε ένα βαγόνι το οποίο μπορεί να κινηθεί χωρίς τριβές πάνω σε οριζόντιες σιδηροτροχιές (Σχ. 48).

Αν εκτοξευθεί ένα βλήμα, το όλο σύστημα θα κινηθεί σε αντίθετη κατεύθυνση, ώστε η αρχικά μηδενική ορμή του συστήματος να διατηρηθεί. Αν ενεργοποιήσουμε το μηχανισμό της συνεχούς εκτόξευσης βλημάτων το βαγόνι με το όπλο θα αρχίσει να κινείται με ταχύτητα που συνεχώς αυξάνεται. Τι νομίζετε ότι θα συμβεί αν πάνω στο βαγόνι, αντί για το όπλο τοποθετήσουμε μία φιάλη που περιέχει αέρα υπό πίεση και ανοίξουμε τη στρόφιγγα; Σε αναλογία με το πυροβόλο όπλο μπορούμε να πούμε ότι το σύστημα βαγόνι - φιάλη επιταχύνεται επειδή "μοριακές σφαίρες" εκτοξεύονται σε αντίθετη κατεύθυνση (Σχ. 48).

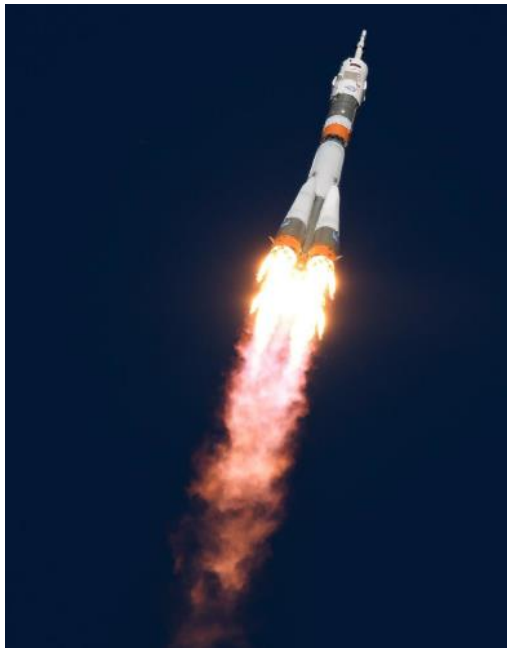
Τα παραδείγματα αυτά μας βοηθούν να κατανοήσουμε τον τρόπο με τον οποίο κινούνται οι πύραυλοι. Πρέπει όμως να επισημάνουμε, ότι τα αέρια που εξέρχονται από το ακροφύσιο του πυραύλου δεν είναι αποθηκευμένα υπό πίεση μέσα σ' αυτόν αλλά προέρχονται από την καύση ειδικού μίγματος.



Σχήμα 48: Κινούμενο Βαγόνι με Όπλο

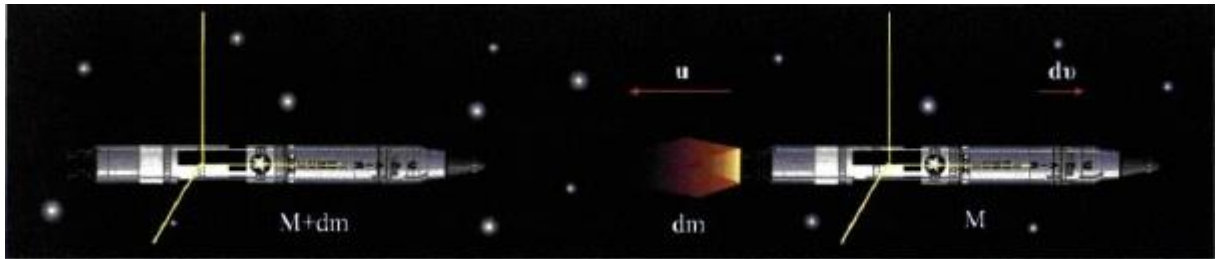
### Πρώθηση Πυραύλου

Στην περίπτωση των πυραύλων και των αεριωθούμενων αεροπλάνων τα καυσαέρια ωθούνται προς τα πίσω με δύναμη  $F$  που ασκείται σ' αυτά από τα τοιχώματα του χώρου καύσης. Σύμφωνα με την δράσης αντίδρασης και τα καυσαέρια ωθούν το πύραυλο ή το αεροπλάνο προς τα εμπρός με προωστική δύναμη  $F'$  αντίθετη της  $F$ . Ας υποθέσουμε ότι εξετάζουμε έναν πύραυλο που κινείται στο διάστημα (μακριά από κάθε βαρυτική έλξη). Θα εφαρμόσουμε την ΑΔΟ ως προς το σύστημα αναφοράς του κέντρου μάζας. Εφόσον δεν ασκούνται εξωτερικές δυνάμεις το κέντρο μάζας (άρα και το σύστημα αναφοράς μας) δε θα μεταβάλλει την κινητική του κατάσταση, ανεξάρτητα με οποιαδήποτε μεταβολή συμβεί στην κινητική κατάσταση των τμημάτων που απαρτίζουν το σύστημα.



Σχήμα 49: Διαστημικός Φορέας-Πύραυλος Soyuz

Ο πύραυλος κάποια χρονική στιγμή έχει μάζα  $M + dm$  και μηδενική ταχύτητα ως προς το σύστημα αναφοράς που επιλέξαμε. Ο πύραυλος, σε ένα πολύ μικρό χρονικό διάστημα  $dt$ , εκτοξεύει προς τα πίσω μια ποσότητα καυσαερίων  $dm$  με ταχύτητα  $u$  ως προς το κέντρο μάζας. Πρακτικά η ταχύτητα αυτή είναι και η ταχύτητα των καυσαερίων ως προς τον πύραυλο. Ο πύραυλος τώρα έχει αυξήσει την ταχύτητά του σε σχέση με πριν κατά  $du$  και η μάζα του έχει ελαττωθεί κατά  $dm$ . Ως προς το κέντρο μάζας του συστήματος κινείται με  $du$  προς τα μπροστά. (Σχ.50).



**Σχήμα 50: Προώθηση Πυραύλου**

Εφόσον το σύστημα είναι μονωμένο εφαρμόζουμε την αρχή διατήρησης της ορμής με τις ταχύτητες να αναφέρονται όλες στο σύστημα αναφοράς του κέντρου μάζας.

$$p_{\text{πριν}} = p_{\text{μετά}} \quad \text{άρα } 0 = -dmu + Mdv$$

Θέλουμε τώρα να υπολογίσουμε την προωστική δύναμη που δέχεται ο πύραυλος . Από την τελευταία εξίσωση προκύπτει:

$$Mdv = dm u$$

$$M \frac{dv}{dt} = u \frac{dm}{dt}$$

$$Ma = u \frac{dm}{dt}$$

$$F = u \frac{dm}{dt}$$

Όπου  $\frac{dm}{dt}$  ο ρυθμός με τον οποίο εκτοξεύονται τα καυσαέρια του πυραύλου.

#### Παράδειγμα 4-2

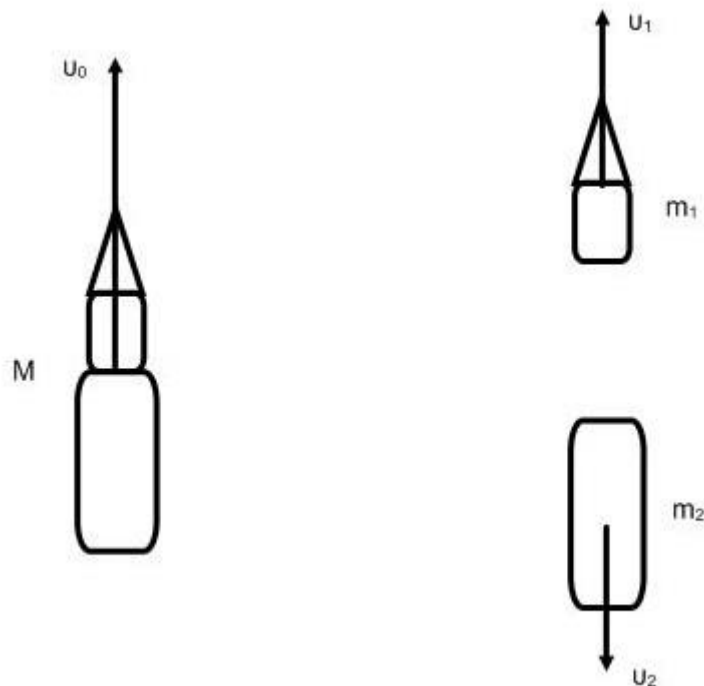
Ένας πύραυλος μάζας  $M = 4 \cdot 10^4$  kg, κινείται ευθύγραμμα, σε περιοχή ασήμαντης βαρύτητας, με σταθερή ταχύτητα μέτρου  $u_0 = 200$  m / s . Ξαφνικά, με μια έκρηξη ο πύραυλος χωρίζεται σε δύο κομμάτια με μάζες  $m_1$  και  $m_2$  για τις οποίες ισχύει  $m_1 = 3 \cdot m_2$ . Το πρώτο, κομμάτι μάζας  $m_1$  , αμέσως μετά την έκρηξη έχει ταχύτητα μέτρου  $u_1 = 400$  m / s, στην ίδια κατεύθυνση με την αρχική ταχύτητα  $u_0$ . Να προσδιορίσετε:

- I) Την ταχύτητα  $u_2$  του δεύτερου κομματιού.
- II) Τη μεταβολή ορμής  $\Delta P_1$  και  $\Delta P_2$  του κάθε κομματιού εξαιτίας της έκρηξης. Τι παρατηρείτε;
- III) Την ενέργεια που ελευθερώθηκε λόγω της έκρηξης.
- IV) Αν υποθέσετε ότι η έκρηξη, δηλαδή η διάσπαση του πυραύλου στα δύο κομμάτια του διαρκεί χρονικά  $\Delta t = 0,2$  s, να προσδιορίσετε τη μέση δύναμη που δέχτηκε κάθε ένα από τα δύο κομμάτια στα οποία χωρίστηκε ο πύραυλος κατά τη διάρκεια της κρούσης.

#### Λύση

I)

Για τις μάζες ισχύει  $m_1 = 3 \cdot m_2$  και  $m_1 + m_2 = M$ ,  
 άρα  $3 \cdot m_2 + m_2 = M \Rightarrow$   
 $4 \cdot m_2 = M \Rightarrow 4 \cdot m_2 = 4 \cdot 10^4$   
 άρα  $m_2 = 10^4 \text{ kg}$  και  $m_1 = 3 \cdot 10^4 \text{ kg}$ .



Επειδή ο πύραυλος κινείται σε περιοχή ασήμαντης βαρύτητας, οι μόνες δυνάμεις που αναπτύσσονται είναι οι δυνάμεις κατά την έκρηξη που είναι εσωτερικές, το σύστημα είναι μονωμένο άρα θα ισχύει η Αρχή Διατήρησης της Ορμής:

$$P_{\text{πριν}} = P_{\text{μετά}} \Rightarrow M \cdot u_0 = m_1 \cdot u_1 + m_2 \cdot u_2 \Rightarrow$$

$$\Rightarrow 4 \cdot 10^4 \cdot 200 = 3 \cdot 10^4 \cdot 400 + 10^4 \cdot u_2 \Rightarrow$$

$$800 = 1200 + u_2 \Rightarrow$$

$$u_2 = -400 \text{ m/s}.$$

Το (-) δείχνει ότι το δεύτερο κομμάτι του δορυφόρου θα κινηθεί με ταχύτητα αντίθετης φοράς της αρχικής.

II)

Η μεταβολή της ορμής του  $m_1$  κομματιού:

$$\Delta P_1 = P_{1,\text{τελ}} - P_{1,\text{αρχ}} \Rightarrow$$

$$\Delta P_1 = m_1 \cdot u_1 - m_1 \cdot u_0 \Rightarrow$$

$$\Delta P_1 = m_1 \cdot (u_1 - u_0) \Rightarrow$$

$$\Delta P_1 = 3 \cdot 10^4 \cdot (400 - 200) \Rightarrow$$

$$\Delta P_1 = 600 \cdot 10^4 \text{ kg} \cdot \text{m/s}.$$

Η μεταβολή της ορμής του  $m_2$  κομματιού:

$$\Delta P_2 = P_{2,\text{τελ}} - P_{2,\text{αρχ}} \Rightarrow$$

$$\Delta P_2 = m_2 \cdot u_2 - m_2 \cdot u_0 \Rightarrow$$

$$\Delta P_2 = m_2 \cdot (u_2 - u_0) \Rightarrow$$

$$\Delta P_2 = 10^4 \cdot (-400 - 200) \Rightarrow$$

$$\Delta P_2 = -600 \cdot 10^4 \text{ kg} \cdot \text{m/s}.$$

Παρατηρούμε ότι οι μεταβολές της ορμής των δύο σωμάτων είναι αντίθετες, πράγμα που είναι αναμενόμενο λόγω της διατήρησης ορμής του συστήματος.

III)

Η ολική αρχική κινητική ενέργεια του συστήματος:

$$K_{ολ,αρχ} = \frac{1}{2} \cdot M \cdot u_0^2 \Rightarrow$$

$$K_{ολ,αρχ} = \frac{1}{2} \cdot 4 \cdot 10^4 \cdot 200^2 \Rightarrow$$

$$K_{ολ,αρχ} = 8 \cdot 10^8 \text{ joule .}$$

Η ολική τελική κινητική ενέργεια του συστήματος:

$$K_{ολ,τελ} = \frac{1}{2} \cdot m_1 \cdot u_1^2 + \frac{1}{2} \cdot m_2 \cdot u_2^2 \Rightarrow$$

$$K_{ολ,τελ} = \frac{1}{2} \cdot 3 \cdot 10^4 \cdot 400^2 + \frac{1}{2} \cdot 10^4 \cdot 400^2 \Rightarrow$$

$$K_{ολ,τελ} = 32 \cdot 10^8 \text{ joule .}$$

Επομένως η ενέργεια που ελευθερώθηκε λόγω έκρηξης E θα είναι:

$$E = K_{ολ,τελ} - K_{ολ,αρχ} \Rightarrow$$

$$E = 32 \cdot 10^8 - 8 \cdot 10^8 \Rightarrow$$

$$E = 24 \cdot 10^8 \text{ joule .}$$

IV)

Από τον 2ο γενικευμένο νόμο του Newton:

$$\Sigma F = \Delta P / \Delta t \Rightarrow$$

$$\Sigma F = 600 \cdot 10^4 / 2 \cdot 10^{-1} \Rightarrow$$

$$\Sigma F = 3 \cdot 10^7 \text{ N .}$$

### Ασκήσεις

5. Ένας πύραυλος συνολικής μάζας  $M = 1.000\text{kg}$  κινείται κατακόρυφα απομακρυνόμενος από τη Γη. Κάποια στιγμή και ενώ η ταχύτητά του είναι  $u = 500\text{m/s}$ , ο πύραυλος διαχωρίζεται σε δύο κομμάτια. Το ένα κομμάτι έχει μάζα  $m_1 = 800\text{kg}$  και η ταχύτητά του αμέσως μετά τη διάσπαση είναι  $u_1 = 1.000\text{m/s}$ , ίδιας κατεύθυνσης με αυτήν της ταχύτητας  $u$ . Να βρείτε την ταχύτητα που έχει το άλλο κομμάτι αμέσως μετά τη διάσπαση.

#### 4.4 Βαρυτικό Πεδίο

Δύο σώματα με πολύ μικρές διαστάσεις (σημειακές μάζες), που έχουν μάζες  $m_1$  και  $m_2$  και βρίσκονται σε απόσταση  $r$  μεταξύ τους, έλκονται με δύναμη που έχει μέτρο

$$F = G \frac{m_1 m_2}{r^2} \quad (4-13)$$

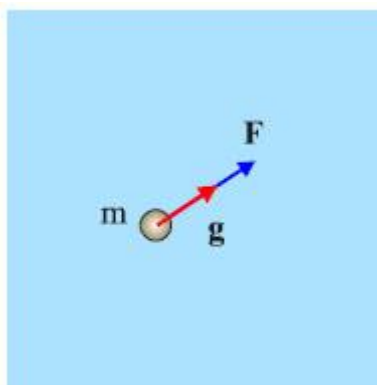
όπου  $G$  η σταθερά της παγκόσμιας έλξης,  $G = 6,673 \times 10^{-13} \text{ N}\cdot\text{m}^2 / \text{kg}^2$ . Η δύναμη αυτή, όπως και η δύναμη Coulomb, είναι **διατηρητική και κεντρική**. Κεντρικές λέγονται οι δυνάμεις που ασκούνται μεταξύ δύο σωμάτων και των οποίων ο φορέας συμπίπτει με την ευθεία που ενώνει τα κέντρα μάζας των σωμάτων.



**Σχήμα 51:** Δυο σημειακές μάζες που απέχουν απόσταση  $r$  έλκονται με δύναμη που είναι ανάλογη του γινομένου των μαζών και αντίστροφα ανάλογη του τετραγώνου της απόστασής τους.

Η παραπάνω σχέση δίνει και τη δύναμη που αναπτύσσεται μεταξύ δύο ομογενών σφαιρικών μαζών  $m_1$  και  $m_2$ . Στην περίπτωση αυτή απόσταση  $r$  είναι η απόσταση μεταξύ των κέντρων των σφαιρών και οι ελκτικές δυνάμεις έχουν σημεία εφαρμογής τα κέντρα των σφαιρών. Η έλξη ανάμεσα σε δύο σώματα, με αίτιο το ότι έχουν μάζα, είναι δύναμη από απόσταση. Η αλληλεπίδραση μεταξύ μαζών περιγράφεται με την έννοια του πεδίου. Κάθε μάζα δημιουργεί γύρω της πεδίο. Αν κάποια μάζα βρεθεί μέσα στο πεδίο, το πεδίο της ασκεί δύναμη. Το πεδίο που δημιουργείται από μάζες ονομάζεται βαρυτικό πεδίο ή πεδίο βαρύτητας. **Βαρυτικό πεδίο ονομάζεται ο χώρος εκείνος στον οποίο κάθε μάζα δέχεται δύναμη.**

Για την περιγραφή του βαρυτικού πεδίου χρησιμοποιούμε τα μεγέθη ένταση και δυναμικό.



**Σχήμα 52:** Εάν σ' ένα σημείο του χώρου που καταλαμβάνει το βαρυτικό πεδίο βρεθεί μια μάζα  $m$  θα δεχθεί δύναμη. Η δύναμη είναι πάντα ομόρροπη της έντασης

Ένταση ( $g$ ) του πεδίου βαρύτητας σε ένα του σημείο ονομάζουμε το σταθερό πηλίκο της δύναμης ( $F$ ) που θα δεχτεί μια μάζα ( $m$ ) αν φορτίζονται με φορτία  $+Q$  και  $-Q$ .

$$g = \frac{F}{m} \quad (4-14)$$

Η ένταση έχει την ίδια κατεύθυνση με τη δύναμη. Μονάδα της έντασης είναι το 1N/kg ή 1m/s<sup>2</sup>, δηλαδή μετριέται σε μονάδες επιτάχυνσης.

Η επιτάχυνση που θα αποκτήσει ένα σώμα αν αφεθεί ελεύθερο στο πεδίο βαρύτητας είναι

$$a = \frac{F}{m}$$

και από τη (1-14) προκύπτει ότι  $g = a$ , επομένως:

Στο πεδίο βαρύτητας, η ένταση του πεδίου σε ένα σημείο ταυτίζεται με την επιτάχυνση που θα αποκτήσει ένα σώμα αν αφεθεί ελεύθερο σε εκείνο το σημείο. Το πεδίο βαρύτητας, όπως και το ηλεκτροστατικό πεδίο, είναι διατηρητικό. Επομένως για την περιγραφή του είναι χρήσιμο το μέγεθος δυναμικό που ορίζεται με τρόπο ανάλογο. Συγκεκριμένα:

Δυναμικό (V) του πεδίου βαρύτητας, σε ένα του σημείο A, ονομάζεται το σταθερό πηλίκο του έργου της δύναμης του πεδίου, όταν μεταφέρεται μάζα m από το σημείο A στο άπειρο, προς τη μάζα αυτή.

$$V_A = \frac{V_{A \rightarrow \infty}}{m}$$

Μονάδα δυναμικού του βαρυτικού πεδίου είναι το 1J/kg

Διαφορά δυναμικού μεταξύ δύο σημείων A και B του πεδίου βαρύτητας ονομάζεται το πηλίκο του έργου της δύναμης του πεδίου, κατά τη μετακίνηση μιας μάζας m από το σημείο A στο σημείο B, προς τη μάζα αυτή.

$$V_A - V_B = \frac{V_{A \rightarrow B}}{m}$$

Η διαφορά δυναμικού εκφράζει το έργο της δύναμης του πεδίου ανά μονάδα μάζας κατά τη μετακίνηση μιας μάζας από το σημείο A στο σημείο B.

#### 4.4.1 Το πεδίο που δημιουργείται από σημειακή μάζα

##### Η ένταση βαρυτικού πεδίου

Έστω μια σημειακή μάζα M. Για να βρούμε την ένταση του βαρυτικού πεδίου που δημιουργεί η μάζα M σε σημείο A που απέχει απόσταση r απ' αυτήν, τοποθετούμε στο σημείο αυτό μάζα m. Η μάζα m δέχεται από την μάζα M δύναμη:

$$F = G \frac{Mm}{r^2} \quad (4-15)$$

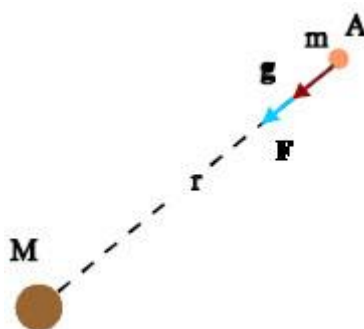
Η ένταση του πεδίου στο σημείο A είναι

$$g = \frac{F}{m} \quad (4-16)$$

Αντικαθιστώντας την (4-15) στην (4-16) έχουμε

$$g = G \frac{M}{r^2} \quad (4-17)$$





Σχήμα 53: Η ένταση του πεδίου που δημιουργεί η σημειακή μάζα M έχει σε κάθε σημείο κατεύθυνση προς τη μάζα.



Σχήμα 54: Το σύστημα Γη-Σελήνη

Το δυναμικό του βαρυτικού πεδίου που δημιουργεί η σημειακή μάζα M σε σημείο A, που απέχει απόσταση r από το υλικό σημείο, έχει τιμή

$$V_A = -G \frac{M}{r} \quad (4-18)$$

Η δυναμική ενέργεια συστήματος δύο υλικών σημείων με μάζες  $m_1, m_2$ , που απέχουν μεταξύ τους απόσταση r, είναι ίση με το έργο που απαιτείται για να μεταφερθούν οι μάζες από πολύ μακριά και να τοποθετηθούν στις θέσεις τους και είναι

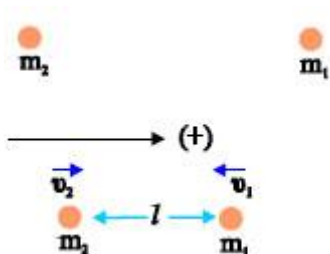
$$U = -G \frac{m_1 m_2}{r} \quad (4-19)$$

#### Παρατηρήσεις

1. Μια σφαιρική ομογενής μάζα M συμπεριφέρεται εξωτερικά σαν όλη η μάζα της να είναι συγκεντρωμένη στο κέντρο. Επομένως οι παραπάνω σχέσεις ισχύουν πανομοιότυπα και για την περιγραφή του βαρυτικού πεδίου ομογενούς σφαιρικού σώματος μάζας M ακτίνας R, υπό την προϋπόθεση ότι εξετάζουμε το πεδίο στο χώρο έξω από τη μάζα του σώματος ( $r \geq R$ ). Εδώ τις αποστάσεις τις μετράμε από το κέντρο του σφαιρικού σώματος
2. Το αρνητικό πρόσημο στη σχέση (19) υποδηλώνει ότι για να κάνουμε άπειρη την απόσταση δυο μαζών που βρίσκονται αρχικά σε απόσταση r πρέπει να προσφέρουμε ενέργεια στο σύστημα.

**Παράδειγμα 4-3**

Δύο σφαιρικές μάζες  $m_1$  και  $m_2$  ηρεμούν σε άπειρη απόσταση μεταξύ τους. Εξαιτίας της βαρυτικής δύναμης που ασκεί η μια στην άλλη αρχίζουν να κινούνται πλησιάζοντας μεταξύ τους. Αν κατά τη διάρκεια της κίνησής τους δεν ασκείται σε αυτές άλλη δύναμη, να βρείτε τις ταχύτητες των μαζών τη στιγμή που βρίσκονται σε απόσταση  $l$  μεταξύ τους. Δίνεται το  $G$ .



**Απάντηση:**

Εφόσον οι μάζες δε δέχονται άλλες δυνάμεις εκτός από τη μεταξύ τους ελκτική δύναμη, το σύστημά τους είναι απομονωμένο και η ορμή του διατηρείται. Αν θεωρήσουμε ως αρχική θέση τη θέση όπου οι μάζες ηρεμούν και ως τελική αυτή όπου οι μάζες απέχουν μεταξύ τους απόσταση  $l$  θα ισχύει:

$$P_{\text{αρχ}} = p_{\text{τελ}}$$

Θεωρώντας θετική την κατεύθυνση προς τα δεξιά, η παραπάνω σχέση γράφεται

$$0 = m_2 v_2 - m_1 v_1$$

Λύνοντας ως προς  $v_1$  έχουμε

$$v_1 = v_2 \frac{m_2}{m_1} \tag{4-20}$$

Το πεδίο βαρύτητας είναι διατηρητικό, δηλαδή η μηχανική ενέργεια του συστήματος διατηρείται σταθερή

$$U_{\text{αρχ}} + K_{\text{αρχ}} = U_{\text{τελ}} + K_{\text{τελ}}$$

$$0 = -G \frac{m_1 m_2}{l} + \frac{1}{2} m_1 v_1^2 + \frac{1}{2} m_2 v_2^2$$

αντικαθιστώντας τη  $v_1$  από την (20) βρίσκουμε

$$0 = -G \frac{m_1 m_2}{l} + \frac{1}{2} \frac{m_2^2}{m_1} v_2^2 + \frac{1}{2} m_2 v_2^2$$

Από τη σχέση αυτή προκύπτει

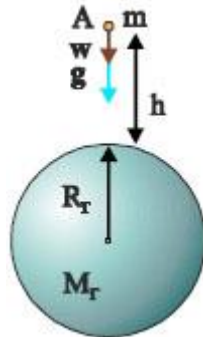
$$v_2 = m_1 \sqrt{\frac{2G}{l(m_1 + m_2)}}$$

και από την (20) βρίσκουμε

$$v_1 = m_2 \sqrt{\frac{2G}{l(m_1 + m_2)}}$$

#### 4.4.2 Το Βαρυτικό Πεδίο της Γης

Με ικανοποιητική προσέγγιση, μπορούμε να θεωρήσουμε τη Γη σαν μια ομογενή σφαίρα ακτίνας  $R_T = 6,38 \times 10^6 m$  και μάζας  $M_T = 5,98 \times 10^{24} kg$ . Το βαρυτικό πεδίο της Γης σε ένα σημείο A, στο εξωτερικό της θα περιγράφεται από τις σχέσεις (4-18) και (4-19) του πεδίου που δημιουργεί μια σημειακή μάζα.

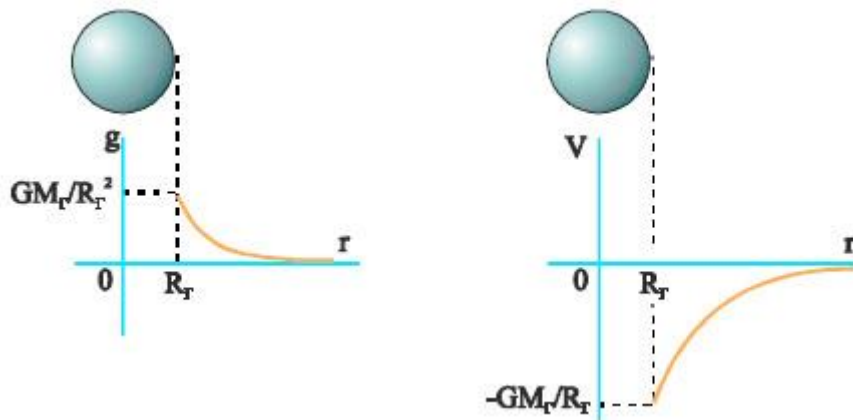


Σχήμα 55: Το σημείο A βρίσκεται σε ύψος h, πάνω από την επιφάνεια της Γης.

Επειδή συνήθως η θέση ενός σημείου στο πεδίο βαρύτητας της Γης προσδιορίζεται από το ύψος στο οποίο βρίσκεται το σημείο, είναι σκόπιμο στις σχέσεις αυτές να αντικαταστήσουμε την απόσταση r από το κέντρο της Γης με το άθροισμα  $R_T + h$  όπου h το ύψος του σημείου που μας ενδιαφέρει από την επιφάνεια της Γης. Έτσι οι σχέσεις που δίνουν την ένταση και το δυναμικό στο πεδίο βαρύτητας της Γης -πάντα αναφερόμαστε στον εξωτερικό της χώρο- είναι

$$g = G \frac{M_T}{r(R_T + h)^2} \quad (4-19)$$

$$V = -G \frac{M_T}{R_T + h} \quad (4-20)$$

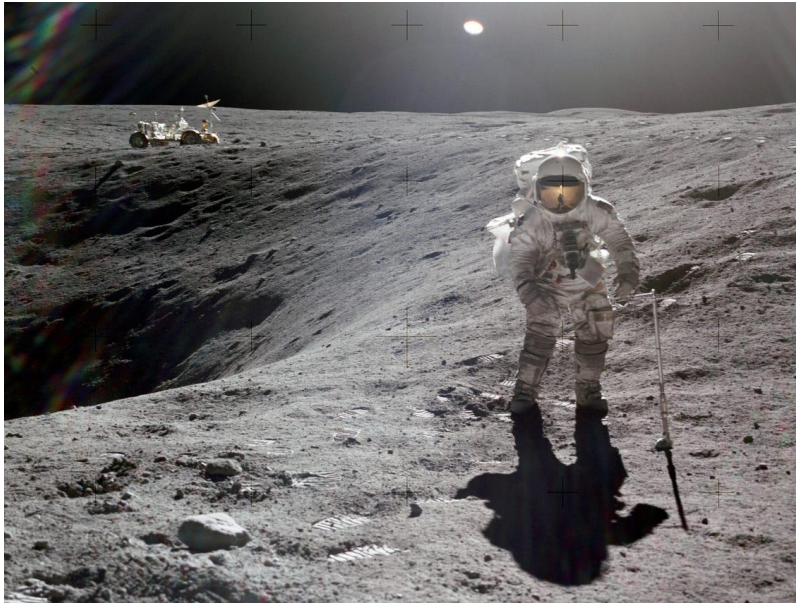


Σχήμα 56: Γραφικές παραστάσεις του μέτρου της έντασης και του δυναμικού σε συνάρτηση με την απόσταση από το κέντρο της Γης, για σημεία που βρίσκονται έξω από αυτή.

άν στη σχέση της έντασης (4-19) θέσουμε  $h = 0$  προκύπτει η ένταση του πεδίου βαρύτητας στην επιφάνεια της Γης

$$g = G \frac{M_T}{(R_T)^2}$$

Με αντικατάσταση των τιμών των μεγεθών βρίσκουμε  $g_0 = 9,8 m/s^2$



**Σχήμα 57:** Αστροναύτες στην επιφάνεια της Σελήνης. Παρά τον βαρύ εξοπλισμό τους (180 kg), μπορούν να κάνουν εντυπωσιακά άλματα. Στην επιφάνεια της Σελήνης η ένταση του βαρυτικού πεδίου είναι έξι φορές μικρότερη από αυτή στην επιφάνεια της Γης.

#### 4.4.3 Ταχύτητα Διαφυγής

Με ποια ταχύτητα πρέπει να εκτοξευθεί ένα αντικείμενο μάζας  $m$ , από την επιφάνεια της Γης ώστε να διαφύγει οριστικά από το πεδίο βαρύτητας της Γης; Για να απλουστεύσουμε το πρόβλημα θα θεωρήσουμε ότι η Γη δεν κινείται, θα αγνοήσουμε τις βαρυτικές επιδράσεις από τα άλλα ουράνια σώματα και θα αγνοήσουμε την αντίσταση του ατμοσφαιρικού αέρα. Εφόσον το βαρυτικό πεδίο είναι διατηρητικό η μηχανική ενέργεια του συστήματος των δύο σωμάτων (Γη και σώμα) διατηρείται. Επομένως κατά την κίνηση του σώματος μεταξύ δύο θέσεων θα ισχύει

$$U_1 + K_1 = U_2 + K_2 \quad (4-21)$$

Εφαρμόζουμε τη σχέση αυτή για ένα σημείο πάνω στην επιφάνεια της Γης και για το άπειρο (εκεί όπου δεν υπάρχει πλέον βαρυτική επίδραση και η δυναμική ενέργεια του συστήματος σώμα – Γη είναι μηδέν  $U_2 = 0$ ). Η ελάχιστη τιμή της ταχύτητας με την οποία πρέπει να εκτοξεύσουμε το σώμα είναι εκείνη για την οποία το σώμα θα φτάνει στο άπειρο με μηδενική ταχύτητα, άρα  $K_2=0$

Από την (4-21) έχουμε

$$U_1 + K_1 = 0 + 0 \text{ οπότε}$$

$$\frac{1}{2} m_2 v_\delta^2 + G \frac{M_\Gamma m}{R_\Gamma} = 0$$

Λύνοντας ως προς  $v_\delta$  βρίσκουμε

$$v_\delta = \sqrt{\frac{2GM_\Gamma}{R_\Gamma}} = 11.2 \frac{km}{s} = 40320 \text{ km/h}$$

Την ταχύτητα  $v_\delta$  την ονομάζουμε **ταχύτητα διαφυγής** από την επιφάνεια της Γης. Εάν το σημείο εκτόξευσης βρίσκεται σε ύψος  $h$  από την επιφάνεια της Γης με τον ίδιο τρόπο προκύπτει ότι η ταχύτητα διαφυγής δίνεται από τη σχέση:

$$v_\delta = \sqrt{\frac{2GM_\Gamma}{R_\Gamma + h}} \quad (4-22)$$

Ακολουθώντας την ίδια διαδικασία μπορούμε να βρούμε την ταχύτητα διαφυγής από την επιφάνεια άλλων ουράνιων σωμάτων. Έτσι για παράδειγμα για τη Σελήνη βρίσκουμε 2,37 km/s, για τον Άρη 4,97 km/s, για το Δία 59,1 km/s και για τον Ήλιο 618 km/s.

Προς το παρόν είναι αδύνατο να προσδώσουμε σε ένα σώμα αρχική κατακόρυφη ταχύτητα ίση με 11,2 km/s. Μπορούμε όμως με έναν πύραυλο να προσδώσουμε στο σώμα σταθερή επιτάχυνση  $a$  λίγο μεγαλύτερη από την επιτάχυνση  $g$  της βαρύτητας. Έτσι, η κατακόρυφη ταχύτητα του σώματος συνεχώς αυξάνεται, μέχρις ότου το σώμα αποκτήσει την ταχύτητα διαφυγής. Τότε καταργείται η προωστική δύναμη του πυραύλου και το σώμα κινείται στο αστρικό διάστημα με την ταχύτητα διαφυγής, σύμφωνα με την αρχή της αδράνειας. Το σώμα ελευθερώθηκε από την έλξη της Γης, αλλά κινείται μέσα στο πεδίο βαρύτητας του Ήλιου και των άλλων πλανητών. Έτσι, η τροχιά του θα είναι ευθύγραμμη.

Ένα συχνό λάθος που συμβαίνει είναι ότι πολλές φορές πιστεύεται πως η ταχύτητα διαφυγής είναι η ταχύτητα που πρέπει να έχει ένας πύραυλος ή ένα διαστημόπλοιο για να διαφύγει από την έλξη της Γης. Περαιτέρω σύγχυση μπορεί επίσης να προκαλέσει η παρατήρηση ότι οι πύραυλοι που εκτοξεύονται έχουν ταχύτητες πολύ μικρότερες από την ταχύτητα διαφυγής της Γης (που αντιστοιχεί σε περίπου 34 Μαχ), κι όμως καταφέρνουν να διαφύγουν στο διάστημα. Η πηγή του λάθους βρίσκεται στην κατανόηση της έννοιας της ταχύτητας διαφυγής. Η ταχύτητα διαφυγής είναι η αρχική ταχύτητα που πρέπει να δώσουμε σε ένα αντικείμενο ώστε αυτό να διαφύγει από την έλξη ενός ουράνιου σώματος. Αντιθέτως, οι πύραυλοι και τα διαστημόπλοια δεν εκτοξεύονται στο διάστημα, αλλά καίνε συνεχώς καύσιμα μέχρις ότου να διαφύγουν από την έλξη της Γης. Ένας πύραυλος μπορεί κάλλιστα να διαφύγει από την έλξη της Γης με ταχύτητες πολύ μικρότερες από την ταχύτητα διαφυγής της Γης, δεδομένου ότι η καύση λαμβάνει τόπο με τρόπο συνεχή και με επαρκώς ταχύ ρυθμό ώστε ο πύραυλος ή το διαστημόπλοιο να υπερνικά συνεχώς την βαρυτική έλξη της Γης.

#### Παράδειγμα 4-4

Από το σημείο Α του πεδίου βαρύτητας της Γης, που βρίσκεται σε ύψος  $h=R_\Gamma$  από την επιφάνεια της Γης ( $R_\Gamma$  η ακτίνα της Γης), βάλλεται προς το Διάστημα ένα σώμα με ταχύτητα  $v_0=16 \times 10^3$  m/s. Να εξετάσετε αν το σώμα θα διαφύγει από τη βαρυτική έλξη της Γης. Αν θα διαφύγει να βρείτε την ταχύτητά του όταν φτάσει σε πολύ μεγάλη απόσταση από τη Γη. Δίνονται: η ακτίνα της Γης  $R_\Gamma=6400$  km και η ένταση του πεδίου βαρύτητας στην επιφάνειά της  $g_0=10$  m/s<sup>2</sup>.

#### Απάντηση

α) Η ταχύτητα διαφυγής σε ύψος  $h$ , δίνεται από την σχέση

$$v_\delta = \sqrt{\frac{2GM_\Gamma}{R_\Gamma + h}} = \sqrt{\frac{2GM_\Gamma}{2R_\Gamma}} \quad (4-23)$$

Αν στη θέση του  $h$  βάλουμε την ακτίνα της Γης έχουμε

$$g_o = G \frac{M_\Gamma}{(R_\Gamma)^2}$$

Οπότε

$$GM_\Gamma = g_o R_\Gamma^2 \quad (4-24)$$

Αντικαθιστώντας την (24) στην (23) έχουμε

$$v_\delta = \sqrt{g_o R_\Gamma} = 8 \times 10^3 \text{ m/s}$$

Επειδή  $v_o > v_\delta$  το σώμα διαφεύγει.

β) Έστω  $u$  η ταχύτητα με την οποία το σώμα φτάνει στο άπειρο. Για τον υπολογισμό της θα εφαρμόσουμε το θεώρημα έργου – ενέργειας κατά την κίνηση του σώματος από το σημείο Α μέχρι το άπειρο

$$W = K_\infty - K_A \text{ οπότε}$$

$$(V_A - V_\infty)m = \frac{1}{2}mv^2 - \frac{1}{2}m v_o^2 \quad (4-25)$$

Είναι  $V_\infty = 0$  και

$$V_A = -\frac{GM_\Gamma}{2R_\Gamma}$$

Που λόγω της (25) γίνεται

$$V_A = -\frac{g_o R_\Gamma}{2}$$

Αντικαθιστώντας στην (25) έχουμε

$$-g_o R_\Gamma = v^2 - v_o^2$$

Επομένως

$$v = \sqrt{v_o^2 - g_o R_\Gamma} = 8\sqrt{3} \times 10^3 \text{ m/s}$$

### Ασκήσεις

6. Να υπολογιστεί η ένταση και το δυναμικό του πεδίου βαρύτητας της Γης σε ένα σημείο που βρίσκεται σε ύψος  $h=R_\Gamma$  από τη επιφάνειά της. Δίνονται η ακτίνα της Γης  $R_\Gamma = 6400 \text{ km}$  και η ένταση του πεδίου βαρύτητας στην επιφάνεια της Γης  $g_o=10 \text{ m/s}^2$ .  
[ Απ:  $2,5 \text{ m/s}^2$ ,  $-32 \times 10^6 \text{ J/kg}$  ]

7. Σώμα μάζας  $m$  εκτοξεύεται από την επιφάνεια της Γης κατακόρυφα προς τα πάνω με ταχύτητα  $v_o=103 \text{ m/s}$ . Υπολογίστε πόσο ψηλά θα φτάσει το σώμα. Δίνεται η ακτίνα της Γης

$R_T = 6400$  km και η ένταση του πεδίου βαρύτητας στην επιφάνεια της Γης  $g_0 = 10 \text{ m/s}^2$ . Η αντίσταση του αέρα δε λαμβάνεται υπόψη. [Απ: 50km]

8. Η μάζα της Γης είναι 81 φορές μεγαλύτερη από τη μάζα της Σελήνης και ο λόγος των ακτίνων τους είναι 11/3.

α) Αν η ένταση του πεδίου βαρύτητας στην επιφάνεια της Γης είναι  $g_0 = 10 \text{ N/kg}$  να υπολογιστεί η ένταση του πεδίου βαρύτητας στην επιφάνεια της Σελήνης.

β) Ένα σώμα έχει στην επιφάνεια της Γης βάρος 700 N. Ποιο θα είναι το βάρος του στην επιφάνεια της Σελήνης;

9. Από διαστημική εξέδρα που βρίσκεται σε ύψος  $h$  από την επιφάνεια της Γης θέλουμε να εκτοξεύσουμε διαστημόπλοιο ώστε να εγκαταλείψει το πεδίο βαρύτητας της Γης. Να βρεθεί η ελάχιστη ταχύτητα που πρέπει να δώσουμε στο διαστημόπλοιο. Αγνοήστε τις επιδράσεις των άλλων ουράνιων σωμάτων πλην της Γης. Δίνονται η ακτίνα της Γης  $R_T$  και η ένταση του πεδίου βαρύτητας στην επιφάνειά της  $g_0$ .

$$[\text{Απ: } v_{\delta} = \sqrt{\frac{2g_0 R_T^2}{R_T + h}}]$$

10. Να βρείτε την ταχύτητα διαφυγής ενός σώματος από την επιφάνεια πλανήτη με μάζα  $m = M_T/8$  και πυκνότητα ίση με αυτή της Γης. Η ταχύτητα διαφυγής από τη Γη είναι  $u = 11,2$  km/s. Η Γη και ο πλανήτης να θεωρηθούν ομογενείς ακίνητες σφαίρες. Ο όγκος μιας σφαίρας δίνεται από τη σχέση  $V = (4/3)\pi R^3$

$$[\text{Απ: } 5,6 \text{ km/s}]$$

11. Η ταχύτητα με την οποία φτάνει ένας μετεωρίτης στη Γη μπορεί να εκτιμηθεί από το μέγεθος του κρατήρα που θα ανοίξει κατά την πρόσκρουσή του στην επιφάνεια της Γης. Από το μέγεθος ενός τέτοιου κρατήρα εκτιμάμε ότι ένας μετεωρίτης έφτασε στην επιφάνεια της Γης με ταχύτητα  $u = 65.000 \text{ km/h}$ . Υπολογίστε την ταχύτητα που είχε ο μετεωρίτης όταν έμπαινε στα όρια της βαρυτικής επίδρασης της Γης. Θεωρήστε τις τριβές που αναπτύσσονται κατά την κίνηση του μετεωρίτη στην ατμόσφαιρα της Γης αμελητέες και αγνοήστε την επίδραση των άλλων ουράνιων σωμάτων, πλην της Γης, στην κίνησή του. Δίνονται  $R_T = 6400$  km, και  $g_0 = 10 \text{ m/s}^2$ .

$$[\text{Απ: } 14 \times 10^3 \text{ m/s}]$$

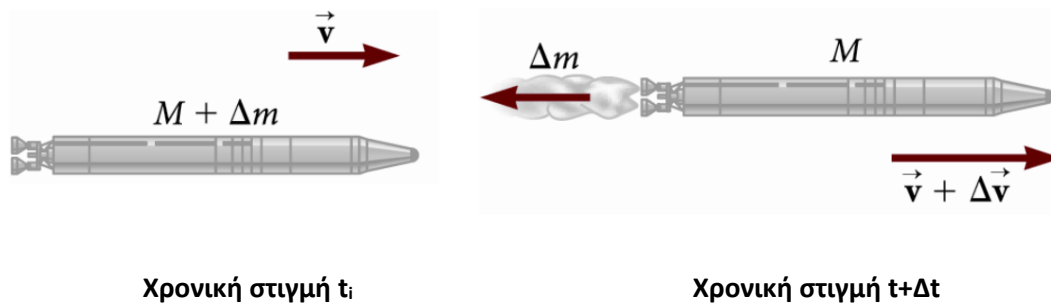
12. Δύο μικρές σφαίρες με μάζες  $m_1 = m$  και  $m_2 = 2m$  βρίσκονται σε απόσταση  $l$  μεταξύ τους και έξω από οποιοδήποτε πεδίο βαρύτητας. Να βρεθεί το σημείο του χώρου στο οποίο η ένταση του βαρυτικού πεδίου που δημιουργούν οι σφαίρες είναι μηδέν και στη συνέχεια να υπολογισθεί γι' αυτό το σημείο το δυναμικό του βαρυτικού πεδίου. Δίνεται η σταθερά παγκόσμιας έλξης  $G$ .

$$[\text{Απ: } x = l(\sqrt{2} - 1) \text{ από την } m_1, -\frac{Gm}{l}(2\sqrt{2} + 4)]$$

## Κεφάλαιο 5

### Αρχή Λειτουργίας Πυραύλων

Η λειτουργία ενός πυραύλου εξαρτάται από τον νόμο διατήρησης της ορμής όπως αυτός εφαρμόζεται σε απομονωμένα συστήματα, όπου το σύστημα είναι ο πύραυλος μαζί με τα καύσιμα που αποβάλλονται με τη μορφή καυσαερίων στο διάστημα. Όταν ο πύραυλος κινείται στο διάστημα, η ορμή του μεταβάλλεται καθώς ένα μέρος της μάζας του αποβάλλεται με τη μορφή καυσαερίων. Τα καυσαέρια έχουν ορμή όταν αποβάλλονται από τον κινητήρα, οπότε ο πύραυλος δέχεται μια αντισταθμιστική ορμή προς την αντίθετη κατεύθυνση. Στο διάστημα, το κέντρο μάζας του συστήματος κινείται ομαλά. Στην παράγραφο παρακάτω θα επεκτείνουμε την ανάλυση που ξεκινήσαμε για την κίνηση του πυραύλου με την βοήθεια της ΑΔΟ και μελετώντας το πύραυλο/εκτοξευτή ως σώμα με μεταβαλλόμενη μάζα.



Σχήμα 58: Κίνηση Πυραύλων με Μεταβαλλόμενη Μάζα

Για την ανάλυση της κίνησης του πυραύλου θεωρούμε ότι ο πύραυλος έχει αρχική μάζα  $M$  και εκτοξεύει μάζα με ταχύτητα  $v_{εκτ}$  σχετικά με τον πύραυλο και ότι το σύστημα πύραυλος-εξάτμιση είναι απομονωμένο. Ξέρουμε λοιπόν για το σύστημα ότι:

$$\frac{d\vec{p}}{dt} = 0, p = \text{σταθερό}$$

Τη χρονική στιγμή  $t$ , η αρχική μάζα του πυραύλου μαζί με τα καύσιμά του είναι  $M + \Delta m$  και το μέτρο της ταχύτητάς του είναι  $v$ . Η αρχική ορμή του συστήματος είναι

$$P_i = (M + \Delta m)v$$

Τη χρονική στιγμή  $t + \Delta t$ , η μάζα του πυραύλου έχει μειωθεί σε  $M$  και μια ποσότητα  $\Delta m$  των καυσίμων του έχει εκτοξευτεί στο διάστημα. Το μέτρο της ταχύτητας του πυραύλου έχει αυξηθεί κατά  $\Delta v$ .

Εφαρμόζοντας διατήρηση της ορμής έχουμε:

$$\begin{aligned} p_i &= p_f \Rightarrow (M + \Delta m)v = M(v + \Delta v) + \Delta m(v - v_{εκτ}) \\ &\Rightarrow Mv + v\Delta m = Mv + M\Delta v + v\Delta m - v_{εκτ}(\Delta m) \\ &\Rightarrow M\Delta v = v_{εκτ} \Delta m \end{aligned}$$



Έστω τώρα ότι  $\Delta t \rightarrow 0$  τότε  $\Delta m \rightarrow dm$  και  $\Delta M \rightarrow dM$  ενώ  $dm = -dM$

Για  $\Delta t \rightarrow 0$

$$\Rightarrow Mdv = -v_{εκτ} dM \Rightarrow dv = -v_{εκτ} (dM/M)$$

$$\int_{v_i}^{v_f} dv = -v_{εκτ} \int_{M_i}^{M_f} \frac{dM}{M}$$

$$v_f - v_i = -v_{εκτ} \ln(M) \Big|_{M_i}^{M_f}$$

$$v_f = v_i - v_{εκτ} (\ln M_f - \ln M_i)$$

$$v_f = v_i + v_{εκτ} \left( \ln \frac{M_i}{M_f} \right) \quad (5-1)$$

Απειρίζεται καθώς το  $M_f \rightarrow 0$

Η αύξηση του μέτρου της ταχύτητας του πυραύλου είναι ανάλογη προς το μέτρο της ταχύτητας  $v_{εκτ}$  των καυσαερίων του. Άρα, η ταχύτητα των καυσαερίων θα πρέπει να έχει πολύ μεγάλη τιμή. Η αύξηση του μέτρου της ταχύτητας του πυραύλου είναι ανάλογη προς τον φυσικό λογάριθμο του λόγου  $M_i/M_f$ . Συνεπώς, ο λόγος αυτός θα πρέπει να έχει όσο το δυνατόν μεγαλύτερη τιμή. Δηλαδή, η μάζα του πυραύλου χωρίς τα καύσιμα πρέπει να είναι όσο το δυνατόν μικρότερη και ο πύραυλος πρέπει να μεταφέρει όσο το δυνατόν περισσότερα καύσιμα.

Από την σχέση (5-1) μπορούμε να βρούμε ότι:

- Αν η αρχική μάζα του πυραύλου είναι  $M = 10 \times m$  τότε  $v = 2.3v_{εκτ}$
- Αν η μάζα είναι  $M = 100 \times m$  τότε  $v = 4.6v_{εκτ}$

Το κέρδος σε ταχύτητα είναι πολύ μικρό μεγαλώνοντας τη μάζα του πυραύλου.

### Ώση

Η ώση, ή προωστική δύναμη, που δέχεται ο πύραυλος είναι η δύναμη που ασκούν σε αυτόν τα καυσαέρια.

$$\dot{\Omega}ση = M \frac{dv}{dt} = \left| v_{εκτ} \frac{dM}{dt} \right|$$

Η ώση αυξάνεται όσο αυξάνεται η ταχύτητα των καυσαερίων. Η ώση αυξάνεται όσο αυξάνεται ο ρυθμός μεταβολής της μάζας. Ο ρυθμός μεταβολής της μάζας ονομάζεται ρυθμός καύσης.

### Παράδειγμα 5-1

Ένας πύραυλος έχει αρχικά μάζα  $m_0 = 2 \times 10^4$  kg, ρυθμό αποβολής αερίων  $dm/dt = -100$  Kg/s και ταχύτητα αποβολής αερίων ως προς τον πύραυλο σταθερή, με μέτρο 980 m/s. Ο πύραυλος πυροδοτείτε κατακόρυφα από την επιφάνεια της Γης. Μετά πόσο χρόνο από την πυροδότησή του θα αφήσει το έδαφος; Αγνοήστε την δύναμη που ασκεί το έδαφος στον πύραυλο. ( $g = 9.8 \text{ m/s}^2$ )

$$m \frac{d\vec{V}}{dt} = m\vec{g} + \vec{v}_{exh} \frac{dm}{dt}$$

Για να αφήσει το έδαφος πρέπει:

$$m \frac{d\vec{V}}{dt} \geq 0, \quad m\vec{g} + \vec{v}_{exh} \frac{dm}{dt} \geq 0$$

ή

$$m\vec{g} + \vec{v}_{exh} (-\alpha) \geq 0 \quad (5-2)$$

$$m\vec{g} + \vec{v}_{exh} (-\alpha) \geq 0$$

Όπου

$$\frac{dm}{dt} = -\alpha, \text{ όπου } \alpha \text{ θετική σταθερά}$$

$$dm = -\alpha dt$$

$$\int_{m_0}^m dm = -\alpha \int_0^t dt \rightarrow m = m_0 - \alpha t \quad (5-3)$$

Αντικαθιστώντας την σχέση (5-3) στην (5-2) έχουμε:

$$(m_0 - \alpha t)\vec{g} + \vec{v}_{exh} (-\alpha) \geq 0$$

$$-(m_0 - \alpha t)g + \alpha v_{exh} \geq 0$$

$$\alpha g t \geq m_0 g - \alpha v_{exh}$$

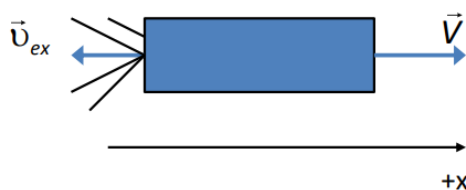
$$t \geq \frac{m_0}{\alpha} - \frac{v_{exh}}{g}$$

$$t \geq 100s$$

### Παράδειγμα 5-2

Πύραυλος που βρίσκεται στο διάστημα, όπου η βαρύτητα θεωρείται αμελητέα, αρχικά ηρεμεί ως προς αδρανειακό σύστημα αναφοράς. Την χρονική στιγμή  $t_0=0$  τίθεται σε λειτουργία το σύστημα πυροδότησης του.

α) ποιο ποσοστό της αρχικής του μάζας αποτελούν τα αέρια που θα έχουν αποβληθεί όταν το μέτρο της ταχύτητας του πυραύλου γίνει ίσο με το μέτρο της ταχύτητας εκπομπής των αερίων ως προς τον πύραυλο; (Θεωρούμε ότι η ταχύτητα εκπομπής των αερίων ως προς τον πύραυλο παραμένει σταθερή) β) Έστω ότι η αρχική μάζα των καυσίμων είναι  $m_{OK}=49m_{OP}$ , όπου  $m_{OP}$  η μάζα του πυραύλου χωρίς καύσιμα και η ταχύτητα εκπομπής αερίων ως προς τον πύραυλο είναι  $v_{ex}=3 \times 10^3 m/s$ . Ποια η τελική ταχύτητα που θα αποκτήσει ο πύραυλος;



α)

$$F_{ext} = m \frac{d\vec{V}}{dt} - \vec{v}_{exh} \frac{dm}{dt}$$

$$\vec{F}_{ext} = 0$$

$$m \frac{dV}{dt} = \vec{v}_{exh} \frac{dm}{dt}$$

$$m dV = \vec{v}_{exh} dt$$

$$dV = \vec{v}_{exh} \frac{dm}{m}$$

$$\int_0^{\vec{V}} dV = v_{exh} \int_{m_0}^m \frac{dm}{m} \rightarrow V = \vec{v}_{exh} \ln \frac{m}{m_0} \quad (5-4)$$

Όπου η σχέση (5-4) είναι η 'εξίσωση Tsiolkovsky' που ορίζει τον θεμελιώδη νόμο της πυραυλικής προώθησης/κίνησης.

Κατά τον άξονα x:

$$V = -v_{exh} \ln \frac{m}{m_0} = v_{exh} \ln \frac{m_0}{m}$$

Όταν  $V = v_{exh}$  τότε:

$$v_{exh} = v_{exh} \ln \frac{m_0}{m}$$

$$\ln \frac{m_0}{m} = 1$$

$$e^1 = \frac{m_0}{m}$$

$m_0$  : αρχική μάζα του πυραύλου,  $m$  η μάζα του πυραύλου τη χρονική στιγμή που  $V=v_{exh}$ .  
Επομένως το ποσοστό της αρχικής μάζας του πυραύλου που θα αποτελούν τα αέρια που έχουν αποβληθεί τότε θα είναι:

$$\frac{m_0 - m}{m_0} = 1 - \frac{1}{e} = \frac{e - 1}{e}$$

β)

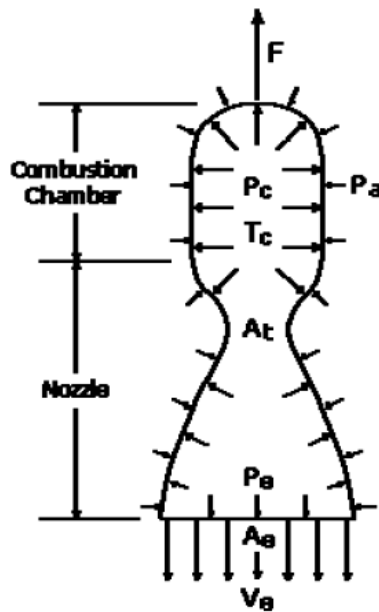
$$\vec{V}_{τελ} = +\vec{v}_{exh} \ln \frac{m_{τελ}}{m_0}$$

η  $V_{τελ}$  αντιστοιχεί στην τελική ταχύτητα του πυραύλου όταν θα έχουν αδειάσει όλα τα καύσιμα και επομένως  $m_{τελ}=m_{οπ}$  ,  $m_0=m_{οπ}+m_{οκ}$

$$V_{τελ} = -v_{exh} \ln \frac{m_{τελ}}{m_0} = -v_{exh} \ln \frac{m_0}{m_{τελ}} = v_{exh} \ln \frac{m_{οπ} + m_{οκ}}{m_{οπ}} = v_{exh} \ln \left( 1 + \frac{m_0}{m_{οπ}} \right)$$

### 5.1 Ειδική Ώθηση

Στο Σχήμα 59 απεικονίζεται γραφικά ο θάλαμος καύσης (combustion chamber) ενός πυραυλικού κινητήρα με κατάλληλα σχεδιαζόμενο άνοιγμα το οποίο καλείται ακροφύσιο (nozzle) για την διαφυγή των καυσαερίων. Ο σχεδιασμός του θαλάμου καύσης και του ακροφύσιου εξόδου είναι τέτοιος ώστε η κατανομή της πίεσης εντός του θαλάμου να είναι ασύμμετρη, δηλαδή η πίεση να μεταβάλλεται πολύ λίγο εντός του θαλάμου καύσης αλλά να μειώνεται ελαφρά στην περιοχή του ακροφύσιου. Η δύναμη που αναπτύσσεται ως αποτέλεσμα της διαφοράς πίεσης εσωτερικά και εξωτερικά του θαλάμου έχει αντίθετη φορά αυτής των απαερίων, με αποτέλεσμα να ωθεί το θάλαμο προς τα επάνω και γι' αυτό καλείται ώση (thrust).



Σχήμα 59: Απεικόνιση Πυραυλοκινητήρα

Η δημιουργία πολύ υψηλής ταχύτητας καυσαερίων σε τέτοιες διατάξεις απαιτεί υψηλές θερμοκρασίες και πιέσεις που επιτυγχάνονται μόνον με την μείωση του Μοριακού Βάρους (MB) των καυσαερίων όσο το δυνατόν περισσότερο και την καύση εξειδικευμένων καυσίμων υλών, τα οποία καλούνται *προωθητικά* ή *προωθητικές ουσίες* (propellants), όρος που καλύπτει όλη τη γκάμα καυσίμων για πυραύλους. Επίσης απαιτείται να μειωθεί όσο το δυνατόν περισσότερο η πίεση των αερίων στην εσωτερική περιοχή του ακροφύσιου δημιουργώντας μεγάλο λόγο διατομής, ο οποίος ορίζεται ως το πηλίκο του εμβαδού της επιφάνειας εξόδου  $A_e$  προς το εμβαδό της επιφάνειας της στένωσης (λαιμός-throat)  $A_t$  που εμφανίζεται εντός της γεωμετρίας του θαλάμου καύσης.

Η ώση  $F$  υπολογιζόμενη από την εφαρμογή της ΑΔΟ για τον πυραυλικό κινητήρα του Σχήματος 59, δίνεται από την:

$$F = qV_e + (P_e - P_a)A_e \quad (5-5)$$

ατμόσφαιρας εξωτερικά του θαλάμου,  $P_e$  η πίεση των καυσαερίων,  $A_e$  το εμβαδόν διατομής στην έξοδο του ακροφύσιου και  $V_e$  η ταχύτητα εξόδου των καυσαερίων. Όπως είναι φανερό, η μέγιστη παραγόμενη ώση προκύπτει όταν η πίεση των καυσαερίων είναι ίση με την πίεση της ατμόσφαιρας εξωτερικά του θαλάμου ( $P_e = P_a$ ).

Αντίστοιχο χρήσιμο μέγεθος της ώσης είναι η ειδική ώθηση (specific impulse)  $I_{sp}$  ενός πυραυλικού συστήματος, η οποία ορίζεται από τη Σχέση 5-6 ως ο λόγος της ώσης δια τον ρυθμό ροής του εξερχόμενου βάρους των καυσαερίων:

$$I_{sp} = \frac{F}{qg_0} \quad (5-6)$$

όπου  $F$  η ώση,  $q$  είναι ο ρυθμός ροής μάζας των καυσαερίων στην έξοδο, και  $g_0$  η τιμή της επιτάχυνσης της βαρύτητας ( $9.80665 \text{ m/s}^2$ ). Ρυθμός ροής μάζας (κατανάλωση καυσίμου)  $q$  ή  $dm/dt$  ή  $\dot{m}$ .

Η ειδική ώθηση έχει διαστάσεις χρόνου και εκφράζεται σε μονάδες s. Εάν η ώση και ο ρυθμός ροής του εξερχόμενου βάρους των καυσαερίων παραμένουν σταθερές καθ' όλη την διάρκεια της καύσης του προωθητικού, η ειδική ώθηση αντιστοιχεί στον χρόνο για τον οποίο ο πυραυλικός κινητήρας παρέχει ώση ίση με το βάρος του προωθητικού που καταναλώνει. Για δεδομένο κινητήρα, η ειδική ώθηση έχει διαφορετική τιμή στην επιφάνεια της θάλασσας στη Γη από ότι στο κενό στο Διάστημα, μιας και η πίεση της ατμόσφαιρας που χρησιμοποιείται στον ορισμό της ώσης λαμβάνει εντελώς διαφορετική τιμή στις δύο αυτές καταστάσεις. Λόγω των απωλειών που εμφανίζονται σε κάθε πυραυλικό κινητήρα (μη αποτελεσματική καύση του προωθητικού, θερμικές απώλειες του ακροφύσιου, μηχανικές απώλειες των αντλητικών συστημάτων κλπ), οι πραγματικές τιμές της ειδικής ώθησης διαφέρουν από τις θεωρητικά υπολογιζόμενες σε ιδανικά ακροφύσια.

Τέλος ένα ακόμα χρήσιμο μέγεθος για την αποτίμηση της απόδοσης ενός πυραυλικού κινητήρα είναι η *χαρακτηριστική ταχύτητα εξόδου των καυσαερίων* (characteristic exhaust velocity),  $C^*$  (ή  $V_{exit}$ ), η οποία είναι μέτρο της διαθέσιμης ενέργειας από την καύση του προωθητικού, η οποία δίνεται στη Σχέση 5-7:

$$C^* = \frac{P_c A_t}{q} \quad (5-7)$$

όπου  $P_c$  είναι η πίεση στο εσωτερικό του θαλάμου καύσης και  $A_t$  το εμβαδόν διατομής στο σημείο στένωσης (λαιμός) του ακροφύσιου,  $q$  ρυθμός ροής του εξερχόμενου βάρους των καυσαερίων. Ένα συνηθισμένο εύρος μετρούμενων τιμών για την χαρακτηριστική ταχύτητα εξόδου των καυσαερίων  $C^*$  αναλόγως του χρησιμοποιούμενου προωθητικού μεταξύ 1333 m/s για την υδραζίνη ως μονοπρωθητικό και 2360 m/s για κρυογενικό μίγμα υδρογόνου/οξυγόνου.

## 5.2 Εξίσωση Tsiolkovsky - Θεμελιώδης Νόμος της Πυραυλικής Προώθησης/Κίνησης

Μέχρι στιγμής έχουμε ορίσει βασικά μεγέθη που μας επιτρέπουν να περιγράψουμε την κίνηση των πυραύλων και δορυφόρων τα οποία συνοπτικά είναι:

- Ώση (Thrust),  $F = \dot{m}C$  ή  $F = \dot{m} V_{EKT}$
- Ειδική Ώθηση  $I_{sp} = \frac{F}{\dot{m}g} = \frac{C}{g}$
- Ταχύτητα  $\Delta V = C \ln \left( \frac{m_{initial}}{m_{final}} \right) = I_{sp} g_0 \ln \left( \frac{m_{initial}}{m_{final}} \right)$

Όπου:

$m_{initial}$ ,  $m_{αρχικη}$ ,  $m_0$  = Αρχική μάζα πυραύλου πριν την πυροδότηση

$m_{final}$ ,  $m_{τελικη}$ ,  $m_t$  = Τελική μάζα πυραύλου μετά την πυροδότηση

Η Σχ. 29 που μας δίνει την ταχύτητα αναφέρεται ως η εξίσωση 'Tsiolkovsky' και αποτελεί τον θεμελιώδη νόμο της πυραυλικής προώθησης/κίνησης, την οποία διατύπωσε πρώτος ο Konstantin Tsiolkovsky. Θεωρητικός «πατέρας» της σύγχρονης Διαστημικής επιστήμης είναι ο Ρώσος επιστήμονας Konstantin Tsiolkovsky (1857–1935), ο οποίος, παρότι ήταν ουσιαστικά αυτοδίδακτος, δημοσίευσε πολλές μελέτες σχετικές με την προώθηση των πυραύλων και τα ταξίδια στο Διάστημα. Οι θεωρητικές του αναλύσεις τον οδήγησαν στην διατύπωση **του θεμελιώδους νόμου που περιγράφει την τελική ταχύτητα ενός πυραύλου**, με βάση το απόθεμα των καυσίμων του και την ταχύτητα εκτόνωσης των προϊόντων της καύσης. Παράλληλα, ήταν ο πρώτος που πρότεινε την κατασκευή πυραύλων πολλαπλών σταδίων, καθώς και την χρήση υγρού υδρογόνου και οξυγόνου θεωρώντας τα ιδεώδη προωθητικά καύσιμα.

Η εξίσωση 'Tsiolkovsky' μας επιτρέπει να υπολογίσουμε και την ταχύτητα αλλά και το καύσιμο (προωθητικό υλικό) που απαιτείται για να μεταφέρουμε ένα αντικείμενο όχι μόνο από την Γη στο Διάστημα αλλά και σε οποιοδήποτε πλανήτη ή σημείο του Ηλιακού μας συστήματος.

### Παράδειγμα 5-3

Ένας πύραυλος ενός σταδίου είναι σε τροχιά με ταχύτητα 7.91 km/s. Υπολογίστε την μάζα των καυσίμων που χρειάζεται για να εκτοξεύσει έναν μικροδορυφόρο των 50kg αν ο κινητήρας του εκτοξεύει καυσάερια με ταχύτητα 3000 m/s.

#### Απάντηση

$$v = u \ln \left( \frac{m_o}{m} \right), u=3000 \text{ m/s}, m_o=m+m_p$$

$$v = u \ln \left( \frac{m + m_p}{m} \right) \rightarrow \frac{v}{u} = \ln \left( 1 + \frac{m_p}{m} \right) \rightarrow 1 + \frac{m_p}{m} = e^{\frac{v}{u}}$$

$$m_p = m \left( e^{\frac{v}{u}} - 1 \right) = 50 \left( e^{\frac{7010}{3000}} - 1 \right) = 50(13.97 - 1) = 700 \text{ kg}$$

### Παράδειγμα 5-4

Υπολογίστε την επιτάχυνση ενός πυραύλου την στιγμή που ο πύραυλος μπαίνει σε τροχιά ( $V=7.91 \text{ km/s}$ ), αν ο κινητήρας του εκτοξεύει καυσάερια με ταχύτητα 3000 m/s, η μάζα του δορυφόρου είναι 5000 kg και ο ρυθμός κατανάλωσης καυσίμων είναι  $\mu=100 \text{ kg/s}$ . Ποια μεγέθη αυξάνουν την επιτάχυνση του πυραύλου;

#### Απάντηση

Έχουμε:

$$\left. \begin{array}{l} v = u \ln \left( \frac{m_o}{m} \right) \\ m(t) = m_o - \mu t \end{array} \right\} v(t) = u \ln \frac{m_o}{m_o - \mu t}$$

Παίρνουμε την παράγωγο της ταχύτητας για να βρούμε την επιτάχυνση

$$\frac{dv}{dt} = a(t) = u \frac{1}{\frac{m_o}{m_o - \mu t}} \cdot \frac{(-m_o)(-\mu)}{(m_o - \mu t)^2} = \frac{u(m_o - \mu t)m_o\mu}{m_o(m_o - \mu t)^2} = \frac{u\mu}{m_o - \mu t}$$

Η επιτάχυνση είναι:

$$a = \frac{u\mu}{m_o - \mu t} = \frac{u\mu}{m} = \frac{3000 \cdot 100}{5000} = 60 \frac{m}{s^2} \approx 6g$$

Ποια μεγέθη αυξάνουν την επιτάχυνση του πυραύλου: u, t και μ. Απόδειξη:

i. Βρίσκουμε την μερική παράγωγο ως προς το  $t$

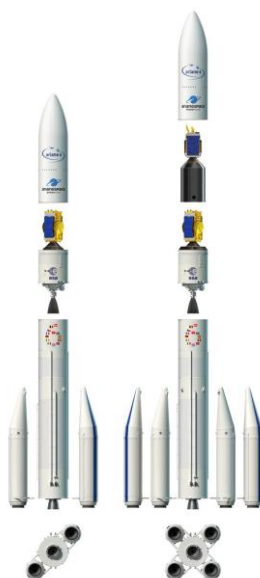
$$\frac{\partial a}{\partial t} = \frac{u\mu}{(m_o - \mu t)^2} \cdot (-\mu) = \frac{u\mu^2}{(m_o - \mu t)^2} > 0$$

ii. Βρίσκουμε την μερική παράγωγο ως προς το  $\mu$

$$\frac{\partial a}{\partial \mu} = \frac{u(m_o - \mu t) - u\mu(-t)}{(m_o - \mu t)^2} = \frac{um_o - u\mu t + u\mu t}{(m_o - \mu t)^2} = \frac{um_o}{(m_o - \mu t)^2} > 0$$

### Στάδια Πυραύλων

Η σχεδίαση των πυραύλων/εκτοξευτών βασίζεται στην βασική αρχή των σταδίων, για την βελτιστοποίηση του βάρους/μάζας (μείωση) και την μεγιστοποίηση της τελικής ταχύτητας (τροχιακή ταχύτητα). Για να μεγιστοποιήσουμε την τελική ταχύτητα ενός πυραύλου ώστε το τελικό στάδιο με τον δορυφόρο φορτίο (ή αστροναύτη/αστροναύτες), με την μικρότερη δυνατή κατανάλωση καυσίμων, προσπαθούμε να βρούμε σχεδιάσματα 'τεχνάσματα' ή λύσεις που θα επιτρέψουν να τοποθετήσουμε το φορτίο σε τροχιά με το λιγότερο βάρος, με την μικρότερη κατανάλωση αλλά και με το μικρότερο κόστος. Ο βασικότερος τρόπος που το κατορθώνουμε αυτό είναι η κατανομή του πυραύλου/εκτοξευτή σε αποσπώμενα στάδια τα οποία αφού έχουν καταναλώσει τα καύσιμά τους αποσπώνται με μηχανικό τρόπο (με τον κινητήρα τους) ως αναλώσιμα υλικά και επιτρέπουν την απόρριψη της αχρείαστης πλέον μάζας του πυραύλου (δεξαμενής, κινητήρα, δομής) η οποία πλέον δεν χρειάζεται για την προώθηση του πυραύλου και επιτρέπει την αύξηση της ταχύτητας ή καλύτερα της επιτάχυνσης, όπως την γνωρίζουμε από τον τύπο:  $F = ma$



**Σχήμα 60: Ο νέα οικογένεια πυραύλων του ΕΟΔ Ariane 6 με πολλαπλά στάδια**

Έτσι το κάθε στάδιο του πυραύλου έχει τον δικό του κινητήρα ή κινητήρες και είναι απαραίτητο να υπολογίσουμε τον τρόπο με τον οποίο θα βρούμε την ταχύτητα και την κατανομή μάζας αλλά και το πόσα καύσιμα απαιτούνται για την λειτουργία του πυραύλου. Χρησιμοποιώντας λοιπόν την εξίσωση Tsiolkovsky:

$$\Delta V = I_{sp} g_0 \ln \left( \frac{m_{initial}}{m_{final}} \right)$$

Κάθε στάδιο του πυραύλου έχει αρχική/τελική μάζα και το  $I_{sp}$  για κάθε στάδιο μπορεί να διαφέρει (διαφορετικός κινητήρας). Έτσι το συνολικό  $\Delta V$  του πυραύλου άθροισμα του  $\Delta V$  του κάθε σταδίου:

$$\Delta V_{total} = \Delta V_{stage 1} + \Delta V_{stage 2} + \dots + \Delta V_{stage n}$$

$$\begin{aligned} \Delta V_{total} = & I_{sp \text{ stage 1}} g_0 \ln \left( \frac{m_{initial \text{ stage 1}}}{m_{final \text{ stage 1}}} \right) \\ & + I_{sp \text{ stage 2}} g_0 \ln \left( \frac{m_{initial \text{ stage 2}}}{m_{final \text{ stage 2}}} \right) + \dots \\ & + I_{sp \text{ stage 3}} g_0 \ln \left( \frac{m_{initial \text{ stage 3}}}{m_{final \text{ stage 3}}} \right) \end{aligned} \quad (5-8)$$

Τι χρησιμοποιούμε για αρχική και τελική μάζα των σταδίων ενός πυραύλου:

- Αρχική μάζα: συνολική μάζα (βάρους) πριν την εκτόξευση
- Τελική μάζα; Η αρχική μάζα κάθε σταδίου (συμπεριλαμβανομένου των επόμενων σταδίων) μείον την μάζα των καυσίμων που έχουν καταναλωθεί στο συγκεκριμένο στάδιο (π.χ. στάδιο 1):

$$m_{final \text{ stage 1}} = m_{initial \text{ vehicle}} - m_{propellant \text{ stage 1}}$$

- Στάδιο 2, 3:

$$m_{final \text{ stage 2}} = m_{final \text{ stage 1}} - m_{structure \text{ stage 1}}$$

$$m_{final \text{ stage 2}} = m_{initial \text{ stage 2}} - m_{propellant \text{ stage 1}}$$

Η σχεδίαση πυραύλων με πολλαπλά στάδια έχει πλεονεκτήματα και μειονεκτήματα.

Πλεονεκτήματα:

- Αύξηση φορτίου σε τροχιά για το ίδιο μέγεθος πυραύλου
- Αύξηση ταχύτητας με το ίδιο μέγεθος πυραύλου
- Μείωση της απόδοσης ( $I_{sp}$ ) για την μεταφορά φορτίων σε τροχιά

Μειονεκτήματα

- Αύξηση πολυπλοκότητας (μηχανών, μηχανισμών)
- Μείωση της αξιοπιστίας του συστήματος (μεγαλύτερος αριθμός μηχανών κλπ)
- Αύξηση κόστους

Για τον σχεδιαστή πυραύλου, ένα κρίσιμο ερώτημα είναι, πόσα στάδια πρέπει να έχει ένας πύραυλος;



### Παράδειγμα 5-5

Ένας πύραυλος 2 σταδίων έχει τα παρακάτω χαρακτηριστικά: 1<sup>ο</sup> στάδιο – μάζα καυσίμων 120,000kg, μάζα δομής 9,000kg, 2<sup>ο</sup> στάδιο - μάζα καυσίμων 30,000kg, μάζα δομής 3,000kg και μάζα φορτίου 3,000 kg. Η ειδική ώθηση 1<sup>ου</sup> και 2<sup>ου</sup> σταδίου είναι 260s και 320s αντίστοιχα. Βρείτε την ταχύτητα του πυραύλου  $\Delta V$ .

### Απάντηση

$$M_{o1} = 120,000 + 9,000 + 30,000 + 3,000 + 3,000 = 165,000 \text{ kg}$$

$$M_{f1} = 9,000 + 30,000 + 3,000 + 3,000 = 45,000 \text{ kg}$$

$$I_{sp1} = 260 \text{ s}$$

$$M_{o2} = 30,000 + 3,000 + 3,000$$

$$M_{f2} = 3,000 + 3,000 = 6,000 \text{ kg}$$

$$I_{sp2} = 320 \text{ s}$$

$$\Rightarrow C_1 = I_{sp1}g = 260(9.8) = 2,550 \text{ m/s}$$

$$\Rightarrow C_2 = 320(9.8) = 3,138 \text{ m/s}$$

$$\Rightarrow \Delta V_1 = C_1 \ln[M_{o1}/M_{f1}] = 2,550 \ln[165,000/45,000] = 3,313 \text{ m/s}$$

$$\Rightarrow \Delta V_2 = C_2 \ln[M_{o2}/M_{f2}] = 3,138 \ln[36,000/6,000] = 5,623 \text{ m/s}$$

$$\Rightarrow \Delta V_{\text{Total}} = \Delta V_1 + \Delta V_2 = 3,313 + 5,623 = 8,936 \text{ m/s}$$

**Ασκήσεις**

**13.** Υπολογίστε την ανυψωτική ικανότητα του κάθε πυραύλου στον παρακάτω πίνακα. Ποιος είναι καλύτερος;

Πύραυλος	Παράμετροι	Φορτίο
Ενός σταδίου	$\Delta V = 8000 \text{ m/s}$ $I_{sp} = 480 \text{ s}$ $m_{\text{δομής}} = 250 \text{ kg}$ $m_{\text{καύσιμα}} = 1500 \text{ kg}$	$m_{\text{φορτίο1}}$
Δύο σταδίων	$\Delta V = 8000 \text{ m/s}$ Στάδιο 2 $I_{sp} = 480 \text{ s}$ $m_{\text{δομής}} = 140 \text{ kg}$ $m_{\text{καύσιμα}} = 750 \text{ kg}$ Στάδιο 1 $I_{sp} = 480 \text{ s}$ $m_{\text{δομής}} = 140 \text{ kg}$ $m_{\text{καύσιμα}} = 750 \text{ kg}$	$m_{\text{φορτίο2}}$

$[m_{\text{φορτίο1}} = 84 \text{ kg}, m_{\text{φορτίο2}} = 175 \text{ kg}]$

14. Ένας πύραυλος 2 σταδίων προς εκτόξευση έχει σαν σχεδιαστικό στόχο να παράγει ένα  $\Delta V$  ( $\Delta V_{\text{design}} = 10,000 \text{ m/s}$ ). Η συνολική μάζα του 2<sup>ου</sup> σταδίου (συμπεριλαμβανομένων της δομής και των καυσίμων) είναι 12,000 kg, 9,000 kg από τα οποία είναι καύσιμα. Το φορτίο (δορυφόρος) έχει μάζα 2,000 kg. Το  $I_{sp}$  του πρώτου σταδίου είναι 350s και του 2<sup>ου</sup> σταδίου είναι 400s. Η μάζα της δομής του πρώτου σταδίου είναι 8,000 kg. Ποια πρέπει να είναι η μάζα των καυσίμων που πρέπει να έχει το πρώτο στάδιο του πυραύλου για να πετύχει την απαιτούμενη  $\Delta V_{\text{design}}$ ? Ποια είναι η συνολική μάζα του πυραύλου πριν την εκτόξευση?

$[m_{\text{initial}} = 124,821 \text{ kg}, m_{\text{propellant}} = 102,821 \text{ kg}]$

## Κεφάλαιο 6

### Διαστημικό Περιβάλλον

#### 6.0 Τι είναι το Διάστημα?

Τι είναι το Διάστημα και μέχρι που εκτείνεται; Εμείς από την Γη προστατευμένοι από την ατμόσφαιρα μπορούμε να δούμε τα αστέρια, το Φεγγάρι, το Διάστημα γενικά, αλλά από που ξεκινά και που τελειώνει το Διάστημα? Φυσικά ξεκινά από κάπου στο 'τέλος' της ατμόσφαιρας αλλά από πιο σημείο ή πόσο ψηλά στην ατμόσφαιρα πρέπει να πετάξουμε με ένα αεροσκάφος για να δούμε το Διάστημα ή για να το 'αισθανθούμε'?



**Σχήμα 61: Που είναι το Διάστημα. Διάστημα θεωρείτε το σημείο από το οποίο μπορούμε να παραμείνουμε σε τροχιά**

Έχοντας μελετήσει πρώτη τα ανώτερα στρώματα της ατμόσφαιρας η NASA κάνοντας δοκιμές υπερηχητικών αεροσκαφών την δεκαετία του 1950/1960, θεωρούμε ότι το Διάστημα ξεκινά από το σημείο/ύψος που ένα αντικείμενο μπορεί να μείνει σε τροχιά (έστω και για μία μέρα ή ώρες) πριν η αεροδυναμική τριβή της ατμόσφαιρας το τραβήξει πίσω στην Γη.

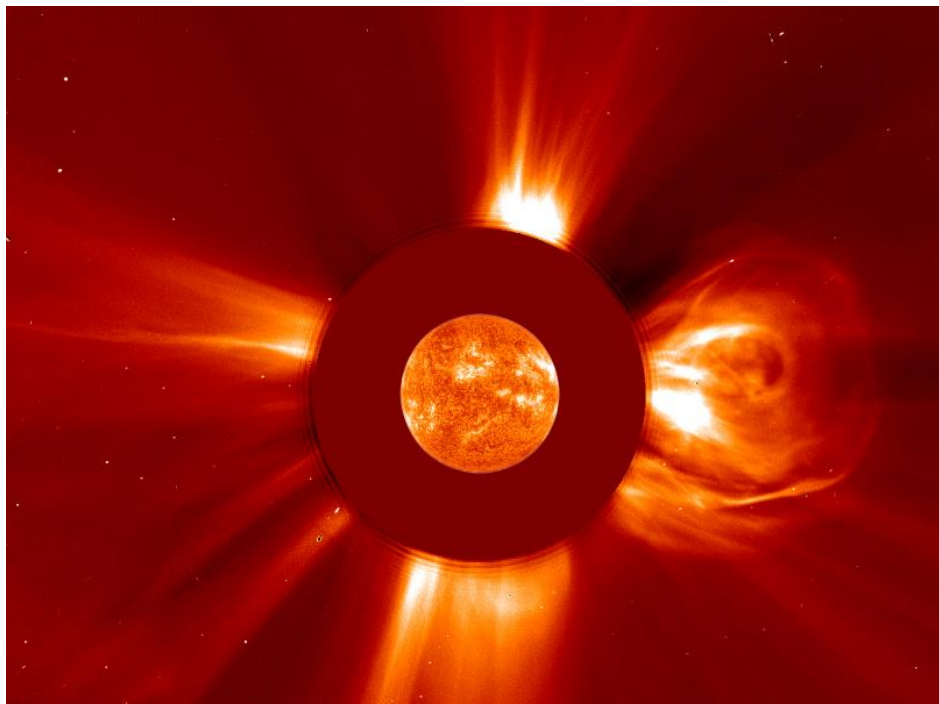
#### 6.1 Το Ηλιακό Σύστημα

Στο κέντρο του Ηλιακού συστήματος είναι ο Ήλιος, το κοντινότερο αστέρι στην Γη. Ο Ήλιος θεωρείτε ένα μικρό αστέρι από τα δισεκατομμύρια αστέρια που υπάρχουν στον γαλαξία μας και ως αστέρι λειτουργεί μέσω της πυρηνικής σύντηξης, όπου 600 εκατομμύρια τόνοι υδρογόνου ενώνονται μαζί το κάθε δευτερόλεπτο. Τα δύο προϊόντα της σύντηξης που περισσότερο μας ενδιαφέρουν είναι: (1) Η ηλεκτρομαγνητική ακτινοβολία (2) φορτισμένα σωματίδια.

Η ηλεκτρομαγνητική ακτινοβολία μας ενδιαφέρει γιατί είναι ένας σημαντικός τρόπος μεταφοράς ενέργειας από ένα σημείο σε ένα άλλο. Για παράδειγμα η ακτινοβολία του Ήλιου μεταφέρει ενέργεια από την επιφάνεια του σε όλες της κατευθύνσεις μέσω κυμάτων τα οποία μπορούμε να κωδικοποιήσουμε με φυσικό και μαθηματικό τρόπο χρησιμοποιώντας το μήκος κύματος της ακτινοβολίας,  $\lambda$ . Με αυτό τον τρόπο μπορούμε να υπολογίσουμε την ακτινοβολία, θερμότητα που φτάνει στην Γη αλλά και τον αντίκτυπο που έχει σε δορυφόρους σε τροχιά ή σε διαστημόπλοια που ταξιδεύουν στο Ηλιακό μας σύστημα.

Τα φορτισμένα σωματίδια (ηλεκτρόνια, πρωτόνια). Με την τρομακτική θερμότητα και ενέργεια που παράγει ο Ήλιος ( $> 1000000$  °C) τα φορτισμένα σωματίδια θερμαίνονται και μετατρέπονται σε πλάσμα. Επίσης τα σωματίδια αυτά αντιδρούν στα ηλεκτρικά και

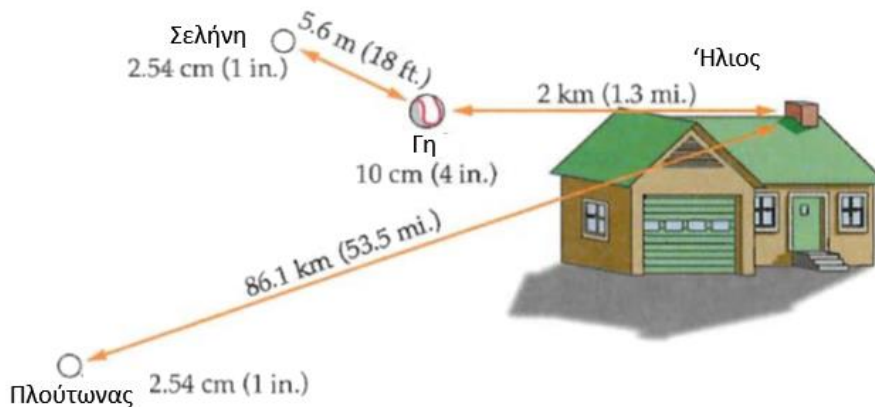
μαγνητικά πεδία και αποκτούν ταχύτητες που ξεπερνούν τα 700 km/s (!! ) και δημιουργούν τον Ηλιακό άνεμο (solar wind) που φτάνει σε όλο το Ηλιακό σύστημα.



**Σχήμα 62: Ηλιακή Έκλαμψη (Ηλιακή καταιγίδα) που καταγράφηκε στις 2/4/2001 από το διαστημόπλοιο SOHO. Η έκλαμψη είναι η μεγαλύτερη που έχει καταγραφεί ποτέ έως σήμερα (ακόμα και από αυτή του 1989 που βραχυκύκλωσε σταθμό ενέργειας στον Καναδά, στέλνοντας πλάσμα (ηλιακός άνεμος) με ταχύτητες πάνω από 7.2 εκατ. km/hr, ευτυχώς όχι προς την κατεύθυνση της Γης.**

Άλλο ένα σημαντικό φαινόμενο στον Ήλιο είναι οι ηλιακές εκλάμψεις (ή ηλιακές εκρήξεις), που σε ένταση και μέγεθος είναι τρομακτικά μεγάλες, τάξεις μεγέθους μεγαλύτερες από τις πυρηνικές εκρήξεις που γνωρίζουμε στην Γη. Οι ηλιακές εκλάμψεις, που διαρκούν 1-2 μέρες ή και λιγότερο είναι τόσο βίαιες που φτάνουν στην Γη (απόσταση 150 εκατ. km) και επηρεάζουν τον καιρό μας αλλά και έχουν αντίκτυπο στην λειτουργία ηλεκτρονικών στην Γη και στους δορυφόρους στο Διάστημα.

Εκτός από τον ήλιο, εννέα πλανήτες, δεκάδες φεγγάρια και χιλιάδες αστεροειδείς βρίσκονται ακόμα στο ηλιακό μας σύστημα. Οι πλανήτες κυμαίνονται από τις μικρούς βραχώδεις - τον Ερμή, τη Αφροδίτη, τη Γη και τον Άρη – έως τους αέριους γίγαντες - τον Δία, τον Κρόνο, τον Ουρανό και τον Ποσειδώνα. Ο μικροσκοπικός Πλούτωνας είναι μόνος στην άκρη του ηλιακού συστήματος και μπορεί να είναι ένα χαμένο φεγγάρι του Ποσειδώνα. Το σχήμα 63 παρουσιάζει το μέγεθος του ηλιακού συστήματος. Ωστόσο, επειδή τείνουμε να περάσουμε το μεγαλύτερο μέρος του χρόνου μας κοντά στη Γη, θα εστιάσουμε τη συζήτησή μας για το διαστημικό περιβάλλον στα διαστημικά σκάφη και τους αστροναύτες στις τροχιές της Γης.



**Σχήμα 63: Το Ηλιακό μας Σύστημα κατά Αναλογία/Κλίμακα θεωρώντας την Γη ως μία μπάλα baseball**

## 6.2 Το Σύμπαν

Το διάστημα είναι μεγάλο. ΕΞΑΙΡΕΤΙΚΑ ΜΕΓΑΛΟ. Εκτός από τον ήλιο μας, περισσότερα από 300 δισεκατομμύρια άλλα αστέρια βρίσκονται στη γειτονιά μας - τον Γαλαξία μας. Επειδή οι σχετικές αποστάσεις είναι τόσο μεγάλες, οι κοινές μονάδες μέτρησης που χρησιμοποιεί ο άνθρωπος (χιλιόμετρα ή μίλια) παύουν να έχουν νόημα. Όταν προσπαθούμε να κατανοήσουμε τη σημασία των φορτισμένων σωματιδίων στο μέγεθος του σύμπαντος, για παράδειγμα, το μυαλό δυσκολεύεται. Το σχήμα 63 προσπαθεί να βάλει μετρήσιμα από τον άνθρωπο μεγέθη σε κλίμακα με τις άλλες μικρο/μακρο-διαστάσεις του σύμπαντος.

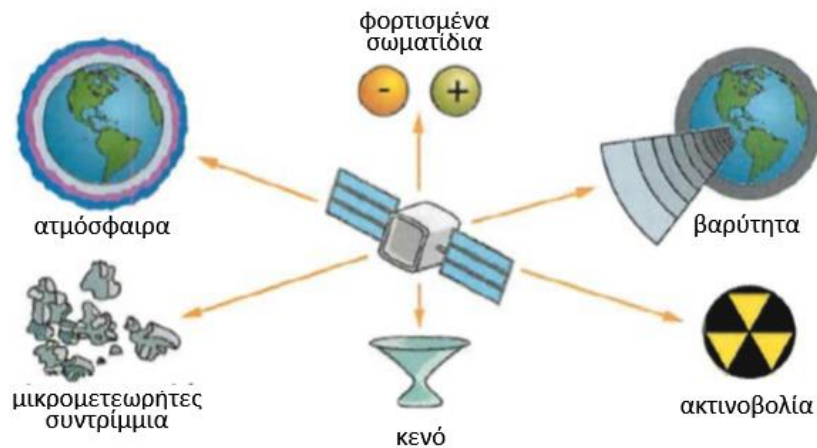
Η μονάδα μέτρησης που χρησιμοποιούμε για να συζητήσουμε τις αστρικές αποστάσεις είναι το έτος φως. Ένα έτος φωτός είναι η απόσταση που διανύει το φως μέσα σε ένα χρόνο. Στα 300.000 km / s, αυτό είναι περίπου  $9.46 \times 10^{12}$  km (περίπου 5.88 τρισεκατομμύρια μίλια). Χρησιμοποιώντας αυτή τη μονάδα μέτρησης, μπορούμε να αρχίσουμε να περιγράφουμε την τοποθεσία μας σε σχέση με οτιδήποτε άλλο στο σύμπαν. Ο Γαλαξίας μας έχει σπειροειδές σχήμα με μήκος περίπου 100.000 έτη φωτός. Ο ήλιος και το ηλιακό μας σύστημα βρίσκονται περίπου στα μισά της διαδρομής από το κέντρο του (περίπου 25.000 έτη φωτός) σε έναν από τους σπειροειδείς βραχίονες. Ο Γαλαξίας (και εμείς μαζί) περιστρέφεται αργά γύρω από το γαλαξιακό κέντρο, ολοκληρώνοντας μια περιστροφή κάθε 240 εκατομμύρια χρόνια περίπου. Ο χρόνος που χρειάζεται για να περιστραφεί μια φορά γύρω από το κέντρο του αποκαλείται γαλαξιακό έτος. Χρησιμοποιώντας αυτούς τους όρους, οι αστρονόμοι εκτιμούν ότι το ηλιακό μας σύστημα είναι περίπου 20 γαλαξιακών χρόνων (4.8 δισεκατομμύρια έτη γης).

Τα αστέρια στον γαλαξία μας βρίσκονται σε μεγάλες αποστάσεις μεταξύ τους. Το πλησιέστερο αστέρι στο ηλιακό μας σύστημα είναι το Proxima Centauri στα 4,22 έτη φωτός ή  $4,0 \times 10^{13}$  χλμ. μακριά. Το διαστημόπλοιο Voyager, που κινείται σήμερα με ταχύτητα 56.400 χλμ. / Ώρα. (35.000 m.p.h.), θα χρειαστεί περισσότερα από 80.000 χρόνια για να φτάσει εκεί! Είναι εξαιρετικά δύσκολο να κατανοήσουμε το μέγεθος αυτών των αποστάσεων. Ο πλησιέστερος γαλαξίας σε μας είναι ο γαλαξίας της Ανδρομέδας, ο οποίος απέχει περίπου 2 εκατομμύρια έτη φωτός. Πέρα από την Ανδρομέδα υπάρχουν δισεκατομμύρια άλλοι γαλαξίες, με παράξενες δομές, τους οποίους οι αστρονόμοι μόλις αρχίζουν να καταγράφουν.

## 6.3 Το Διαστημικό Περιβάλλον

Για να φτιάξουμε ένα διαστημικό σκάφος ικανό να επιβιώσει στο εχθρικό διαστημικό περιβάλλον, πρέπει πρώτα να καταλάβουμε τους κινδύνους που μπορεί να αντιμετωπίσει όταν βρεθεί σε αυτό. Η Γη, ο Ήλιος και το διάστημα προσφέρουν μοναδικές προκλήσεις στους σχεδιαστές διαστημικών οχημάτων, όπως:

- Η μικρο-βαρύτητα/βαρυτικό πεδίο προκαλούν θέματα φυσιολογίας (ιατρικά) και συμπεριφοράς των ρευστών
- Η ατμόσφαιρα της Γης επηρεάζει ένα διαστημικό σκάφος, ακόμη και όταν αυτό βρίσκεται σε τροχιά
- Το κενό στο διάστημα πάνω από την ατμόσφαιρα αποτελεί για το διαστημικό σκάφος μια άλλη πρόκληση
- Φυσικά και τεχνητά αντικείμενα στο διάστημα θέτουν κινδύνους σύγκρουσης
- Η ακτινοβολία και τα φορτισμένα σωματίδια από τον Ήλιο και το υπόλοιπο σύμπαν μπορούν να προκαλέσουν σοβαρή βλάβη σε ένα μη κατάλληλα προστατευμένο διαστημικό σκάφος



**Σχήμα 64: Παράγοντες του Διαστημικού Περιβάλλοντος που επηρεάζουν την λειτουργία δορυφόρων**

### 6.3.1 Βαρύτητα

Κάθε φορά που βλέπουμε αστροναύτες στην τηλεόραση που επιπλέουν γύρω από το διαστημικό σκάφος, ακούμε συχνά ότι βρίσκονται σε "μηδενική βαρύτητα". Αυτό δεν είναι αλήθεια! Όπως θα δούμε, όλα τα αντικείμενα έλκουν το ένα το άλλο με βαρυτική δύναμη ανάλογη της μάζα τους. Αυτή η δύναμη μειώνεται καθώς τα αντικείμενα απομακρύνονται μεταξύ τους. Συνεπώς η βαρύτητα δεν εξαφανίζεται μόλις φτάσουμε στο διάστημα. Σε μια χαμηλή τροχιά, για παράδειγμα, σε υψόμετρο 300 χλμ., η έλξη της βαρύτητας εξακολουθεί να είναι το 91% αυτής που συναντάται στην επιφάνεια της Γης.

Πως λοιπόν οι αστροναύτες επιπλέουν στο διαστημικό σκάφος τους; Ένα διαστημικό σκάφος και ότι υπάρχει μέσα σε αυτό βρίσκεται σε ελεύθερη πτώση. Όπως υποδηλώνει ο όρος, ένα αντικείμενο σε ελεύθερη πτώση πέφτει υπό την επίδραση της βαρύτητας, απαλλαγμένο από οποιοσδήποτε άλλες δυνάμεις. Ελεύθερη πτώση είναι αυτή η στιγμιαία αίσθηση που παίρνετε όταν πηδάτε από μια εξέδρα καταδύσεων. Στην ελεύθερη πτώση δεν αισθάνεστε τη δύναμη της βαρύτητας παρόλο που υπάρχει βαρύτητα. Όταν κάθεσαι στην καρέκλα σου, δεν αισθάνεσαι την βαρύτητα πίσω σου. Νιώθεις ότι η καρέκλα σπρώχνει προς τα πάνω με δύναμη ίση με τη δύναμη της βαρύτητας. Οι δυνάμεις που δρουν μόνο στην επιφάνεια ενός αντικειμένου ονομάζονται δυνάμεις επαφής. Οι αστροναύτες σε τροχιά δεν βιώνουν δυνάμεις επαφής επειδή αυτοί και τα διαστημικά σκάφη τους βρίσκονται σε ελεύθερη πτώση, όχι σε επαφή με την επιφάνεια της Γης. Εφόσον τα πάντα σε τροχιά όμως κάνουν ελεύθερη πτώση, γιατί δεν επιστρέφουν στη Γη; Όπως θα δούμε αργότερα, όταν ένα αντικείμενο σε τροχιά έχει αρκετή οριζόντια ταχύτητα έτσι ώστε, καθώς πέφτει, να περιστρέφεται γύρω από τη Γη χωρίς να πέφτει σε αυτή.

Η βαρυτική έλξη της Γης κυριαρχεί στα αντικείμενα κοντά της. Καθώς όμως το διαστημικό σκάφος κινείται σε υψηλότερες τροχιές, η βαρυτική έλξη της Σελήνης και του Ήλιου αρχίζουν να ασκούν επιρροή. Όπως θα δούμε, για εφαρμογές σε τροχιά γύρω από τη Γη, μπορούμε να υποθέσουμε ότι η Σελήνη και ο Ήλιος δεν έχουν καμία επίδραση. Ωστόσο, όπως θα δούμε αργότερα, για ένα διαπλανητικό διαστημικό σκάφος, αυτή η υπόθεση δεν ισχύει καθώς η βαρυτική έλξη του Ήλιου κυριαρχεί για το μεγαλύτερο μέρος μιας δια-πλανητικής τροχιάς.



**Σχήμα 65: Αστροναύτες σε περιβάλλον μικροβαρύτητας στον Διεθνή Διαστημικό Σταθμό**

Η βαρύτητα μας υποδεικνύει το μέγεθος και το σχήμα της τροχιάς ενός διαστημικού σκάφους. Τα οχήματα εκτόξευσης πρέπει πρώτα να ξεπεράσουν τη βαρύτητα για να αφήσουν το διαστημικό σκάφος στο διάστημα. Μόλις ένα διαστημικό σκάφος τεθεί σε τροχιά, η βαρύτητα καθορίζει την ποσότητα του προωθητικού υλικού που πρέπει να χρησιμοποιούν οι κινητήρες του για να αλλάξει τροχιά ή να συνδεθεί με άλλα διαστημικά σκάφη. Πέρα από τη Γη, η βαρυτική έλξη της Σελήνης, του Ήλιου και των άλλων πλανητών επηρεάζει με παρόμοιο τρόπο τη διαδρομή ενός διαστημικού σκάφους. Η βαρύτητα είναι τόσο σημαντική για το διαστημικό περιβάλλον ώστε ένας ολόκληρος κλάδος της αστροναυτικής, που ονομάζεται αστροδυναμική να ασχολείται με την ποσοτικοποίηση των επιπτώσεών της στα διαστημικά σκάφη και την πλανητική κίνηση. Τα επόμενα κεφάλαια θα επικεντρωθούν στην κατανόηση των τροχιών των διαστημικών σκαφών και στο συναρπαστικό πεδίο της αστροδυναμικής ή τροχιακή μηχανικής.

Όπως αναφέρθηκε πριν, το περιβάλλον ελεύθερης πτώσης του διαστήματος προσφέρει πολλές πιθανές ευκαιρίες για την βιομηχανία. Στη Γη, αν συνδυάσουμε δύο υλικά, όπως μια πέτρα με νερό, η πέτρα βυθίζεται στον πυθμένα του δοχείου. Σε συνθήκες ελεύθερης πτώσης, μπορούμε να αναμειγνύουμε υλικά που δεν μπορούν να αναμιχθούν στη Γη. Έτσι, κατασκευάζουμε εξωτικά και χρήσιμα μεταλλικά κράματα για ηλεκτρονικά και άλλες εφαρμογές ή νέους τύπους φαρμάκων. Ωστόσο, η ελεύθερη πτώση έχει κάποια μειονεκτήματά. Ένα από αυτά είναι ο δύσκολος χειρισμός των υγρών στο διάστημα. Σκεφτείτε τον μετρητή στάθμης καυσίμου στο αυτοκίνητό σας. Μετρώντας το ύψος της στάθμης, μπορείτε συνεχώς να παρακολουθείτε την ποσότητα καυσίμου στη δεξαμενή. Αλλά

στο διάστημα τα υγρά δεν θα 'επιπλέουν' στην δεξαμενή και το υγρό θα μετακινείται σε πολλαπλές κατευθύνσεις (φαινόμενο κλειστού κυματισμού). Έτσι, τα υγρά είναι πολύ πιο δύσκολο να μετρηθούν (και να αντληθούν) σε ελεύθερη πτώση. Αυτά τα προβλήματα είναι σχετικά μικρά σε σύγκριση με τα βαθιά προβλήματα φυσιολογίας που αντιμετωπίζουν οι άνθρωποι όταν εκτίθενται σε συνθήκες ελεύθερης πτώσης για μεγάλες χρονικές περιόδους. Θα εξετάσουμε αυτά τα προβλήματα χωριστά στην επόμενη ενότητα.

### 6.3.2 Ατμόσφαιρα

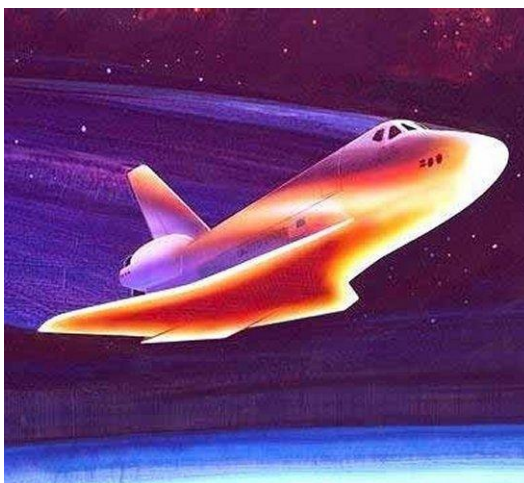
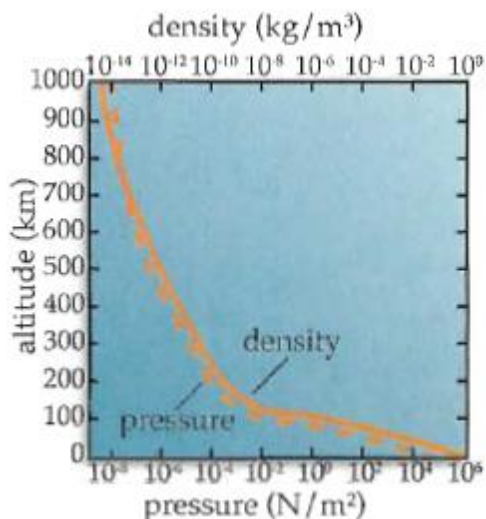
Η ατμόσφαιρα της Γης επηρεάζει ένα διαστημικό σκάφος σε χαμηλή τροχιά (κάτω από περίπου 600 χλμ. υψόμετρο), με δύο τρόπους

- Μειώνει τη διάρκεια ζωής του
- Διαβρώνει το διαστημικό σκάφος (οξειδωση παρουσία ατομικού οξυγόνου)

Πάρτε μια βαθιά ανάσα. Ο αέρας που αναπνέετε δημιουργεί την ατμόσφαιρα της Γης. Χωρίς αυτήν, βέβαια, όλοι θα πεθαίναμε μέσα σε λίγα λεπτά. Ενώ η ατμόσφαιρα αποτελεί μόνο ένα λεπτό στρώμα γύρω από τη Γη, ένα διαστημικό σκάφος σε χαμηλή τροχιά μπορεί ακόμα να αισθανθεί την επίδραση της. Με την πάροδο του χρόνου, μπορεί να σύρει ένα διαστημικό σκάφος πίσω στη Γη, και το οξυγόνο στην ατμόσφαιρα μπορεί να προκαλέσει ζημιά σε διάφορα υλικά που χρησιμοποιούνται στο διάστημα. Δύο όροι είναι σημαντικοί για την κατανόηση της ατμόσφαιρας – η πίεση και η πυκνότητα. Η ατμοσφαιρική πίεση αντιπροσωπεύει την ποσότητα δύναμης ανά μονάδα επιφανείας που ασκείται από το βάρος της ατμόσφαιρας. Η ατμοσφαιρική πυκνότητα αντιπροσωπεύει την ποσότητα αέρα που βρίσκεται σε δεδομένο όγκο. Καθώς πηγαίνουμε υψηλότερα στην ατμόσφαιρα, η πίεση και η πυκνότητα αρχίζουν να μειώνονται με συνεχώς αυξανόμενο ρυθμό, όπως φαίνεται στο Σχήμα 66. Φανταστείτε έναν σωλήνα με αέρα που εκτείνεται από τη Γη έως το διάστημα. Καθώς πηγαίνουμε υψηλότερα, υπάρχει λιγότερος όγκος αέρα και συνεπώς η πίεση (και έτσι η πυκνότητα) είναι χαμηλότερη. Σε ένα αεροπλάνο που διαθέτει μετρητή πίεσης και πυκνότητας, θα βλέπαμε ότι καθώς πηγαίνουμε υψηλότερα, η πίεση και η πυκνότητα αρχίζουν να πέφτουν γρηγορότερα.

Η ατμόσφαιρα της γης δεν σταματά απότομα. Ακόμα και σε αρκετά μεγάλα υψόμετρα, μέχρι και 600 χλμ. η ατμόσφαιρα συνεχίζει να επιβραδύνει τα διαστημικά σκάφη που βρίσκονται σε τροχιά εξαιτίας της οπισθέλκουσα δύναμη/ατμοσφαιρικής τριβής. Η ατμοσφαιρική οπισθέλκουσα είναι η δύναμη που αισθάνεστε όταν έχετε το χέρι σας έξω από το παράθυρο ενός αυτοκινήτου που κινείται. Το μέγεθος αυτής της δύναμης εξαρτάται από την πυκνότητα του αέρα, την ταχύτητα, το σχήμα και το μέγεθος του χεριού σας καθώς και από τον προσανατολισμό του χεριού σας σε σχέση με τη ροή του αέρα. Ομοίως, η οπισθέλκουσα δύναμη σε ένα διαστημικό σκάφος σε τροχιά εξαρτάται από τις ίδιες μεταβλητές: την πυκνότητα του αέρα καθώς και την ταχύτητα, το σχήμα, το μέγεθος και τον προσανατολισμό του διαστημικού οχήματος ως προς τη ροή του αέρα.





**Σχήμα 66: (Αριστερά) Η Ατμόσφαιρα της Γης. Η πυκνότητα μειώνεται εκθετικά με το ύψος. (Δεξιά) Επανείσοδος του Διαστημικού Λεωφορείου. Η αεροδυναμική τριβή ελαττώνει την ταχύτητα αλλά η τριβή θερμαίνει τα θερμικά πλακίδια/ασπίδα του οχήματος σε πολύ υψηλές θερμοκρασίες (> 2000 °C)**

Η οπισθέλκουσα δύναμη/ατμοσφαιρική τριβή επηρεάζει επίσης άμεσα ένα διαστημικό σκάφος που επιστρέφει στη Γη. Για παράδειγμα, καθώς το διαστημικό λεωφορείο εισέρχεται στην ατμόσφαιρα για να προσγειωθεί στο Edwards AFB στην Καλιφόρνια, οι αστροναύτες χρησιμοποιούν την οπισθέλκουσα δύναμη/ατμοσφαιρική τριβή για να επιβραδύνουν το διαστημικό λεωφορείο (Σχήμα 66) από μια ταχύτητα τροχιάς 25 φορές την ταχύτητα του ήχου (27.900 χλμ./ώρα) σε μια ταχύτητα προσγείωσης περίπου 360 χλμ./ώρα. Παρομοίως, η οπισθέλκουσα δύναμη/ατμοσφαιρική τριβή επηρεάζει κάθε διαστημικό σκάφος σε πολύ χαμηλή τροχιά (λιγότερο από 130 χλμ), «τραβώντας» το πίσω στην ατμόσφαιρα της Γης μέσα σε λίγες μέρες ή εβδομάδες.

Η επίδραση της οπισθέλκουσας δύναμης/ατμοσφαιρικής τριβής στο διαστημικό σκάφος σε υψηλότερες τροχιές είναι πολύ πιο μεταβλητή. Μεταξύ των 130 χλμ. και των 600 χλμ. η δύναμη αυτή ποικίλει σημαντικά ανάλογα με τον τρόπο με τον οποίο αλλάζει η ατμόσφαιρα (πυκνώσεις ή αραιώσεις) λόγω των διακυμάνσεων της ηλιακής δραστηριότητας. Μετά από μήνες ή χρόνια, η επίδραση της μπορεί να προκαλέσει στα διαστημικά σκάφη σε αυτές τις τροχιές να χάσουν σταδιακά το υψόμετρο τους μέχρις ότου να επανέλθουν στην ατμόσφαιρα και να καούν. Το 1979, ο διαστημικός σταθμός Skylab υπέκυψε στις μακροπρόθεσμες επιδράσεις της οπισθέλκουσας δύναμης/ατμοσφαιρικής τριβής και επέστρεψε/έπεσε στη Γη. Πάνω από τα 600 χιλιόμετρα, η ατμόσφαιρα είναι τόσο αραιή, που η επίδραση της οπισθέλκουσας δύναμης/ατμοσφαιρικής τριβής είναι σχεδόν αμελητέα και τα διαστημικά σκάφη σε τροχιές άνω των 600 χιλιομέτρων είναι αρκετά ασφαλή.

Εκτός από την οπισθέλκουσα δύναμη/ατμοσφαιρική τριβή, πρέπει επίσης να εξετάσουμε τη φύση του αέρα. Στην επιφάνεια της θάλασσας, ο αέρας είναι περίπου 21% οξυγόνο, 78% άζωτο και 1% διάφορα άλλα αέρια, όπως αργό και διοξείδιο του άνθρακα. Κανονικά, συναντάμε τα άτομα οξυγόνου σε ομάδες των δύο μορίων, με συντομογραφία O<sub>2</sub>. Υπό κανονικές συνθήκες, όταν ένα μόριο οξυγόνου διασπάται για οποιοδήποτε λόγο, τα άτομα μετατρέπονται γρήγορα σε ένα νέο μόριο. Στα ανώτερα τμήματα της ατμόσφαιρας, τα μόρια οξυγόνου είναι λίγα και πολύ μακριά μεταξύ τους. Έτσι, όταν η ακτινοβολία και τα

φορτισμένα σωματίδια προκαλούν τη διάσπαση τους, δεν μπορούν να δημιουργήσουν ένα νέο μόριο αφήνοντας ως παράγωγο το ατομικό οξυγόνο, με συντομογραφία O.

Ποιο είναι όμως το πρόβλημα με το O; Όλοι έχουμε δει το αποτέλεσμα της έκθεσης ενός μεταλλικού κομματιού έξω για μερικούς μήνες ή χρόνια – τη «σκουριά». Από χημική άποψη, σκουριά είναι η οξείδωση και εμφανίζεται όταν τα μόρια οξυγόνου στον αέρα αντιδρούν με το μέταλλο. Το πρόβλημα της οξείδωσης είναι αρκετά σημαντικό παρουσία του O<sub>2</sub>, αλλά η οξείδωση είναι πολύ εντονότερη παρουσία του ατομικού οξυγόνου O. Τα διαστημικά οχήματα που εκτίθενται σε ατομικό οξυγόνο παρουσιάζουν φθορές ή σκουριά στις επιφανειών τους, γεγονός που μπορεί τελικά να μειώσει την αντοχή των υλικών, να αλλάξει τα θερμικά τους χαρακτηριστικά και να υποβαθμίσει την απόδοση των αισθητήρων. Από την θετική πλευρά, το περισσότερο ατομικό οξυγόνο που βρίσκεται στα ανώτερα στρώματα της ατμόσφαιρας συνδυάζεται με μόρια οξυγόνου σχηματίζοντας το ειδικό μόριο O<sub>3</sub>, που ονομάζεται όζον. Το όζον λειτουργεί σαν προστατευτική ασπίδα που εμποδίζει την επιβλαβή ακτινοβολία, ιδιαίτερα την υπεριώδη ακτινοβολία που προκαλεί τα εγκαύματα από τον ήλιο και τον καρκίνο του δέρματος.

### 6.3.3 Κενό

Πέρα από το λεπτό στρώμα της ατμόσφαιρας της Γης, αρχίζει το διάστημα. Το περιβάλλον κενού δημιουργεί τρία σημαντικά προβλήματα στα διαστημικά σκάφη

- Απαέρωση υλικών διαστημικών οχημάτων στο κενό
- Ψυχρή συγκόλληση - συγκόλληση μετάλλων
- Μεταφορά θερμότητας – μέσω ακτινοβολίας

Όπως είδαμε, η ατμοσφαιρική πυκνότητα μειώνεται δραματικά όσο αυξάνεται το υψόμετρο. Σε ένα ύψος περίπου 80 χλμ., η πυκνότητα των σωματιδίων είναι 10.000 φορές μικρότερη από ό, τι είναι στο επίπεδο της θάλασσας. Αν πάμε στα 960 χλμ., η πυκνότητα του αέρα είναι ένα τρισεκατομμύριο φορές μικρότερη από ότι στην επιφάνεια της Γης. Στο τέλειο κενό, με τον αυστηρότερο ορισμό της λέξης, η πυκνότητα του αέρα είναι μηδέν. Στην πράξη, ωστόσο, είναι σχεδόν αδύνατο να υπάρξει τέλειο κενό. Ακόμα και σε υψόμετρο 960 χιλιομέτρων, εξακολουθούμε να έχουμε περίπου 1.000.000 σωματίδια ανά κυβικό εκατοστό. Έτσι, όταν μιλάμε για το κενό του διαστήματος, μιλάμε για το βαθύ κενό.

Υπό κανονική ατμοσφαιρική πίεση στη επιφάνεια της θάλασσας, ο αέρας ασκεί πάνω από 101,325 N / m<sup>2</sup> δύναμης σε όλα όσα αγγίζει. Η σόδα μέσα σε ένα ποτήρι βρίσκεται υπό ελαφρώς υψηλότερη πίεση, αναγκάζοντας το διοξείδιο του άνθρακα (CO<sub>2</sub>) να παραμένει στο υγρό. Όταν ανοίγετε το δοχείο, απελευθερώνετε την πίεση, προκαλώντας κάποια ποσότητα CO<sub>2</sub> να βγει από το υγρό, με τη μορφή αφρού. Τα διαστημικά σκάφη αντιμετωπίζουν ένα παρόμοιο πρόβλημα. Μερικά υλικά που χρησιμοποιούνται για την κατασκευή τους, ειδικά κάποια σύνθετα υλικά, όπως ο γραφίτης/εποξική ρητίνη, μπορούν να παγιδεύουν μικροσκοπικές φυσαλίδες αερίου ενώ βρίσκονται υπό ατμοσφαιρική πίεση. Όταν τα υλικά αυτά βρεθούν στο κενό η πίεση αυτή απελευθερώνεται και τα αέρια αρχίζουν να διαφεύγουν. Η απελευθέρωση των παγιδευμένων αερίων στο κενό ονομάζεται απαέρωση.

Συνήθως, η απαέρωση δεν αποτελεί μεγάλο πρόβλημα. Ωστόσο, σε ορισμένες περιπτώσεις, τα αέρια μπορούν να βλάψουν ευαίσθητους αισθητήρες, όπως οι φακοί, ή να προκαλέσουν ηλεκτρικό τόξο/ηλεκτρική εκκένωση μεταξύ ηλεκτρικών εξαρτημάτων καταστρέφοντας τα. Για το λόγο αυτό, πρέπει να επιλέξουμε προσεκτικά και να δοκιμάσουμε υλικά που χρησιμοποιούνται στα διαστημικά οχήματα. Συχνά "ψήνουμε" ένα διαστημικό σκάφος σε θάλαμο θερμικού κενού πριν από την πτήση για να διασφαλιστεί ότι δεν θα υπάρξει απαέρωση των υλικών όταν βρεθεί στο διάστημα.

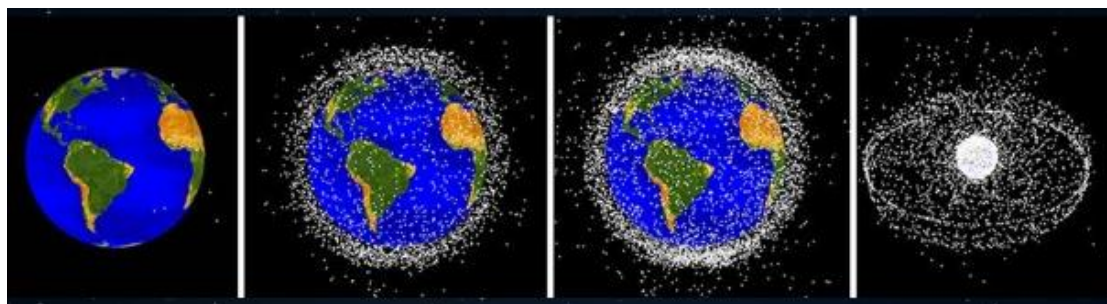
Ένα άλλο πρόβλημα που δημιουργείται στο κενό είναι το φαινόμενο της ψυχρής συγκόλλησης. Η ψυχρή συγκόλληση συμβαίνει μεταξύ μηχανικών μερών που βρίσκονται σε μικρή απόσταση μεταξύ τους. Στη Γη, μια ποσότητα αέρα εμποδίζει τα δύο εξαρτήματα να συγκολληθούν πράγμα που δεν συμβαίνει στο βαθύ κενό. Σε περίπτωση ψυχρής συγκόλλησης, οι ελεγκτές εδάφους πρέπει να δοκιμάσουν διάφορες τεχνικές για να «αποκολλήσουν» τα δύο μέρη. Για παράδειγμα, μπορεί να εκθέσουν το ένα μέρος στον Ήλιο και το άλλο στη σκιά, ώστε η διαφορική θέρμανση να προκαλέσει την επέκταση και συμπίεση των τμημάτων, αντίστοιχα, και τελικά να διαχωριστούν.

Λόγω της ψυχρής συγκόλλησης, καθώς και για πρακτικούς λόγους σχετικά με μηχανικές βλάβες, οι σχεδιαστές διαστημικών σκαφών προσπαθούν να αποφύγουν τη χρήση κινητών μερών. Ωστόσο, σε ορισμένες περιπτώσεις, όπως με τους περιστρεφόμενους τροχούς που χρησιμοποιούνται για τον έλεγχο του προσανατολισμού των διαστημικών σκαφών δεν υπάρχει εναλλακτική επιλογή. Στη Γη, κινούμενα μέρη, όπως αυτά που βρίσκονται στον κινητήρα του αυτοκινήτου σας, προστατεύονται από λιπαντικά όπως το πετρέλαιο. Το ίδιο ισχύει ορισμένες φορές για τα κινούμενα μέρη των διαστημικών σκαφών. Ωστόσο, λόγω του κενού, πρέπει να επιλέγουμε αυτά τα λιπαντικά προσεκτικά, έτσι ώστε να μην εξατμίζονται ή να απαερώνονται. Ο ξηρός γραφίτης (ο "μόλυβδος" στο μολύβι σας) αποτελεί ένα αποτελεσματικό λιπαντικό καθώς λιπαίνει καλά και δεν εξατμίζεται στο κενό όπως το κοινό πετρέλαιο.

Τέλος, το περιβάλλον κενού δημιουργεί πρόβλημα στη μεταφορά θερμότητας. Όπως θα δούμε, η θερμότητα μεταφέρεται με τρεις τρόπου, με αγωγή, συναγωγή και θερμική ακτινοβολία. Η αγωγή είναι η ροή θερμότητας απευθείας από ένα σημείο σε ένα άλλο μέσω ενός μέσου. Εάν κρατήσετε ένα μακρύ κομμάτι μέταλλο πάνω από μια φωτιά από την μία άκρη του, θα ανακαλύψετε γρήγορα πώς λειτουργεί η αγωγή θερμότητας όταν αρχίζουν να ζεσταίνονται τα δάχτυλά σας. Η δεύτερη μέθοδος μεταφοράς θερμότητας είναι η συναγωγή. Η συναγωγή συμβαίνει όταν η βαρύτητα, ο άνεμος ή κάποια άλλη δύναμη κινεί ένα υγρό ή ένα αέριο πάνω σε μια θερμή επιφάνεια. Τότε υπάρχει μεταφορά θερμότητας από την επιφάνεια στο ρευστό. Το φαινόμενο της συναγωγής το συναντάμε όταν νιώθουμε το κρύο από ένα αεράκι ή βράζουμε νερό σε ένα σκεύος πάνω στην εστία της ηλεκτρικής κουζίνας. *Μπορούμε να χρησιμοποιήσουμε και τις δύο αυτές μεθόδους για να μεταφέρουμε τη θερμότητα γύρω από ένα διαστημικό σκάφος, αλλά όχι για να αφαιρέσουμε τη θερμότητα από αυτό. Συνεπώς, χρησιμοποιούμε την τρίτη μέθοδο μετάδοσης, την θερμική ακτινοβολία.* Έχουμε ήδη συζητήσει για την ηλεκτρομαγνητική ακτινοβολία. Η θερμική ακτινοβολία είναι ένας τρόπος μεταφοράς ενέργειας από το ένα σημείο στο άλλο. Η θερμότητα που νιώθετε να προέρχεται από τα πηνία ενός θερμαντήρα χώρου μεταφέρεται με θερμική ακτινοβολία. Επειδή η θερμική ακτινοβολία δεν χρειάζεται ένα στερεό ή υγρό μέσο για να διαδοθεί, αποτελεί την κύρια μέθοδο μεταφοράς θερμότητας προς και εκτός ενός διαστημικού σκάφους.

### 6.3.4 Μικρομετεωρήτες και Διαστημικά απόβλητα

Το διάστημα γύρω από τη Γη δεν είναι άδειο. Στην πραγματικότητα, περιέχει πολλά θραύσματα ή διαστημικά απόβλητα τα περισσότερα από τα οποία τα έχουμε συνηθίσει. Αν έχετε δει ένα αστέρι που πέφτει, έχετε δει μόνο ένα κομμάτι από τους περισσότερους από 20.000 τόνους φυσικών υλικών - σκόνη, μετεωρίτες, αστεροειδείς και κομήτες - που επιστρέφουν στη Γη κάθε χρόνο. Για τα διαστημικά σκάφη ή τους αστροναύτες σε τροχιά, ο κίνδυνος να πληγούν από ένα μετεωρίτη ή έναν μικρομετεωρίτη, όπως ονομάζουμε αυτά τα φυσικά αντικείμενα, είναι ελάχιστος. Ωστόσο, από την αρχή της διαστημικής εποχής, διαστημικά απόβλητα έχουν αρχίσει να συσσωρεύονται από μια άλλη πηγή – τον άνθρωπο. Με σχεδόν κάθε διαστημική αποστολή, σπασμένα διαστημικά σκάφη, κομμάτια παλαιών προωθητήρων, ακόμη και γάντι αστροναύτη έχουν μείνει στο διάστημα. Το περιβάλλον κοντά στη Γη είναι γεμάτο από αυτά τα συντρίμια (περίπου 2200 τόνοι). Τα διαστημικά απόβλητα δημιουργούν έναν αυξανόμενο κίνδυνο για διαστημικά σκάφη και τους αστροναύτες σε τροχιά. Ένα διαστημικό σκάφος σε χαμηλή τροχιά είναι πλέον πιο πιθανό να χτυπήσει ένα διαστημικό απόβλητο από ότι ένα κομμάτι φυσικού υλικού. Το 1996, το διαστημικό σκάφος CERISE, έγινε το πρώτο πιστοποιημένο θύμα των διαστημικών σκουπιδιών, όταν μια κεραία του που χρησιμοποιεί την βαρύτητα για τον προσανατολισμό (gravity-gradient boom) αποκόπηκε κατά τη διάρκεια μιας σύγκρουσης με ένα κομμάτι που είχε απομείνει από την εκτόξευση του πυραύλου Ariane.



1957

2005

2018

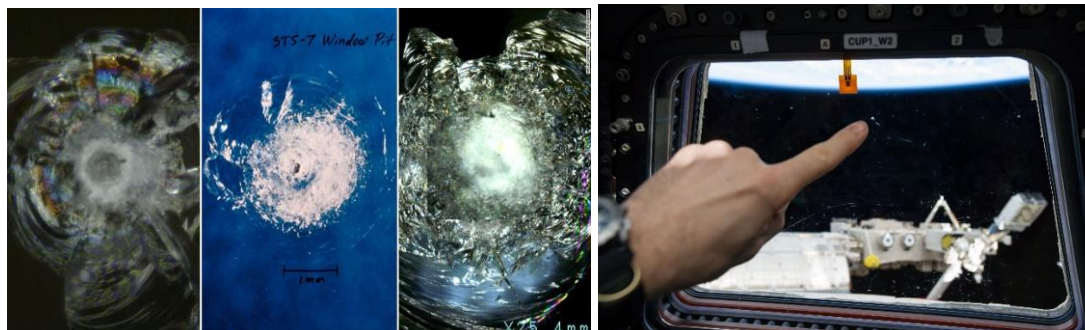
2030?

#### Σχήμα 67: Η εξέλιξη του αριθμού δορυφόρων και διαστημικών συντριμμιών/αποβλήτων

Η παρακολούθηση όλων αυτών των διαστημικών αποβλήτων είναι δουλειά της Βορειοαμερικανικής Διοίκησης Αεροδιαστημικής Άμυνας (North American Aerospace Defense Command NORAD) στο Κολοράντο Σπρινγκς, του Κολοράντο. Η NORAD χρησιμοποιεί ραντάρ και οπτικά τηλεσκόπια για την παρακολούθηση πάνω από 8000 αντικειμένων, μεγέθους ίσου με μια μπάλα του μπέιζμπολ και μεγαλύτερα, σε τροχιά γύρω από τη Γη. Ορισμένες εκτιμήσεις αναφέρουν ότι τουλάχιστον 40.000 κομμάτια πολύ μικρά για την παρακολούθηση από την NORAD βρίσκονται επίσης σε τροχιά [Wertz and Larson, 1999]. Μπορεί να υπάρχουν και δισεκατομμύρια πολύ μικρότερα κομμάτια – κομμάτια βαφής, κορδέλες από μέταλλο κ.λπ. τα οποία επίσης δεν μπορούν να καταγραφούν.

Η σύγκρουση όμως με ένα μικρό κομμάτι βαφής δεν αποτελεί πρόβλημα, σωστά; Λάθος! Σε χαμηλή τροχιά, αυτό το μικροσκοπικό κομμάτι κινείται με ταχύτητες που φτάνουν τα 7000 m/s ή και περισσότερο. Συνεπώς αποκτά μια μεγάλη ποσότητα ενέργειας - πολύ μεγαλύτερη από μια σφαίρα τουφεκίου! Ο πιθανός κίνδυνος όλων αυτών των διαστημικών αποβλήτων έγινε αισθητός κατά τη διάρκεια μιας αποστολής του διαστημικού λεωφορείου το 1983. Κατά τη διάρκεια της αποστολής, ένα μικρό κομμάτι βαφής μόλις 0,2 mm σε διάμετρο χτύπησε το παράθυρο του Challenger, δημιουργώντας έναν κρατήρα διαμέτρου 4 mm. Ευτυχώς, χωρίς

να τρυπήσει το υλικό. Ο κρατήρας, που φαίνεται στο σχήμα 68, κοστίζει περισσότερα από \$50.000 για επισκευή. Η έλεγχος άλλων διαστημικών σκαφών δείχνει ότι τέτοιες συγκρούσεις με πολύ μικρά αντικείμενα είναι στην πραγματικότητα πολύ συχνές. Ρώσοι μηχανικοί πιστεύουν ότι ένα κομμάτι διαστημικών συντριμμιών ίσως να έχει θέσει εκτός λειτουργίας ένα από τα διαστημικά σκάφη τους θέτοντας το σε μια τροχιά μεταφοράς.



**Σχήμα 68: Ραγίσματα σε τζάμια του Διαστημικού Λεωφορείου και του Διεθνή Διαστημικού Σταθμού από θραύσματα/μικρομετεωρήτες**

Επειδή υπάρχουν δισεκατομμύρια πολύ μικρά αντικείμενα και μόνο χιλιάδες πολύ μεγάλα αντικείμενα, τα διαστημικά σκάφη έχουν περισσότερες πιθανότητες να συγκρουστούν με ένα πολύ μικρό αντικείμενο. Για ένα διαστημικό σκάφος με επιφάνεια εγκάρσιας διατομής/διατομή 50-200 m που βρίσκεται σε υψόμετρο 300 χιλιομέτρων (τυπικό για αποστολές διαστημικού λεωφορείου), η πιθανότητα να πληγεί από ένα αντικείμενο μεγαλύτερο από μία μπάλα του μπέιζμπολ κατά τη διάρκεια ενός έτους σε τροχιά είναι περίπου 1/ 100.000 ή και λιγότερο [Wertz and Larson, 1999]. Η πιθανότητα να χτυπηθεί από κάτι που έχει διάμετρο 1 mm ή λιγότερο σε διάρκεια ενός έτους σε τροχιά είναι, ωστόσο, περίπου εκατό φορές μεγαλύτερη, ή περίπου 1/1000. Ένας σημαντικός κίνδυνος είναι η σύγκρουση δύο διαστημικών σκαφών που κινούνται με την τροχιακή τους ταχύτητα. Μια σύγκρουση μεταξύ δύο διαστημικών σκαφών μεσαίου μεγέθους θα είχε ως αποτέλεσμα ένα τεράστιο ποσό από συντρίμια κινούμενα με υψηλή ταχύτητα. Το προκύπτουν σύννεφο συντριμμιών καθώς περιστρέφεται αυξάνει σημαντικά την πιθανότητα να συγκρουστεί με ένα άλλο διαστημικό σκάφος. Συνεπώς, ένα φαινόμενο «ντόμινο»/χιονοστιβάδας θα μπορούσε να καταστρέψει ένα μέρος της διαστημικής πρόοδο που έχουμε καταφέρει εδώ και δεκαετίες. Έτσι, υπάρχει ένα αυξανόμενο ενδιαφέρον για το έκταση των συντριμμιών σε διάφορα υψόμετρα. Μέχρι σήμερα δεν υπάρχουν σχέδια για την απομάκρυνση τους από το διάστημα. Ορισμένες διεθνείς συμφωνίες στοχεύουν στη μείωση του ρυθμού με τον οποίο συσσωρεύονται αυτά τα απόβλητα - για παράδειγμα, απαιτώντας τα φθαρμένα διαστημικά σκάφη να τίθενται σε τροχιές "νεκροταφείων" μακριά από τα υπόλοιπα διαστημικά σκάφη. Ποιος ξέρει; Ίσως μια προσοδοφόρα δουλειά του 21ου αιώνα να είναι η αφαίρεση των σκουπιδιών σε τροχιά.

### 6.3.5 Η ακτινοβολία

Όπως είδαμε στην προηγούμενη ενότητα, μία από τις κύριες πηγές ηλεκτρομαγνητικής (ΗΜ) ακτινοβολίας είναι ο Ήλιος. Το μεγαλύτερο μέρος αυτής της ακτινοβολίας βρίσκεται στα ορατά και κοντά στα υπέρυθρα τμήματα του φάσματος ΗΜ. Παρ' ότι βλέπουμε το φως και

νιώθουμε τη θερμότητα του Ήλιου κάθε μέρα, ένα μικρότερο αλλά σημαντικό μέρος της ΗΜ που προέρχεται από τον Ήλιο είναι σε άλλα μήκη κύματος ακτινοβολίας, όπως οι ακτίνες Χ και οι ακτίνες γ. Τα διαστημικά σκάφη και οι αστροναύτες είναι πολύ πάνω από την ατμόσφαιρα, έτσι δεν προστατεύονται από την ΗΜ του Ήλιου. Η επίδραση της σε ένα διαστημικό σκάφος εξαρτάται από το μήκος κύματος της ακτινοβολίας. Σε πολλές περιπτώσεις, το ορατό φως που χτυπά τα ηλιακά πάνελ ενός διαστημικού σκάφους παράγει ηλεκτρική ενέργεια μέσω των ηλιακών κυψελών (που ονομάζονται επίσης φωτοβολταϊκές κυψέλες). Πρόκειται για μια φτηνή, άφθονη και αξιόπιστη πηγή ηλεκτρικής ενέργειας για ένα διαστημικό σκάφος. Αυτή η ακτινοβολία μπορεί επίσης να οδηγήσει σε αρκετά προβλήματα για τα διαστημικά σκάφη

- Θέρμανση σε εκτεθειμένες επιφάνειες
- Φθορά επιφανειών και ηλεκτρονικών εξαρτημάτων
- Ηλιακή πίεση

Η υπέρυθη ή θερμική ακτινοβολία οδηγεί στη θέρμανση των εκτεθειμένων επιφανειών ενός διαστημικού σκάφους και μπορεί να είναι χρήσιμη ή επιβλαβής για το διαστημικό σκάφος, ανάλογα με τα συνολικά θερμικά χαρακτηριστικά των επιφανειών. Οι ηλεκτρονικές συσκευές ενός διαστημικού σκάφους πρέπει να λειτουργούν περίπου σε κανονική θερμοκρασία δωματίου (20 ° C). Σε ορισμένες περιπτώσεις, η θερμική ενέργεια του Ήλιου οδηγεί στη θέρμανση των ηλεκτρονικών εξαρτημάτων. Σε άλλες περιπτώσεις, αυτή η θερμική ενέργεια – σε συνδυασμό με τη θερμότητα που παράγεται επί του σκάφους από τη λειτουργία ηλεκτρονικών εξαρτημάτων - μπορεί να κάνει το διαστημικό σκάφος πολύ «ζεστό». Όπως θα δούμε μελλοντικά, πρέπει να σχεδιάσουμε ένα σύστημα θερμικού ελέγχου στο διαστημικό σκάφος για να μετριάσουμε τη θερμοκρασία του.

Κανονικά, η ΗΜ ακτινοβολία στις υπόλοιπες περιοχές του φάσματος έχει μικρή επίδραση σε ένα διαστημικό σκάφος. Ωστόσο, η παρατεταμένη έκθεση στην υπεριώδη ακτινοβολία μπορεί να οδηγήσει σε φθορές στις επιστρώσεις των διαστημικών οχημάτων. Αυτή η ακτινοβολία είναι ιδιαίτερα επιβλαβής για τα ηλιακά κύτταρα, αλλά μπορεί επίσης να βλάψει και τα ηλεκτρονικά εξαρτήματα, δημιουργώντας την απαίτηση για θωρακισμένα ή σκληρά ηλεκτρονικά. Επιπλέον, κατά τη διάρκεια έντονων ηλιακών καταιγίδων, η ΗΜ ακτινοβολία στην περιοχή των ραδιοσυχνοτήτων του φάσματος μπορεί να επηρεάσει τον εξοπλισμό επικοινωνιών επί του σκάφους.

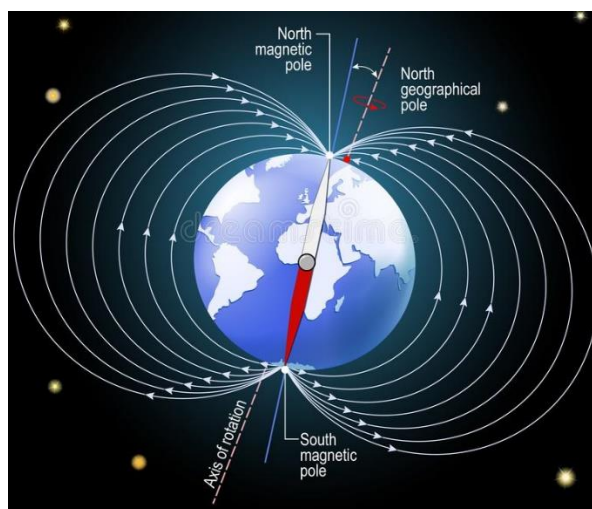
Όταν σηκώνετε το χέρι σας προς τον Ήλιο, το μόνο που αισθάνεστε είναι θερμότητα. Ωστόσο, όλο αυτό το φως που χτυπά το χέρι σας ασκεί επίσης μια πολύ μικρή πίεση. Νωρίτερα, είπαμε ότι η ΗΜ ακτινοβολία μπορεί να θεωρηθεί ως κύμα, όπως ο κυματισμός σε μια λίμνη. Ένας άλλος τρόπος να εξετάσουμε την ΗΜ ακτινοβολία είναι οι μικροσκοπικές δέσμες ενέργειας που ονομάζονται φωτόνια. Τα φωτόνια είναι δέσμες ενέργειας χωρίς μάζα που κινούνται με την ταχύτητα του φωτός. Αυτά «χτυπάνε» το χέρι σας, ασκώντας πίεση παρόμοια με την ατμοσφαιρική οπισθέλκουσα δύναμη αλλά πολύ μικρότερου μεγέθους. Στην πραγματικότητα, είναι μόνο περίπου 5N δύναμης για ένα τετραγωνικό χιλιόμετρο επιφάνειας. Ενώ αυτό μπορεί να μην ακούγεται πολύ, με την πάροδο του χρόνου αυτή η ηλιακή πίεση μπορεί να διαταράξει τον προσανατολισμό ενός διαστημικού σκάφους, αλλάζοντας τους κατεύθυνση.

### 6.3.6 Φορτισμένα σωματίδια

Ίσως η πιο επικίνδυνη πλευρά του διαστημικού περιβάλλοντος είναι η διάχυτη επίδραση των φορτισμένων σωματιδίων. Οι τρεις κύριες πηγές αυτών των σωματιδίων είναι

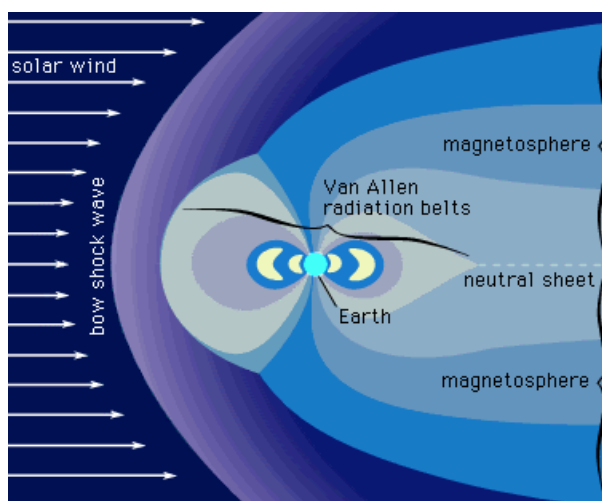
- Ο ηλιακός άνεμος και οι ηλιακές καταιγίδες
- Γαλαξιακές κοσμικές ακτίνες (GCRs)
- Οι ζώνες ακτινοβολίας Van Allen

Όπως είδαμε πριν, ο Ήλιος παράγει φορτισμένα σωματίδια (πρωτόνια και ηλεκτρόνια) ως μέρος του ηλιακού ανέμου - με ρυθμό  $1 \times 10^9$  kg /s. Κατά τη διάρκεια έντονων ηλιακών καταιγίδων, ο αριθμός των σωματιδίων που εκτοξεύονται μπορεί να αυξηθεί δραματικά. Εκτός από αυτή την πηγή φορτισμένων σωματιδίων πρέπει επίσης να λάβουμε υπόψη τα σωματίδια υψηλής ενέργειας από τις γαλαξιακές κοσμικές ακτίνες (GCRs). Τα GCR είναι σωματίδια παρόμοια με αυτά που βρίσκονται στον ηλιακό άνεμο ή σε ηλιακές καταιγίδες, αλλά προέρχονται έξω από το ηλιακό μας σύστημα. Τα GCR αντιπροσωπεύουν τον ηλιακό άνεμο από μακρινά αστέρια, απομεινάρια εκρήξεων αστεριών ή, ίσως, από την «Μεγάλη Έκρηξη» που δημιούργησε το Σύμπαν. Σε πολλές περιπτώσεις, ωστόσο, τα GCRs είναι πολύ πιο μαζικά και υψηλότερης ενέργειας σωματίδια από τα σωματίδια που προέρχονται από τον Ήλιο. Κατά ειρωνικό τρόπο, το ίδιο πράγμα που μας προστατεύει στη Γη από αυτά τα φορτισμένα σωματίδια δημιουργεί έναν τρίτο κίνδυνο, δυνητικά επιβλαβή για τα διαστημικά σκάφη και τους αστροναύτες σε τροχιά - τις ζώνες ακτινοβολίας Van Allen. Για να κατανοήσουμε τις ζώνες Van Allen, πρέπει να θυμόμαστε ότι η Γη έχει ένα ισχυρό μαγνητικό πεδίο ως αποτέλεσμα του υγρού πυρήνα σιδήρου. Το μαγνητικό αυτό πεδίο συμπεριφέρεται όπως οι απλοί μαγνήτες με τους οποίους παίζατε ως παιδί, αλλά είναι πολύ πιο ισχυρό. Παρόλο που δεν μπορείτε να νιώσετε αυτό το πεδίο γύρω σας, είναι πάντα εκεί. Πάρτε μια πυξίδα και θα δείτε πώς το πεδίο κινεί τη βελόνα να δείχνει προς τον μαγνητικό βορρά. Οι μαγνήτες αποτελούνται από ένα βόρειο πόλο στο ένα άκρο και ένα νότιο πόλο στο άλλο. Εάν έχετε παίξει ποτέ με μαγνήτες, έχετε ανακαλύψει ότι ο βόρειος πόλος προσελκύει τον νότιο πόλο (και αντίστροφα), ενώ δύο βόρειοι πόλοι (ή νότιοι πόλοι) απωθούν ο ένας τον άλλον. Αυτές οι γραμμές μαγνητικού πεδίου περιελίσσονται γύρω από τη Γη σχηματίζοντας τη μαγνητόσφαιρα, όπως φαίνεται στο Σχήμα 69.



Σχήμα 69: Το Μαγνητικό Πεδίο της Γης

Θυμηθείτε ότι τα μαγνητικά πεδία επηρεάζουν την κίνηση των φορτισμένων σωματιδίων. Αυτή η βασική αρχή μας επιτρέπει να "κατευθύνουμε" τις δέσμες ηλεκτρονίων με μαγνήτες μέσα στις τηλεοράσεις μας (τηλεοράσεις καθοδικού σωλήνα). Ομοίως, τα φορτισμένα σωματίδια του ηλιακού ανέμου και τα GCR σχηματίζουν δέσμες που εισέρχονται στο μαγνητικό πεδίο της Γης όπως η βροχή που «χτυπά» μια ομπρέλα. Ακριβώς όπως η ομπρέλα εκτρέπει τις σταγόνες βροχής πάνω στην καμπύλη επιφάνεια της, το μαγνητικό πεδίο της Γης απομακρύνει τα φορτισμένα σωματίδια, διατηρώντας μας ασφαλείς. Η περιοχή όπου αρχίζει η αλληλεπίδραση ηλιακού ανέμου με το μαγνητικό πεδίο της Γης ονομάζεται Τοξοειδές Κύμα Κρούσης (bow shock). Πριν από αυτό υπάρχει το Εμπρόσθιο Κύμα Κρούσης (fore shock). Καθώς ο ηλιακός άνεμος εκτρέπεται από το μαγνητικό πεδίο της Γης, μετατοπίζει τις μαγνητικές γραμμές, όπως μπορείτε να δείτε στο Σχήμα 70. Στο ηλεκτρομαγνητικό φάσμα, η Γη μοιάζει με μια βάρκα που ταξιδεύει μέσα στο νερό με αναταράξεις στο πίσω μέρος της. Η περιοχή στο εμπρόσθιο κύμα κρούσης, όπου τα φορτισμένα σωματίδια του ηλιακού ανέμου έρχονται σε επαφή με τις γραμμές του μαγνητικού πεδίου ονομάζεται μαγνητόπαυση ενώ η περιοχή ακριβώς πίσω από τη Γη ονομάζεται μαγνητούρα. Όπως θα δούμε, τα φορτισμένα σωματίδια μπορούν να επηρεάσουν τα διαστημικά σκάφη γύρω από την προστατευτική μαγνητόσφαιρα της Γης.



**Σχήμα 70: Αλληλοεπίδραση του Ηλιακού Ανέμου και του Μαγνητικού πεδίου της Γης**

Καθώς ο ηλιακός άνεμος αλληλοεπιδρά με το μαγνητικό πεδίο της Γης, μερικά σωματίδια υψηλής ενέργειας παγιδεύονται και συγκεντρώνονται μεταξύ των γραμμών του πεδίου. Αυτές οι περιοχές συγκέντρωσης είναι οι ζώνες ακτινοβολίας Van Allen (από τον καθηγητή James Van Allen του Πανεπιστημίου της Αϊόβα). Ο καθηγητής Van Allen τις ανακάλυψε από δεδομένα που συγκέντρωσε ο Explorer 1, ο πρώτος δορυφόρος της Αμερικής, που ξεκίνησε το 1958. Παρόλο που τις αποκαλούμε "ζώνες ακτινοβολίας", το διάστημα δεν είναι πραγματικά ραδιενεργό. Οι επιστήμονες συχνά συγχέουν τα φορτισμένα σωματίδια με την ΗΜ ακτινοβολία και αποκαλούν και τα δύο ως ακτινοβολία επειδή τα αποτελέσματά τους είναι παρόμοια. Συνειδητοποιήστε, ωστόσο, ότι στην πραγματικότητα ασχολούμαστε με φορτισμένα σωματίδια. (Ίσως θα πρέπει να ονομάσουμε τις ζώνες ακτινοβολίας, "ζώνες φορτισμένων σωματιδίων", επειδή είναι πραγματικά γεμάτες από φορτισμένα σωματίδια και καταλαμβάνουν μια περιοχή από πόλο σε πόλο γύρω από τη Γη!)

Είτε τα φορτισμένα σωματίδια προέρχονται απευθείας από τον ηλιακό άνεμο, είτε από τις ζώνες Van Allen ή από κάποια άλλη πλευρά του γαλαξία, μπορούν να βλάψουν τα διαστημικά σκάφη με τρεις τρόπους

- Φόρτιση
- επιφανειακή διάβρωση/ιονοβολή Sputtering



• Μεμονωμένα φαινόμενα

Η επίδραση των φορτισμένων σωματιδίων στο διαστημικό σκάφος είναι παρόμοια με την επίδραση που έχει σε εμάς ένα δάπεδο με μοκέτα όταν περπατάμε πάνω του φορώντας κάλτσες. Δημιουργούμε μια στατική φόρτιση που εκφορτίζεται όταν αγγίζουμε κάτι μεταλλικό. Η φόρτιση των διαστημικών σκαφών προκύπτει από την συσσώρευση φορτίων από διάφορα μέρη του σκάφους. Αφού δημιουργηθεί αυτή η φόρτιση, μπορεί να συμβεί ηλεκτρική εκκένωση με καταστροφικά αποτελέσματα - ζημιά στις επιφανειακές επιστρώσεις, φθορά των ηλιακών συλλεκτών, απώλεια ισχύος ή απενεργοποίηση και μόνιμη βλάβη των ηλεκτρονικών.

Μερικές φορές, τα φορτισμένα σωματίδια που έχουν παγιδευτεί στη μαγνητόσφαιρα αλληλοεπιδρούν με την ατμόσφαιρα της Γης σε ένα εκθαμβωτικό φαινόμενο που ονομάζεται Πολικό Σέλας, όπως φαίνεται στο Σχήμα 71. Το φαινόμενο αυτό προκύπτει από τα φορτισμένα σωματίδια που κατευθύνονται προς τη Γη κατά μήκος των μαγνητικών γραμμών που συγκλίνουν στους πόλους. Καθώς τα σωματίδια αλληλοεπιδρούν με την ατμόσφαιρα, το αποτέλεσμα είναι παρόμοιο με αυτό που συμβαίνει σε μία λάμπα νέον – φορτισμένα σωματίδια αλληλοεπιδρούν με το αέριο δημιουργώντας φως. Στη Γη βλέπουμε μια ουράνια κουρτίνα στον ουρανό.



**Σχήμα 71: Πολικό Σέλας**

Αυτά τα σωματίδια μπορούν επίσης να βλάψουν την επιφάνεια ενός διαστημικού οχήματος λόγω της υψηλής ταχύτητάς τους. Είναι σαν να "αμμοβολή" για το διαστημικό σκάφος και αναφέρουμε αυτό το ζήτημα ως επιφανειακή διάβρωση/sputtering. Για μεγάλο χρονικό διάστημα, η επιφανειακή διάβρωση/sputtering μπορεί να προκαλέσει ζημιά στις θερμικές επιχρίσεις και στους αισθητήρες του διαστημικού οχήματος.

Τέλος, ένα μόνο φορτισμένο σωματίδιο μπορεί να διεισδύσει βαθιά μέσα στο διαστημικό σκάφος και να διαταράξει τα ηλεκτρονικά. Κάθε διαταραχή είναι γνωστή ως μεμονωμένο φαινόμενο (ΜΦ). Οι ηλιακές εκλάμψεις και το GCR μπορούν να προκαλέσουν ΜΦ. Ένας τύπος ΜΦ είναι μεμονωμένης διαταραχής (ΜΔ) ή "bitflip". Αυτό συμβαίνει όταν η πρόσκρουση ενός σωματιδίου υψηλής ενέργειας αλλάζει ένα μέρος της μνήμης ενός

υπολογιστή από το 1 στο 0 ή το αντίστροφο και είναι ικανό να προκαλέσει σημαντικές αλλαγές στις λειτουργίες ενός διαστημικού σκάφους. Για παράδειγμα, η αλλαγή ενός bit από 1 σε 0 μπορεί να προκαλέσει την απενεργοποίηση του διαστημικού σκάφους ή την λάθος κατεύθυνση της κεραίας. Μερικοί επιστήμονες πιστεύουν ότι μια ΜΔ ήταν η αιτία της ασταθούς συμπεριφοράς του διαστημικού σκάφους Magellan όταν τέθηκε για πρώτη φορά σε τροχιά γύρω από την Αφροδίτη. Είναι δύσκολο να αποτρέψουμε αυτές τα τυχαία φαινόμενα. Η θωράκιση του διαστημικού σκάφους προσφέρει κάποια προστασία, αλλά οι χειριστές των διαστημικών σκαφών πρέπει να γνωρίζουν την πιθανότητα αυτών των φαινομένων και να ξέρουν πώς να ανακτήσουν ένα διαστημικό σκάφος σε περίπτωση που χρειαστεί.

# Κεφάλαιο 7

## Τροχιακή Μηχανική

Ως *δορυφόρος* ορίζεται επιστημονικά οποιοδήποτε αντικείμενο περιστρέφεται γύρω από ένα πλανήτη. Για παράδειγμα, η σελήνη είναι φυσικός δορυφόρος της Γης. Όπως όλοι γνωρίζουμε, υπάρχουν οχήματα τα οποία κινούνται γύρω από την Γη και ονομάζονται *τεχνητοί δορυφόροι* (ή, για συντομία, απλώς δορυφόροι). Παρόλο που οτιδήποτε σε τροχιά γύρω από την Γη είναι δορυφόρος, ο όρος τυπικά χρησιμοποιείται για να περιγράψει ένα χρήσιμο αντικείμενο το οποίο τοποθετήθηκε σε τροχιά γύρω από την Γη σκοπίμως για να τελέσει μία ορισμένη αποστολή ή έργο. Συχνά ακούμε για μετρολογικούς, τηλεπικοινωνιακούς, επιστημονικούς, και στρατιωτικούς/κατασκοπευτικούς δορυφόρους οι οποίοι λειτουργούν σε διάφορες τροχιές (ύψη) και έχουν διαφορετικά φορτία/όργανα ανάλογα με τη αποστολή τους.

Οι δορυφόροι μέχρι και πρόσφατα δεν παράγονται μαζί. Νέες διαστημικές αποστολές/επιχειρήσεις όπως η Oneweb<sup>3</sup> και η Starlink<sup>4</sup> (SpaceX), αποτελούν τις πρώτες 'γραμμές μαζικής παραγωγής' δορυφόρων για την χρήση μεγα-σημών (mega-constellations) από τηλεπικοινωνιακούς δορυφόρους. Οι περισσότεροι δορυφόροι κατασκευάζονται ειδικά για ορισμένες αποστολές / εργασίες. Υπάρχουν και άλλες εξαιρέσεις όπως π.χ. οι δορυφόροι GPS με πάνω από 20 ίδιους δορυφόρους σε τροχιά και οι δορυφόροι Iridium που αριθμούν πάνω από 60.

Επίσης, υπάρχουν και πάνω από 23,000 αντικείμενα που περιστρέφονται γύρω από την Γη και που είναι αρκετά μεγάλα έτσι ώστε να γίνονται αντιληπτά από ειδικά ραντάρ, να μπορούν να καταγραφούν και να παρακολουθηθούν. Αυτά περιλαμβάνουν αντικείμενα όπως δορυφόροι που μπήκαν σε λάθος τροχιά, δορυφόροι με εξαντλημένες πηγές ενέργειας (μπαταρίες), θραύσματα από πυραύλους φορείς κ.α. Αυτά τα αντικείμενα, είναι επίσης «δορυφόροι» υπό την ευρεία έννοια, και ονομάζονται «διαστημικά σκουπίδια/απόβλητα».

Ο πρώτος δορυφόρος στο διάστημα ήταν ο σοβιετικός *Σπούτνικ (Sputnik)*, ο οποίος εκτοξεύθηκε στις 4 Οκτωβρίου 1957. Ήταν μια μεταλλική μπάλα διαμέτρου 58 εκατοστών/βάρους 83 κιλών. Μετέφερε θερμομέτρο, μπαταρία, και ένα πομπό που μετέδιδε μια σειρά από τόνους οι οποίοι αντιστοιχούσαν στις αλλαγές της θερμοκρασίας. Το εσωτερικό του σκάφους περιείχε άζωτο. Επίσης υπήρχαν 4 κεραιές στο εξωτερικό του σκάφους για την μετάδοση του σήματος στην συχνότητα των 27 περίπου μεγακύκλων, δηλαδή σε μια διαδεδομένη και εύκολα «προσβάσιμη» συχνότητα για όλο τον κόσμο. Οι σημερινοί δορυφόροι είναι βεβαίως πιο περίπλοκοι όμως οι βασικές αρχές παραμένουν ίδιες.

### 7.1 Διαστημικοί Φορείς (Space Launchers)

Όλοι οι δορυφόροι σήμερα τοποθετούνται σε τροχιά είτε πάνω σε κάποιο είδος πυραύλου (φορέας ή εκτοξευτής). Αρκετές χώρες και επιχειρήσεις έχουν δυνατότητα εκτόξευσης πυραύλων και δορυφόρων μερικών τόνων και τοποθέτησής τους στο διάστημα με ασφάλεια.

<sup>3</sup> <https://www.oneweb.world/>

<sup>4</sup> <https://www.starlink.com/>

Στις περισσότερες εκτοξεύσεις, ο πύραυλος αρχικά κατευθύνεται κάθετα. Αυτό βγάζει τον πύραυλο από το πιο πυκνό μέρος της ατμόσφαιρας γρηγορότερα ελαχιστοποιώντας την κατανάλωση καυσίμων. Μετά την κάθετη εκτόξευση ο πύραυλος χρησιμοποιεί αδρανειακά συστήματα καθοδήγησης για να γίνουν οι απαιτούμενες αλλαγές στην κατεύθυνση και να μπει ο πύραυλος στην προκαθορισμένη πορεία. Όταν ο πύραυλος φθάσει σε αραιή ατμόσφαιρα, γύρω στα 200 km, το σύστημα πλοήγησης ενεργοποιεί μικρούς πυραύλους/προωθητές (thrusters) έτσι ώστε να στρέψουν τον φορέα/πύραυλο σε οριζόντια θέση. Μετά ο δορυφόρος αποδεσμεύεται και οι πύραυλοι//προωθητές ενεργοποιούνται για να εξασφαλίσουν τον απαιτούμενο διαχωρισμό μεταξύ του δορυφόρου και του φορέα. Εάν ο σχεδιασμός το απαιτεί, στην συνέχεια μπορούν να ενεργοποιηθούν ξανά τα συστήματα ώσης έτσι ώστε να μεταβληθεί η τροχιά.

Ένας πύραυλος πρέπει να επιταχύνει τουλάχιστον μέχρι τα 40.320 km/ώρα για να διαφύγει από την βαρύτητα της Γης και να εισέλθει στο διάστημα. Η ταχύτητα διαφυγής είναι πολύ μεγαλύτερη από αυτή που χρειάζεται για να τεθεί δορυφόρος σε τροχιά γύρω από την Γη, καθότι σκοπός είναι η περιστροφή του δορυφόρου γύρω από την Γη και όχι η διαφυγή. Η ταχύτητα μιας κυκλικής τροχιάς είναι περίπου 27500 km/ώρα σε ύψος 240 km. Η ταχύτητα περιστροφής του δορυφόρου εξαρτάται από το ύψος και το σχήμα της τροχιάς. Όσο πιο κοντά στην Γη, τόσο είναι μεγαλύτερη η ταχύτητα του δορυφόρου. Για να διατηρηθεί η τροχιά ενός δορυφόρου σε ύψος 35780 μέτρων (γεωστατική τροχιά) πάνω από την επιφάνεια της Γης, ο δορυφόρος πρέπει να έχει ταχύτητα περίπου 11,300 km/ώρα. Αυτή η ταχύτητα και απόσταση επιτρέπει στον δορυφόρο μια περιστροφή ανά 24 ώρες.

## 7.2 Συστήματα Δορυφόρων

Σχεδόν όλοι οι δορυφόροι έχουν ορισμένα κοινά συστήματα.

- Έχουν μεταλλικό σώμα/δομή (σασί) ή σώμα από σύνθετα υλικά. Το σώμα περιέχει όλα τα μέρη του δορυφόρου και πρέπει να αντέξει στις δυνάμεις/φορτία που ασκούνται σε αυτό κατά την εκτόξευση.
- Φέρουν ηλιακές κυψέλες για παραγωγή ρεύματος και συσσωρευτές/μπαταρίες για αποθήκευση του ρεύματος και τροφοδότηση των συστημάτων.
- Έχουν ηλεκτρονικό υπολογιστή για την επόπτευση και έλεγχο των συστημάτων του δορυφόρου.
- Διαθέτουν τηλεπικοινωνιακό σύστημα συμπεριλαμβανομένων και των κεραιών για την επικοινωνία του δορυφόρου με την Γη. Έτσι το κέντρο ελέγχου του δορυφόρου στην Γη μπορεί να ζητήσει πληροφορίες από τον δορυφόρο σχετικά με την κατάσταση των συστημάτων και την «υγεία» του ή να στείλει εντολές στον δορυφόρο όπως π.χ. να αλλάξει προσανατολισμό ή να χρησιμοποιήσει εφεδρικά συστήματα σε περίπτωση βλάβης.
- Σύστημα ελέγχου στάσης/κατεύθυνσης/προσανατολισμού. Τα συστήματα αυτά κρατούν τον δορυφόρο στην επιθυμητή στάση (π.χ. σταθερό σε μια κατεύθυνση και προσανατολισμό). Δύναται να αποτελείται από γυροσκόπια, οπτικούς αισθητήρες (sun sensor, star sensor) κ.α.

## 7.3 Κατηγορίες Δορυφόρων

Οι δορυφόροι είναι πολλών διαφορετικών σχημάτων και μεγεθών και επιτελούν διαφορετικό έργο. Για παράδειγμα:

- Μετεωρολογικοί δορυφόροι: Βοηθούν τους μετεωρολόγους να διαπιστώσουν τι συμβαίνει στην ατμόσφαιρα κάθε συγκεκριμένη στιγμή και να προγνώσουν τον καιρό. Οι δορυφόροι αυτοί γενικά περιέχουν επιστημονικά όργανα και φωτογραφικά συστήματα και στέλνουν στη Γη απεικονίσεις από το διάστημα.
- Τηλεπικοινωνιακοί δορυφόροι: Χρησιμοποιούνται για τηλεφωνία και διαβίβαση δεδομένων. Το κεντρικό σύστημά τους είναι οι αναμεταδότες/πομποδέκτες που

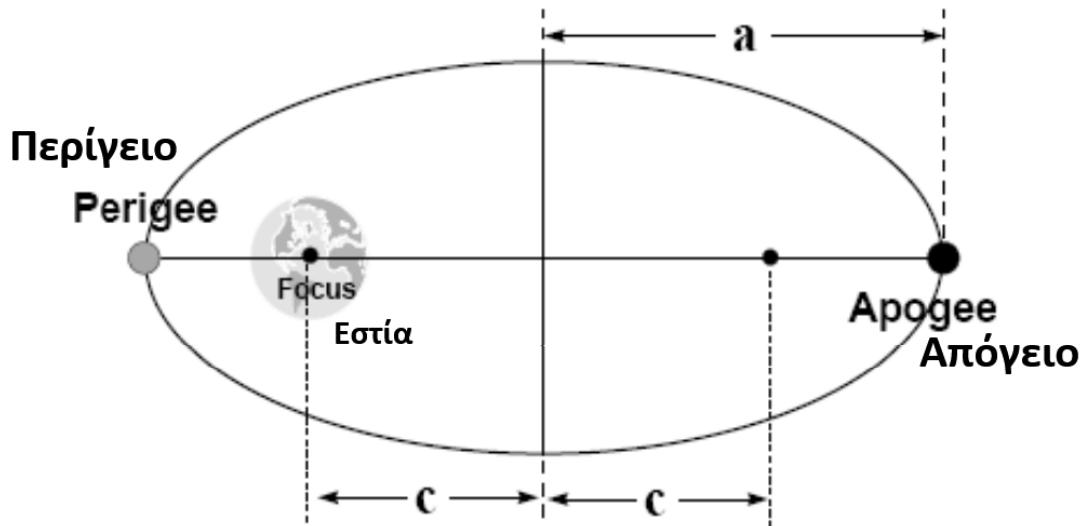
λαμβάνουν τα σήματα σε ορισμένες συχνότητες και τα αναμεταδίδουν σε διαφορετικές. Ένας τέτοιος δορυφόρος εμπεριέχει εκατοντάδες ή χιλιάδες αναμεταδότες. Οι δορυφόροι αυτοί βρίσκονται συνήθως σε *γεωσύγχρονη* τροχιά (βλ παρακάτω, 3.4 Τροχιές)

- Δορυφόροι ραδιοτηλεοπτικών εκπομπών: Μεταδίδουν τηλεοπτικά/ραδιοφωνικά σήματα από ένα τόπο σε έναν άλλο (συγγενείς με τους τηλεπικοινωνιακούς δορυφόρους).
- Επιστημονικοί δορυφόροι: Χρησιμοποιούνται για επιστημονικούς σκοπούς. Ο πιο γνωστός δορυφόρος είναι το τηλεσκόπιο Χαμπλ (Hubble). Όμως υπάρχουν και πιο απλοί π.χ. ένας σφαιρικός δορυφόρος που αποτελείται μόνο από κάτοπτρα για την ανάκλαση ακτινών Laser που στέλνονται από την Γη με σκοπό την συλλογή μετρήσεων που χρησιμοποιούνται για μελέτες στην γεωδαισία (π.χ. LaGeoS 1).
- Δορυφόροι Πλοήγησης: Αποστέλλουν πληροφορίες που χρησιμοποιούνται από δέκτες στην Γη (ξηρά, θάλασσα και αέρα) για πλοήγηση. Π.χ GPS, Galileo.
- Δορυφόροι Διάσωσης: Αναμεταδίδουν σήματα κινδύνου που λαμβάνονται από σκάφη στην θάλασσα ή τον αέρα.
- Δορυφόροι Παρατήρησης: Παρατηρούν τον πλανήτη και καταγράφουν θερμοκρασίες, βλάστηση, πάγους κ.α. (Sentinel 2)
- Στρατιωτικοί Δορυφόροι: Συλλέγουν πληροφορίες στρατιωτικής φύσεως, χρησιμοποιώντας υψηλής τεχνολογίας συστήματα. Πολλές από τις πραγματικές εφαρμογές και πληροφορίες σχετικά με τη χρησιμότητά τους παραμένουν μυστικές. Οι εφαρμογές τους περιλαμβάνουν, αλλά δεν περιορίζονται, τις ακόλουθες:
  - Αναμετάδοση κρυπτογραφημένων μηνυμάτων.
  - Παρακολούθηση πυρηνικών δραστηριοτήτων.
  - Παρατήρηση κινήσεων αντιπάλων στην ξηρά και θάλασσα.
  - Έγκαιρη προειδοποίηση για εκτόξευση πυραύλων.
  - Παρακολούθηση επίγειων τηλεπικοινωνιών μεταδόσεων.
  - Απεικόνιση (radar, υπέρυθρες κτλ).
  - Φωτογράφιση υψηλής ανάλυσης.
  - Πειραματισμό με όπλα (βλέπε πρόγραμμα «Πόλεμος των Άστρων», κ.α.)

#### 7.4 Τροχιές

*Η πορεία που ακολουθεί ένας δορυφόρος ονομάζεται τροχιά. Οι τροχιές είναι κυκλικές ή ελλειπτικές. (Ακόμα και στη περίπτωση στην οποία οι δορυφόροι μπαίνουν σε σπειροειδή τροχιά συντριβής στην γήινη ατμόσφαιρα, η τροχιά τους είναι ελλειπτική με συνεχώς μεταβαλλόμενα χαρακτηριστικά.)*

*Στις κυκλικές τροχιές η απόσταση του δορυφόρου από την Γη είναι σταθερή. Στις ελλειπτικές, η Γη βρίσκεται σε μια από τις δύο εστίες. Στην περίπτωση αυτή, όταν ο δορυφόρος βρίσκεται πιο κοντά στην Γη, τότε λέμε ότι βρίσκεται στο **περίγειο**, ενώ όταν βρίσκεται στην πιο μακρινή θέση βρίσκεται στο **απόγειο**. (βλ. σχήμα 72)*



Σχήμα 72: Ελλειπτική Τροχιά.

Υπάρχουν τροχιές με ειδική σημασία και ονομασία:

- Οι **γεωσύγχρονες** τροχιές είναι αυτές με περίοδο (χρόνο περιστροφής γύρω από την Γη) όσο και ο χρόνος περιστροφής της Γης γύρω από τον εαυτό της (περίπου 24 ώρες).
- Οι **γεωστατικές** είναι γεωσύγχρονες, κυκλικές τροχιές με κλίση  $0^\circ$ . **Ο δορυφόρος παραμένει σε σταθερό σημείο πάνω από τον Ισημερινό.**
- **Τροχιές Μολνίγια (Molniya)** : τροχιές με μεγάλη ελλειπτικότητα και κλίση.
- **Πολικές τροχιές:** τροχιές με κλίση περίπου  $90^\circ$  (δηλαδή περνάνε πάνω από τους πόλους).
- **Ηλιοσύγχρονες** τροχιές. Σταθερή γωνία δορυφόρου σε σχέση με τον Ήλιο.
- **Ανάδρομες** τροχιές. Τροχιές με κατεύθυνση από την Ανατολή προς την Δύση.

Η τροχιά κάθε δορυφόρου **εξαρτάται από την αποστολή** του κάθε δορυφόρου και βεβαίως αποτελεί βασική παράμετρο του σχεδιασμού<sup>5</sup>. Πρέπει να αναφερθεί ότι οι δορυφόροι σε χαμηλές τροχιές γύρω από την Γη κινούνται σε μόρια της γήινης ατμόσφαιρας και σε συνδυασμό με την υψηλή ταχύτητά τους υπόκεινται σε οπισθέλκουσα. Η δύναμη αυτή προκαλεί μια σπειροειδή τροχιά και ο δορυφόρος εισέρχεται στην γήινη ατμόσφαιρα μετά από κάποιο χρονικό διάστημα, το οποίο πολλές φορές είναι δύσκολο να υπολογισθεί με ακρίβεια.

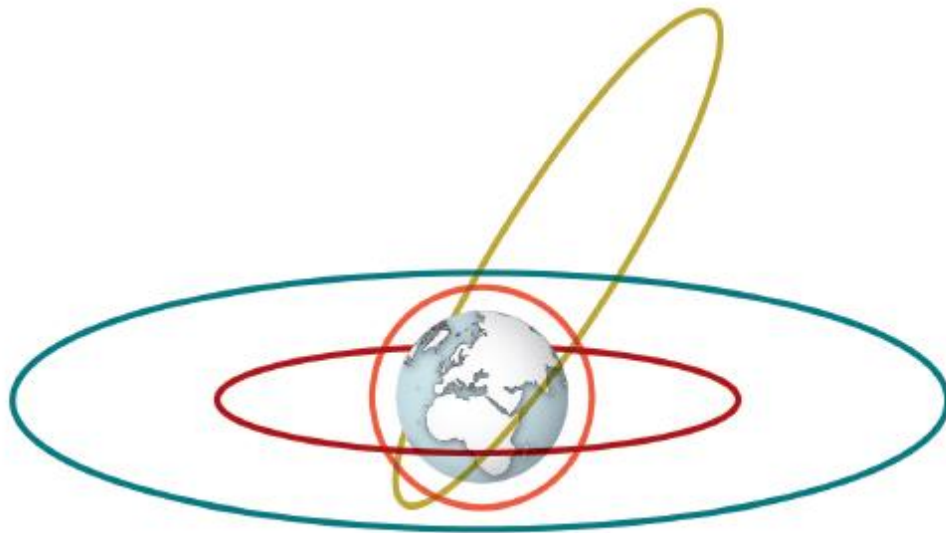
#### 7.4.1 Ύψη δορυφόρων

Για τα ύψη των δορυφόρων υπάρχουν οι ακόλουθες γενικές παρατηρήσεις:

- Σε ύψη από **400 έως 2000 km** τοποθετούνται **δορυφόροι παρατήρησης** για χαρτογράφηση, διαπίστωση μετακίνησης πάγου και άμμου (έρημος), διαπίστωση οικολογικών αλλαγών (εξαφάνιση δασών), έρευνα για αποθέματα μετάλλων, έρευνα με εφαρμογή στην γεωργία. Σε αυτό το εύρος βρίσκονται επίσης, **δορυφόροι έρευνας και διάσωσης** που αναμεταδίδουν σήματα κινδύνου καθώς και το Διαστημικό Λεωφορείο και ο Διαστημικός Σταθμός. Δορυφόροι σε αυτά τα ύψη λέγεται ότι βρίσκονται σε Χαμηλή Γήινη Τροχιά (ΧΓΤ)/Low Earth Orbit (LEO)

<sup>5</sup> Για να οριστεί πλήρως μια τροχιά χρειάζονται 6 παράμετροι οι οποίοι ονομάζονται «Στοιχεία του Kepler».

- Στις τροχιές με ύψος **2000 έως 30000 km** ύψος βρίσκονται κυρίως **δορυφόροι πλοήγησης ή επιστημονικοί δορυφόροι**. Αποστολή τέτοιων δορυφόρων είναι για παράδειγμα η συλλογή στοιχείων για το περιβάλλον και τα συστήματα προσδιορισμού θέσης, ταχύτητας και χρόνου. Δορυφόροι σε αυτά τα ύψη λέγεται ότι βρίσκονται σε Μέση Γήινη Τροχιά (ΜΓΤ)/Medium Earth Orbit (MEO)
- Στις γεωστατικές τροχιές (**ύψος 35780 km**) βρίσκονται **μετρολογικοί, τηλεπικοινωνιακοί, ραδιο/τηλεοπτικοί** δορυφόροι. κ.α. Δορυφόροι σε αυτά τα ύψη λέγεται ότι βρίσκονται σε Γεωστατική Τροχιά (ΓΕΤ)/Geostationary Orbit (GEO)



- LEO = Low Earth Orbit ( $\approx 200 - 2,000$  km)
- MEO = Medium Earth Orbit ( $\approx 2,000 - 35,000$  km)
- GEO = Geostationary Orbit ( $\approx 36,000$  km)
- HEO = Highly Elliptical Orbit ( $\approx 200 - 50,000$  km)

**Σχήμα 73: Ύψη δορυφόρων – Γήινες Τροχιές**

Όπως είπαμε ένας δορυφόρος μπορεί να παραμείνει στην ίδια τροχιά για μια μεγάλη χρονική περίοδο, αφού η έλξη της βαρύτητας της γης εξισορροπεί τη φυγόκεντρο δύναμη. Δεδομένου ότι οι δορυφόροι κινούνται σε τροχιά έξω από την ατμόσφαιρα, δεν υπάρχει αντίσταση από τον αέρα και, επομένως, σύμφωνα με το νόμο της αδράνειας, η ταχύτητα του δορυφόρου είναι σταθερή, με συνέπεια να είναι σταθερή και η τροχιά του γύρω από τη Γη για πολλά έτη. Η δύναμη της βαρύτητας μικραίνει όσο απομακρυνόμαστε από τη Γη, ενώ η φυγόκεντρος δύναμη αυξάνεται όσο μεγαλώνει η τροχιακή ταχύτητα. Επομένως, ένας δορυφόρος χαμηλής τροχιάς (συνήθως στα 800km από τη Γη) εκτίθεται σε μια μεγάλη βαρυτική έλξη και πρέπει να κινηθεί με μεγάλη ταχύτητα για να αποκτήσει μια αντίστοιχη φυγόκεντρο δύναμη. Κατά συνέπεια, υπάρχει άμεση σχέση μεταξύ της απόστασης από τη Γη και της τροχιακής ταχύτητας ενός δορυφόρου. Σε απόσταση 36000 km, η περίοδος περιστροφής είναι 24 ώρες, χρόνος που αντιστοιχεί στο χρόνο μιας περιστροφής της Γης. Σε αυτήν την απόσταση ένας δορυφόρος επάνω από τον ισημερινό θα είναι στάσιμος («στατικός») σε σχέση με τη γη. Παρακάτω παρουσιάζουμε τις δύο πιο δημοφιλείς τροχιές:

**Γεωστατική τροχιά:** Οι γεωστατικές τροχιές στα 36000 km πάνω από τον γήινο ισημερινό είναι γνωστές κυρίως για τους πολλούς τηλεπικοινωνιακούς δορυφόρους, συμπεριλαμβανομένων και των δορυφόρων για τα τηλεοπτικά σήματα. Τα σήματα από αυτούς τους δορυφόρους μπορούν να σταλθούν κυριολεκτικά σε κάθε άκρη της γης. Στις

τηλεπικοινωνίες είναι αναγκαίο «να φαίνεται» ο δορυφόρος κάθε στιγμή και επομένως πρέπει να παραμένει στατικός στην ίδια θέση, σε σχέση με την επιφάνεια της γης.

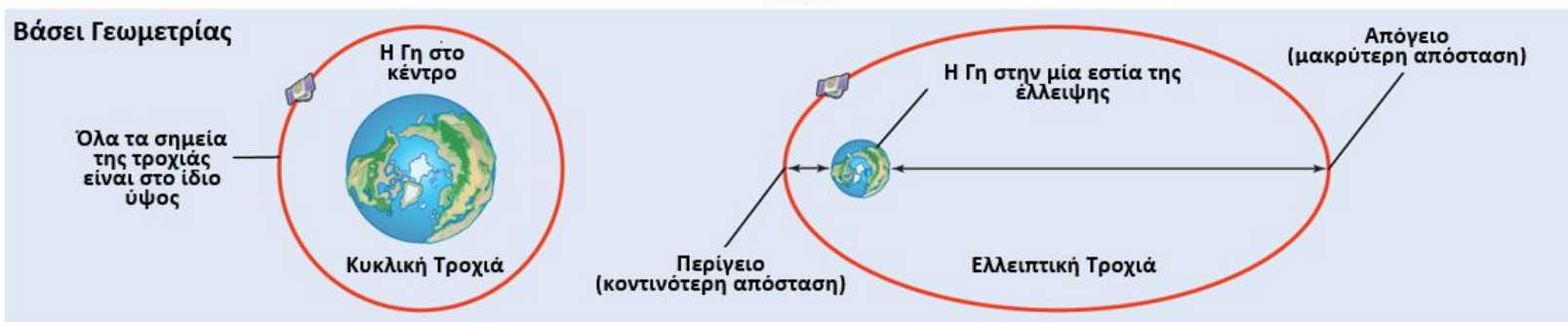
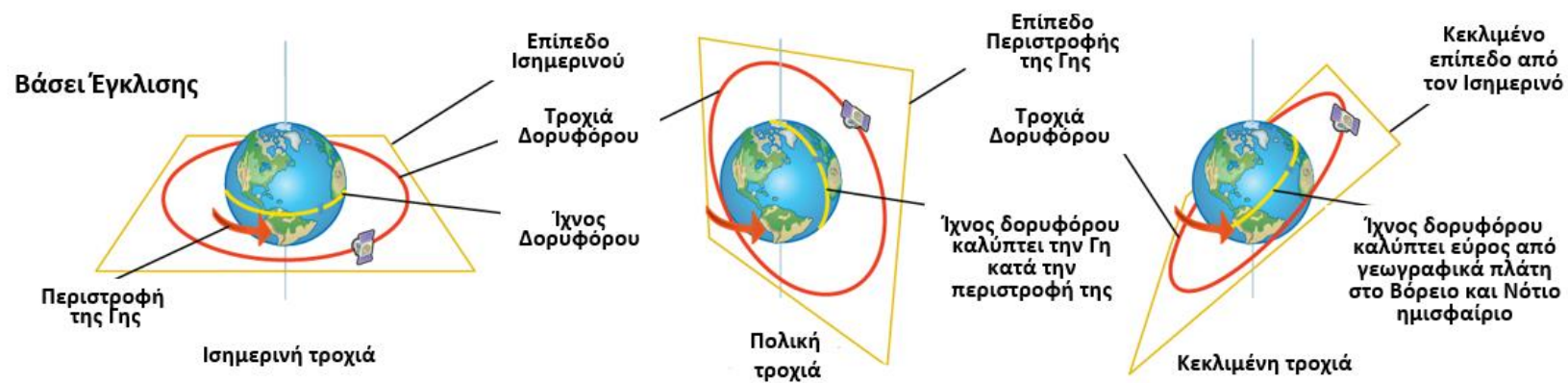
Σε ό,τι αφορά την τηλεπισκόπηση, ένας στατικός δορυφόρος έχει το πλεονέκτημα ότι βλέπει πάντα τη γη από την ίδια οπτική γωνία, πράγμα που σημαίνει ότι έχει τη δυνατότητα να καταγράφει την ίδια εικόνα ανά τακτά χρονικά διαστήματα. Αυτή η ιδιότητα είναι ιδιαίτερα χρήσιμη στην παρατήρηση των καιρικών συνθηκών. Ένα μειονέκτημα των γεωστατικών τροχιών είναι η μεγάλη απόσταση από τη γη, γεγονός που μειώνει την μέγιστη δυνατή χωρική ανάλυση. Υπάρχουν αρκετοί μετεωρολογικοί δορυφόροι που έχουν κατανεμηθεί ομοιόμορφα σε γεωστατικές τροχιές γύρω από τη γη, παρέχοντας έτσι μια σφαιρική εικόνα των καιρικών φαινομένων σε ολόκληρο τον πλανήτη μας.

**Ηλιοσύγχρονη τροχιά:** Οι δορυφόροι που είναι εξοπλισμένοι με συστήματα παθητικών αισθητήρων, εξαρτώνται από τον ηλιακό φως και επομένως από την τροχιά γύρω από τη γη. Επειδή οι αισθητήρες αυτοί μετρούν την αντανάκλαση του φωτός που προέρχεται από τον ήλιο και ανακλάται στη γη, οι τροχιές τους πρέπει να είναι προσαρμοσμένες στην εναλλαγή ημέρας-νύχτας. Είναι σημαντικό να μπορούμε να συγκρίνουμε τις εικόνες που καταγράφονται σε μια δεδομένη χρονική περίοδο. Προκειμένου να είναι συγκρίσιμες αυτές οι εικόνες, θα πρέπει οι συνθήκες φωτισμού να είναι ίδιες. Επομένως, οι καταγραφές θα πρέπει να πραγματοποιούνται την ίδια τοπική ώρα της ημέρας, έτσι ώστε ο ήλιος να βρίσκεται στο ίδιο σημείο πάνω από τον ορίζοντα και το επίπεδο της δορυφορικής τροχιάς να διατηρεί σταθερή γωνία ως προς το φως του ήλιου. Για να επιτευχθούν όλες αυτές οι προϋποθέσεις θα πρέπει ο δορυφόρος να κινείται σε πολική τροχιά.

Ενώ ο δορυφόρος περιστρέφεται στην τροχιά του, η γη περιστρέφεται γύρω από τον άξονά της. Κάθε φορά που ο δορυφόρος κάνει μια πλήρη περιστροφή, σαρώνει και μια νέα λωρίδα γήινης επιφάνειας. Έτσι, μετά από ένα ορισμένο αριθμό περιστροφών θα έχει σαρωθεί ολόκληρη η επιφάνεια της γης. Μερικοί δορυφόροι σαρώνουν λωρίδες με σχετικά μεγάλο πλάτος και, επομένως, μπορούν να καλύψουν ολόκληρη τη γη με λίγες περιστροφές. Αντίθετα, οι δορυφόροι υψηλής ανάλυσης σαρώνουν λωρίδες πολύ μικρού πλάτους και κατά συνέπεια χρειάζονται αρκετές ημέρες για να καλύψουν ολόκληρη τη γη.

**Ερώτηση:** Τι είναι πολική τροχιά και πια η διαφορά της με την ηλιοσύγχρονη τροχιά;



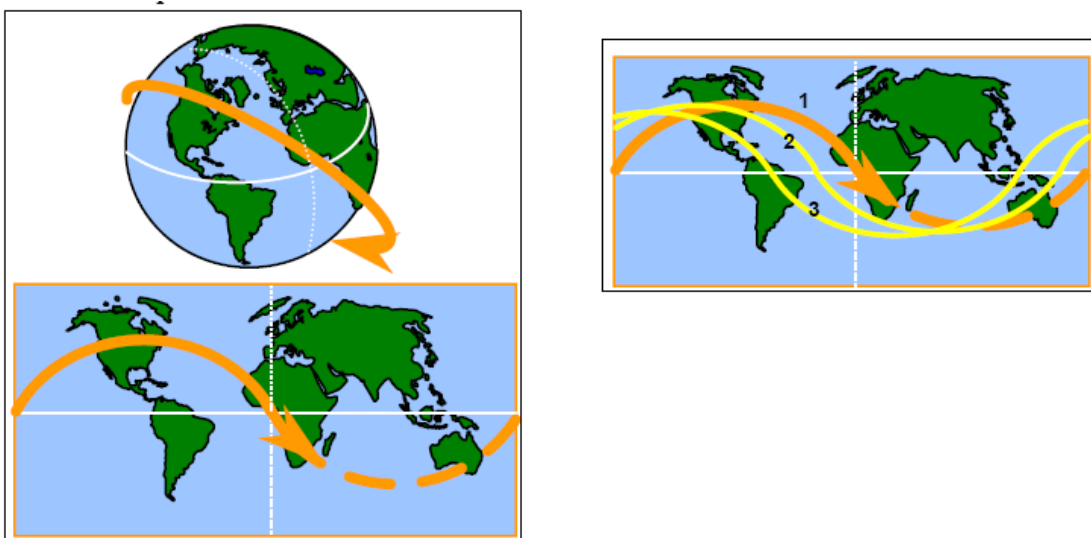


Σχήμα 74: Τροχιές Δορυφόρων

### 7.4.2 Ίχνη Δορυφόρων

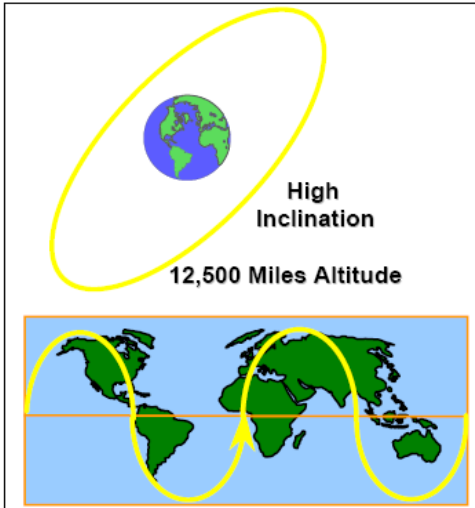
Τα ίχνη των δορυφόρων στην επιφάνεια της Γης είναι χαρακτηριστικά των τροχιών τους. Συνεπώς γνωρίζοντας τα χαρακτηριστικά της τροχιάς ενός δορυφόρου (τα «στοιχεία του Κέπλερ») μπορούμε να γνωρίζουμε το ακριβές ίχνος. Σε περίπτωση σχεδιασμού αποστολής γνωρίζοντας το τι ίχνος θέλουμε μπορούμε περιγράψουμε τα στοιχεία Κέπλερ της τροχιάς.

Απλουστευμένα, ο σύγχρονος τρόπος για να ερευνηθούν τα στοιχεία τροχιάς ενός δορυφόρου είναι: α) η παρακολούθηση και συλλογή πληροφοριών θέσης και ταχύτητας από τον σταθμό παρακολούθησης (μέσω radar ή laser), β) ο υπολογισμός των στοιχείων Κέπλερ (και φυσικά άλλων πληροφοριών) και, τέλος, γ) η αποτύπωση του ίχνους του δορυφόρου. Αυτές οι πληροφορίες μπορούν να υποδηλώσουν αρκετά για την αποστολή του δορυφόρου, ακόμα και το από που εκτοξεύθηκε. Για παράδειγμα, τροχιές κλίσης  $28^\circ$  είναι τυπικές των εκτοξεύσεων από το Διαστημικό Κέντρο Κένεντυ (Kennedy Space Center – παλαιότερα Ακρωτήριο Κανάβεραλ).

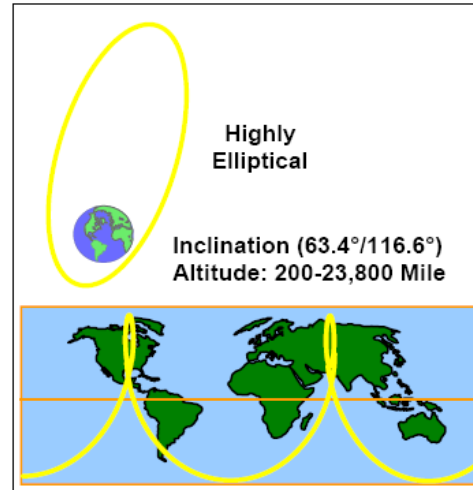


Σχήμα 75: (Αριστερά) Ίχνος κυκλικής τροχιάς χαμηλού ύψους. (Δεξιά) παρατηρούμε το ίχνος δορυφόρου σε κυκλική τροχιά, με σχετικά μεγάλη κλίση, και χαμηλό ύψος. (Οι αριθμοί 1, 2 και 3 είναι τα ίχνη των διαδοχικών «περασμάτων» του δορυφόρου.)

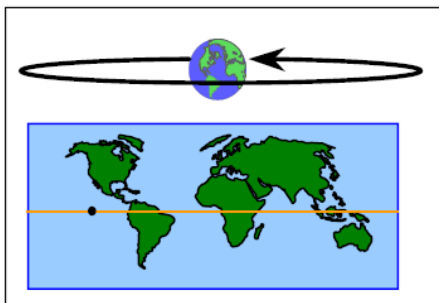
Στο σχήμα 76 καταγράφεται το ίχνος ενός δορυφόρου σε κυκλική τροχιά μεγάλου ύψους και μεγάλης κλίσης, ενώ στο σχήμα 77 απεικονίζεται το ίχνος δορυφόρου ο οποίος ακολουθεί «τροχιά Μολνίγια». Παρατηρούμε τη χαρακτηριστική μορφή «γ» της τροχιάς αυτής (Οφείλεται στο ότι στο απόγειο της τροχιάς Μολνίγια η γωνιακή ταχύτητα του δορυφόρου είναι μικρότερη από την γωνιακή ταχύτητα της Γης ενώ στο περίγειο είναι πολύ υψηλότερη.)



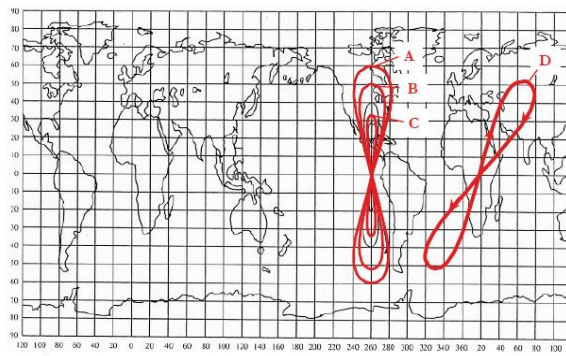
Σχήμα 76 : Ίχνος κυκλικής τροχιάς μεγάλης κλίσης και μεγάλης απόστασης



Σχήμα 77 : Ίχνος Τροχιάς Μολνίγια.

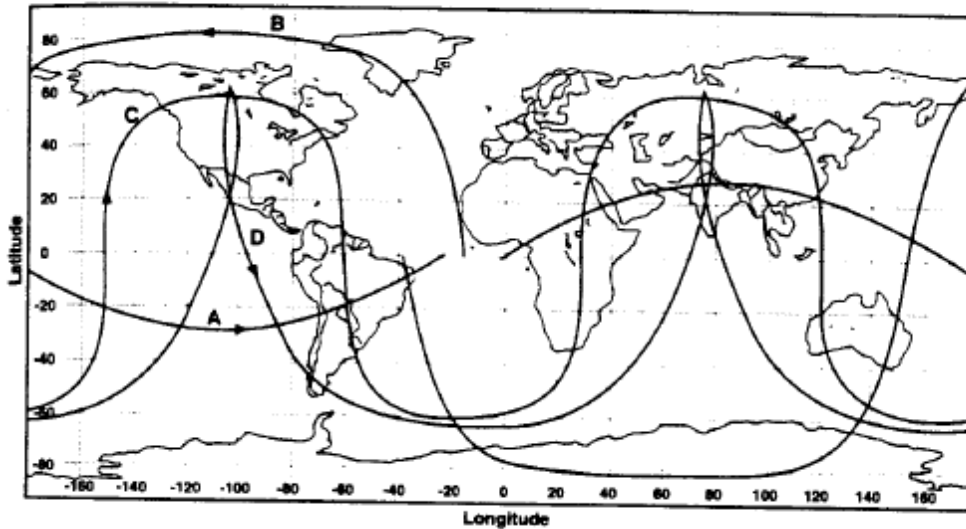


Σχήμα 78 : Ίχνος γεωστατικής τροχιάς (Ένα σημείο).



Σχήμα 79: Ίχνη γεωσύγχρονων τροχιών διαφόρων κλίσεων

## Μία πρακτική άσκηση:



Σχήμα 80: Διάφορα ίχνη.

## Ερώτηση:

Μπορείτε να αναγνωρίσετε τις τροχιές που αντιστοιχούν στα ίχνη που απεικονίζονται στο σχήμα 80;

## Απάντηση:

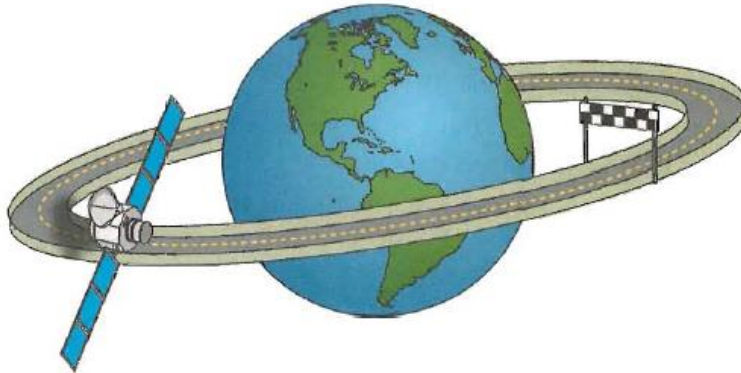
- A: Κυκλική τροχιά, χαμηλού ύψους και κλίσης (κλίση περίπου  $28^\circ$ ).
- B: Πολική ανάδρομη τροχιά.
- C: Κυκλική τροχιά μεσαίου ύψους και κλίσης (περίπου  $60^\circ$ ).
- D: Τροχιά Μολνίγια.

## ΠΑΡΑΤΗΡΗΣΗ

Τελειώνοντας αυτή την πολύ σύντομη παρουσίαση, πρέπει να σημειώσουμε κάτι σημαντικό: Συχνά ακούγεται -και διαβάζεται- ότι «πάνω από το τάδε σημείο βρίσκεται τοποθετημένος (χωρίς δηλαδή να διαγράφει κάποια τροχιά) ένας δορυφόρος». Η δήλωση αυτή συχνότατα είναι λάθος: Είναι αδύνατο να υπάρξει τροχιά η οποία να έχει ως «σταθερό» ίχνος ένα συγκεκριμένο σημείο στην Γη, **εκτός εάν το σημείο αυτό βρίσκεται ακριβώς επάνω στον Ισημερινό** (σχήμα 78). Δηλαδή δεν γίνεται να υπάρξει δορυφόρος ο οποίος να βρίσκεται **συνεχώς** πάνω από, π.χ., την Αθήνα - στην πλησιέστερη περίπτωση το ίχνος της τροχιάς θα είναι κάποιο από αυτά του σχήματος 79, δηλαδή το ίχνος γεωσύγχρονης τροχιάς, με το χαρακτηριστικό σχήμα «8».

### 7.5 Κατανόηση/Ανάλυση Τροχιών

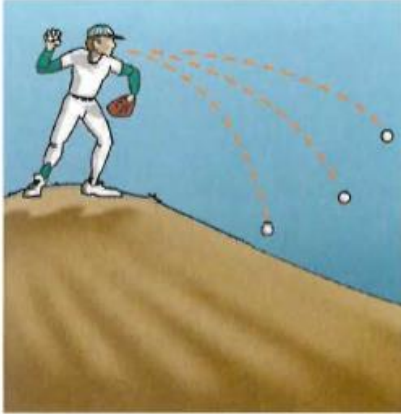
Τα διαστημικά σκάφη λειτουργούν σε τροχιές. Μπορούμε να περιγράψουμε μια τροχιά ως μια «πίστα» πάνω στην οποία κινείται ένα διαστημικό σκάφος, όπως φαίνεται στο Σχήμα 81.



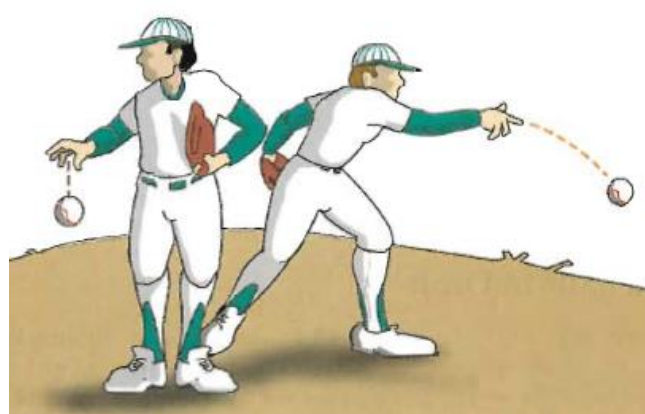
**Σχήμα 81: Τροχιές ως...πίστα κίνησης δορυφόρων**

Οι τροχιές αποτελούν βασικό στοιχείο οποιασδήποτε διαστημικής αποστολής. Η κατανόηση αυτής της κίνησης μπορεί αρχικά να φαίνεται μάλλον δύσκολη. Για να περιγράψουμε πλήρως την τροχιακή κίνηση, χρειαζόμαστε κάποια βασική φυσική μαζί με μια δόση υπολογισμών και γεωμετρίας. Ωστόσο, όπως θα δούμε, η τροχιά ενός διαστημικού σκάφους δεν είναι πολύ διαφορετική από την κίνηση μιας μικρής μπάλας που την αφήνουμε σε ένα βαθύ πιάτο. Στην πραγματικότητα, στις περισσότερες περιπτώσεις, και οι δύο κινήσεις μπορούν να περιγραφούν ως συνάρτηση της μιας μοναδικής δύναμης,– της βαρύτητας. Κατανοώντας μόνο αυτή την ενιαία διάχυτη δύναμη, μπορούμε να προβλέψουμε, να εξηγήσουμε και να κατανοήσουμε την κίνηση σχεδόν όλων των αντικειμένων στο διάστημα, από μια μπάλα του baseball μέχρι ένα διαστημικό σκάφος, τους πλανήτες ακόμη και ολόκληρους τους γαλαξίες.

Τι είναι μια τροχιά; Σίγουρα, είπαμε ότι ήταν ένα είδος "αγωνιστικής πίστας" στο διάστημα. Από τί όμως αποτελείται; Σε όλο το υπόλοιπο κεφάλαιο θα διερευνήσουμε τις φυσικές αρχές που επιτρέπουν την ύπαρξη τροχιών, καθώς και τις μαθηματικές αναπαραστάσεις τους. Πριν βυθιστούμε σε μια περίπλοκη εξήγηση, ας ξεκινήσουμε με ένα απλό πείραμα που απεικονίζει, εννοιολογικά, πώς λειτουργούν οι τροχιές. Φανταστείτε ότι κρατάμε μπάλες του μπέιζμπολ και βρισκόμαστε στην κορυφή ενός ψηλού βουνού. Σκεφτείτε ότι στέκεστε στην κορυφή αυτού του βουνού και είστε έτοιμοι να ρίξετε μια από τις μπάλες προς τα ανατολικά. Καθώς η μπάλα πέφτει, παρατηρούμε ότι ακολουθεί μια καμπύλη διαδρομή. Γιατί συμβαίνει αυτό; Η δύναμη της ρίψης της ωθεί να κινηθεί οριζόντια αλλά η δύναμη της βαρύτητας την τραβά προς τα κάτω. Επομένως, το τελικό σχήμα της τροχιάς της μπάλας του μπέιζμπολ είναι μια καμπύλη. Όσο πιο γρήγορα ρίξουμε τη μπάλα, τόσο πιο μακριά φτάνει πριν χτυπήσει το έδαφος, όπως μπορείτε να δείτε στο Σχήμα 82.



**Σχήμα 82:** Ρίχνοντας μπάλες του baseball από ένα βουνό. Όσο πιο γρήγορα τις πετάμε τόσο πιο μακριά πηγαίνουν (βολή)



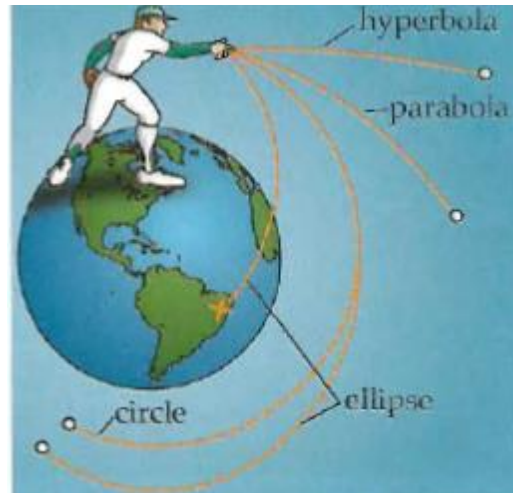
**Σχήμα 83:** Ρίχνοντας μπάλες του baseball την ίδια στιγμή. Οι μπάλες πέφτουν στο έδαφος την ίδια στιγμή, καθώς η κάθετη και οριζόντια κίνησή τους είναι ανεξάρτητες

Αυτό θα μπορούσε να σας οδηγήσει στο συμπέρασμα ότι όσο γρηγορότερα την πετάξουμε τόσο περισσότερο χρόνο θα χρειαστεί πριν χτυπήσει το έδαφος. Αυτό συμβαίνει πραγματικά; Ας δοκιμάσουμε ένα άλλο πείραμα. Παρακολουθούμε, δύο παίκτες του μπέιζμπολ που πετούν ο καθένας από μία μπάλα του μπέιζμπολ. Ο πρώτος αφήνει την μπάλα από ένα σταθερό ύψος και ακριβώς την ίδια χρονική στιγμή, ο δεύτερος παίκτης πετά από το ίδιο ύψος μια πανομοιότυπη μπάλα με όλη του δύναμη. Τι παρατηρούμε; Η μπάλα του δεύτερου παίκτη θα ταξιδέψει περίπου 20 μέτρα (60 πόδια) πριν χτυπήσει το έδαφος. Όμως, και οι δύο μπάλες θα φτάσουν στο έδαφος την ίδια ακριβώς χρονική στιγμή, όπως φαίνεται στο Σχήμα 83! Γιατί όμως συμβαίνει αυτό? Για να κατανοήσουμε αυτό το φαινομενικό παράδοξο, πρέπει να αντιληφθούμε ότι, στην περίπτωση αυτή, η κίνηση στην μια κατεύθυνση είναι ανεξάρτητη από την κίνηση στην άλλη. Έτσι, ενώ η μπάλα του δεύτερου παίκτη κινείται οριζόντια στα 30 km/h, εξακολουθεί να πέφτει με τον ίδιο ρυθμό όπως η πρώτη μπάλα. Αυτός ο ρυθμός είναι η σταθερή βαρυτική επιτάχυνση όλων των αντικειμένων κοντά στην επιφάνεια της Γης,  $9.798 \text{ m/s}^2$ . Έτσι, φτάνουν στο έδαφος ταυτόχρονα. Η μόνη διαφορά είναι ότι η δεύτερη μπάλα, επειδή έχει και οριζόντια ταχύτητα, θα ταξιδέψει κάποια οριζόντια απόσταση, προτού πέσει στο έδαφος.

Ας επιστρέψουμε στην κορυφή του βουνού και ας αρχίσουμε να ρίχνουμε τις μπάλες μας γρηγορότερα και ταχύτερα για να δούμε τι συμβαίνει. Ανεξάρτητα από το πόσο γρήγορα τις πετάμε, οι μπάλες εξακολουθούν να πέφτουν με τον ίδιο ρυθμό. Ωστόσο, καθώς αυξάνουμε την οριζόντια ταχύτητά τους, είναι σε θέση να ταξιδεύουν μακρύτερα και μακρύτερα προτού φτάσουν στο έδαφος. Επειδή η Γη είναι κυρίως σφαιρική, συμβαίνει κάτι ενδιαφέρον. Το σφαιρικό σχήμα της Γης προκαλεί την μείωση της επιφάνειας κατά περίπου πέντε μέτρα κάθετα για κάθε οκτώ χιλιόμετρα οριζόντια, όπως φαίνεται στο Σχήμα 84. Αν λοιπόν μπορούσαμε να ρίξουμε μια από τις μπάλες μας με ταχύτητα 7,9 χλμ ανά δευτερόλεπτο (χωρίς αντίσταση αέρα), η πορεία της θα αντιστοιχούσε ακριβώς στην καμπυλότητα της Γης. Δηλαδή, η βαρύτητα θα την τραβούσε προς τα κάτω περίπου πέντε μέτρα για κάθε οκτώ χιλιόμετρα που ταξιδεύει και θα συνέχιζε γύρω από τη Γη σε ένα σταθερό ύψος. Αν ξεχάσουμε να σκύψουμε, μπορεί να μας χτυπήσει στο πίσω μέρος του κεφαλιού περίπου 85 λεπτά αργότερα. (Στην πραγματικότητα, επειδή η Γη περιστρέφεται, δεν θα μας χτυπήσει). Αν ρίξουμε μια μπάλα με ταχύτητα μικρότερη από 7,9 km/s τότε αυτή θα χτυπήσει την επιφάνεια της Γης. Τα αποτελέσματα του πειράματός μας για τις ρίψεις φαίνονται στο Σχήμα 85.



**Σχήμα 84 :** Η Καμπυλότητα της Γης κλίνει προς τα κάτω κατά 5μ για κάθε 8 χλμ οριζόντιας κίνησης



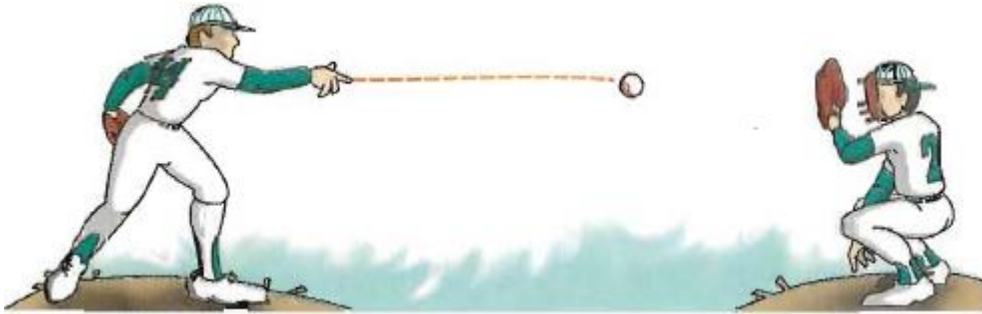
**Σχήμα 85:** Ανάλογα με την ταχύτητα που πετάμε την μπάλα, η καμπυλότητα της Γης θα φθίνει. Στην σωστή ταχύτητα θα μπει σε κυκλική τροχιά. Αν πάει πιο γρήγορα θα ξεφύγει από την Γη (παραβολή/υπερβολή)

Αν αναλύσουμε τις διάφορες τροχιές από τις μπάλες του μπέιζμπολ, προκύπτει μια ολόκληρη σειρά από διαφορετικά σχήματα. Μόνο μία ταχύτητα παράγει μια τέλεια κυκλική τροχιά. Οι βραδύτερες ταχύτητες προκαλούν την τροχιά να χτυπήσει τη Γη κάποια στιγμή. Αν σχεδιάζαμε την προβολή αυτής της τροχιάς στην επιφάνεια της Γης θα βλέπαμε ότι η τροχιά είναι ένα μέρος μια έλλειψης (μοιάζει με παραβολή, αλλά είναι στην πραγματικότητα έλλειψη). Η ρίψη μιας μπάλας με ταχύτητα ελαφρώς μεγαλύτερη από την κυκλική ταχύτητα, έχει επίσης ως αποτέλεσμα μια έλλειψη. Εάν ρίξουμε την μπάλα με ακόμα μεγαλύτερη ταχύτητα, τότε ξεφεύγει από την βαρύτητα της Γη σε μια παραβολική ή υπερβολική τροχιά, χωρίς επιστροφή. Ανεξάρτητα από την ταχύτητα, μια τροχιά μπορεί να είναι κύκλος, έλλειψη, παραβολή ή υπερβολή. Όπως θα δούμε παρακάτω, αυτά τα τέσσερα σχήματα αποτελούν τις κωνικές τομές. Έτσι ένα αντικείμενο σε τροχιά κυριολεκτικά πέφτει γύρω από τη Γη, αλλά εξαιτίας της οριζόντιας ταχύτητάς του δεν χτυπά ποτέ το έδαφος. Σε αυτό το κεφάλαιο θα δούμε πόσο σημαντικό είναι να έχουμε τη σωστή ταχύτητα στη σωστή θέση για να καθορίσουμε τον τύπο της τροχιάς.

## 7.6 Ανάλυση κίνησης (Κινηματική ανάλυση)

Τώρα που εξετάσαμε τις τροχιές από εννοιολογική άποψη, ας δούμε πώς μπορούμε να μελετήσουμε αυστηρότερα αυτήν την κίνηση. Πιθανότατα όταν παιζατε για φορά μπέιζμπολ, η ομάδα σας έπρεπε να κυνηγήσει τις πρώτες δοκιμαστικές σας βολές, που ποτέ δεν φαινόταν να πηγαίνουν εκεί που θέλατε. Σταδιακά, οι βολές βελτιώθηκαν. Δυστυχώς, για να θέσουμε ένα διαστημικό σκάφος σε τροχιά δεν έχουμε στη διάθεση μας δοκιμαστικές βολές ούτε μπορούμε απλά να «σκοπεύσουμε και να ρίξουμε» ένα διαστημόπλοιο ή έναν πύραυλο. Στην περίπτωση του πυραύλου ειδικότερα, πρέπει να μελετήσουμε προσεκτικά την κίνηση μεταξύ του σημείου εκτόξευσης και του σημείου του διαστήματος που θέλουμε να βρεθούμε.

Τώρα, θα ορίσουμε ένα σύστημα για την ανάλυση όλων των τύπων κίνησης που ονομάζεται ανάλυση κίνησης/κινηματική ανάλυση. Φανταστείτε ότι πρέπει να περιγράψετε την κίνηση μιας μπάλας του μπέιζμπολ που ρίχνεται από τους δύο παίκτες του μπέιζμπολ στο Σχήμα 86. Πώς θα το κάνετε;



**Σχήμα 86: Κινηματική ανάλυση**

Πρώτα απ' όλα, πρέπει να ορίσετε κάποιο πλαίσιο αναφοράς ή σύστημα συντεταγμένων. Για παράδειγμα, θέλετε να περιγράψετε την κίνηση σε σχέση με ένα κοντινό κτίριο ή με το κέντρο της Γης; Σε κάθε περίπτωση, πρέπει να ορίσετε ένα σημείο αναφοράς και ένα πλαίσιο συντεταγμένων για την κίνηση που περιγράφετε.

Στη συνέχεια, χρειάζεστε έναν σύντομο τρόπο για να περιγράψετε τη σχέση αυτής της κίνησης με τις δυνάμεις που εμπλέκονται – μια κινηματική εξίσωση. Μόλις προσδιορίσετε ποια εξίσωση περιγράφει καλύτερα την κίνηση της μπάλας, πρέπει να την απλοποιήσετε ώστε να μπορείτε να την χρησιμοποιήσετε. Για παράδειγμα, δεν θέλετε να ασχοληθείτε με το πώς αλλάζει η κίνηση της μπάλας εξαιτίας της βαρυτικής έλξης της Αφροδίτης ή κάθε μικρής ριπής του ανέμου στο πάρκο. Πρέπει λοιπόν να κάνετε κάποιες λογικές απλουστευτικές υποθέσεις. Για παράδειγμα, θα μπορούσατε εύκολα να υποθέσετε ότι η βαρυτική έλξη από την Αφροδίτη είναι πολύ μικρή για να ληφθεί υπόψη και η αντίσταση του αέρα είναι ασήμαντη. Στην πραγματικότητα, μια καλή προσέγγιση είναι να υποθέσετε ότι η μόνη δύναμη που ασκείται στη μπάλα προέρχεται από τη βαρύτητα της Γης.

Με αυτές τις υποθέσεις, μπορείτε να στρέψετε την προσοχή σας σε σημαντικότερες λεπτομέρειες του προβλήματος. Για παράδειγμα, τον καθορισμό της θέσης και του τρόπου που ξεκινά η κίνηση της μπάλας. Οι συνθήκες αυτές ονομάζονται αρχικές συνθήκες του προβλήματος. Εάν μεταβάλλετε με κάποιο τρόπο αυτές τις αρχικές συνθήκες (π.χ., ρίχνετε την μπάλα με περισσότερη δύναμη ή με ελαφρώς διαφορετική κατεύθυνση), η κίνηση της θα αλλάξει. Αξιολογώντας τον τρόπο με τον οποίο επηρεάζουν οι αρχικές συνθήκες την πορεία της μπάλας, μπορείτε να μάθετε πόσο ευαίσθητη είναι η τροχιά σε μικρές αλλαγές ή σφάλματα σε αυτές.

Τέλος, αφού ολοκληρώσετε όλα αυτά τα βήματα, θα πρέπει να επαληθεύσετε ολόκληρη τη διαδικασία δοκιμάζοντας το μοντέλο κίνησης που έχετε αναπτύξει. Πραγματικά πετάξτε μερικές μπάλες του μπέιζμπολ, μετρήστε τις αποκλίσεις των τροχιών τους και αναλύστε τις διαφορές (ανίχνευση σφαλμάτων) μεταξύ των θεωρητικών και των πραγματικών μετρήσεων. Αν βρείτε σημαντικές αποκλίσεις, μπορεί να χρειαστεί να αλλάξετε το σύστημα συντεταγμένων, την εξίσωση κίνησης, τις υποθέσεις, τις αρχικές συνθήκες ή όλα αυτά μαζί. Γνωρίζοντας την κινηματική ανάλυση, θα ξεκινήσουμε την έρευνά μας σχετικά με την τροχιακή κίνηση στο επόμενο τμήμα εξετάζοντας ορισμένους θεμελιώδεις νόμους της κίνησης που έχει αναπτύξει ο Ισαάκ Νεύτων.



## 7.7 Νόμοι του Νεύτωνα, Ορμή και Νόμοι του Κέπλερ

Ο πρώτος νόμος κίνησης του Ισαάκ Νεύτων ήταν στην πραγματικότητα μια παραλλαγή της αδράνειας του Galileo. Τον ανακάλυψε όπως και άλλες βασικές αρχές της βαρύτητας και της κίνησης το 1655, όταν μια εκτεταμένη επιδημία πανούκλας κατέστρεψε την Αγγλία και προκάλεσε την παύση των πανεπιστημίων. Την εποχή εκείνη ο Ισαάκ Νεύτων ήταν ένας 23χρονος φοιτητής στο Cambridge. Τα ευρήματά του δεν δημοσιεύτηκαν μέχρι τις 1687 - στις Μαθηματικές Αρχές της Φυσικής Φιλοσοφίας. Σε αυτό το μνημειακό έργο δηλώνει:

*Κάθε σώμα, που βρίσκεται μέσα σε ένα αδρανειακό σύστημα, διατηρεί την κατάσταση ηρεμίας, ή εκτελεί ευθύγραμμη ομαλή κίνηση, εφόσον καμία εξωτερική δύναμη δεν επιδρά για τη μεταβολή της ή η συνισταμένη των δυνάμεων ισούται με 0.*

Ο Πρώτος Νόμος του Νεύτωνα λέει ότι οποιοδήποτε αντικείμενο (ή κομμάτι μάζας) που βρίσκεται σε κατάσταση ηρεμίας θα παραμείνει σε ηρεμία για πάντα, εκτός αν κάποια δύναμη το κινήσει. Ομοίως, οποιοδήποτε αντικείμενο σε κίνηση θα παραμείνει σε κίνηση για πάντα, με σταθερή ταχύτητα στην ίδια ευθεία κατεύθυνση, μέχρις ότου κάποια δύναμη αλλάξει είτε την ταχύτητα είτε την κατεύθυνση της κίνησης. Μια πολύ σημαντική πτυχή του πρώτου νόμου που πρέπει να θυμάστε, ειδικά όταν μελετάτε την κίνηση διαστημικών σκαφών, είναι ότι η κίνηση τείνει να παραμείνει σε ευθεία γραμμή. Επομένως, αν δείτε κάτι που δεν κινείται σε ευθεία γραμμή, όπως ένα διαστημικό σκάφος σε τροχιά, κάποια δύναμη πρέπει να ενεργεί πάνω του.

Γνωρίζουμε ότι ένα αντικείμενο σε ηρεμία δε θα αρχίσει να κινείται και θα αντισταθεί στην κίνηση στο μέγιστο βαθμό που του επιτρέπει η μάζα του. Ανακαλύψαμε επίσης ότι, όταν είναι σε κίνηση, αντιστέκεται σε οποιαδήποτε αλλαγή στην ταχύτητα ή την κατεύθυνσή του. Η αντίσταση για ένα αντικείμενο σε κατάσταση ηρεμίας και σε κίνηση δεν είναι η ίδια! Αυτό το φαινομενικά παράδοξο οφείλεται στην έννοια της ορμής. Ορμή είναι η ποσότητα αντίστασης που έχει ένα αντικείμενο σε κίνηση σε αλλαγές ταχύτητας και κατεύθυνσης. Η ορμή είναι αποτέλεσμα του συνδυασμού μάζας και ταχύτητά ενός αντικειμένου. Επειδή η ταχύτητα ενός αντικειμένου μπορεί να είναι είτε γραμμική είτε γωνιακή, υπάρχουν δύο τύποι ορμής: γραμμική και γωνιακή.

Ας ξεκινήσουμε με τη γραμμική ορμή. Για να δούμε πώς λειτουργεί, ας σκεφτούμε τη διαφορά ανάμεσα σε μια μπουλντόζα και ένα καροτσάκι μωρού που κινείται κατά μήκος ενός δρόμου, όπως φαίνεται στο Σχήμα 87. Οι μπουλντόζες είναι τεράστιες μηχανές σχεδιασμένες να αφαιρούν τόνους χώματος από τη Γη. Τα καροτσάκια αντίθετα είναι σχεδιασμένα να μεταφέρουν χαριτωμένα μικρά μωρά στη γειτονιά. Προφανώς, μια μπουλντόζα έχει πολύ περισσότερη μάζα από μια καροτσάκι μωρού, αλλά τι γίνεται με την ορμή τους; Αντίθετα από την αδράνεια, η οποία είναι συνάρτηση μόνο της μάζας των αντικειμένων, η γραμμική ορμή,  $\vec{p}$ , είναι το γινόμενο μάζας των αντικειμένων,  $m$ , και της ταχύτητάς της,  $\vec{V}$ . [Σημείωση: επειδή περιγράφουμε την ταχύτητα και την ορμή χρησιμοποιώντας το μέτρο και την κατεύθυνση, τις αντιμετωπίζουμε ως διανύσματα.

$$\vec{p} = m\vec{V} \quad (7-1)$$

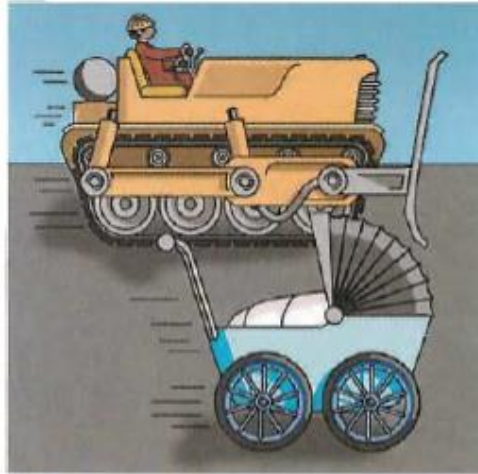
Όπου,

$\vec{p}$  = διάνυσμα γραμμικής ορμής (kg·m/s)

$m$  = μάζα (kg)

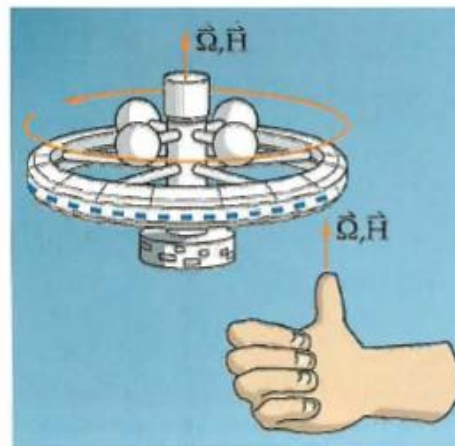
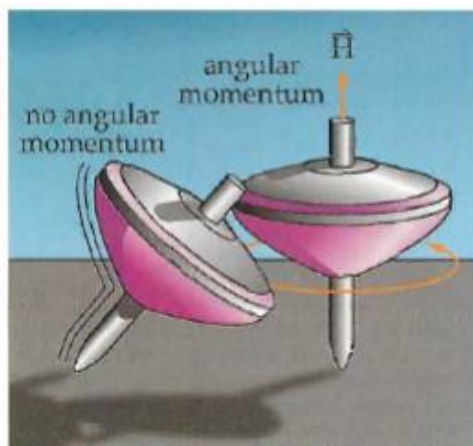
$\vec{V}$  = διάνυσμα ταχύτητας (m/s)

Για να συγκρίνουμε τη γραμμική ορμή της μπουλντόζας και του καροτσιού ενός μωρού, θα έπρεπε να γνωρίζουμε πόσο γρήγορα κινούνται. Για να έχουν την ίδια γραμμική ορμή, το καρότσι, που έχει πολύ λιγότερη μάζα, θα έπρεπε να κινείται πολύ, πολύ γρηγορότερα! Το σχήμα 87, δείχνει αυτή τη σχέση.



**Σχήμα 87:** Η ορμή της μπουλντόζας είναι το γινόμενο της μάζας με την ταχύτητα. Άρα αν μία μπουλντόζα κινείται με την ίδια ταχύτητα με το καρότσι, τότε θα έχει μεγαλύτερη ορμή εξαιτίας της μεγαλύτερης μάζας του.

Η γραμμική ορμή είναι μια αρκετά βασική έννοια επειδή περιλαμβάνει την κίνηση σε ευθεία γραμμή. Η γωνιακή ορμή, από την άλλη πλευρά, είναι ελαφρώς πιο δύσκολο να κατανοηθεί επειδή περιγράφει τη περιστροφική κίνηση. Ας σκεφτούμε την απλή σβούρα. Εάν την τοποθετήσουμε χωρίς να την περιστρέψουμε πάνω σε ένα τραπέζι, θα πέσει, αλλά αν την γυρίσουμε αρκετά γρήγορα, η σβούρα φαίνεται να αψηφά τη βαρύτητα. Ένα περιστρεφόμενο αντικείμενο τείνει να αντιστέκεται στις αλλαγές στην κατεύθυνση και το ρυθμό περιστροφής, όπως το η σβούρα που φαίνεται στο σχήμα 88, ακριβώς όπως ένα αντικείμενο που κινείται σε ευθεία γραμμή αντιστέκεται στην αλλαγή της ταχύτητας και της κατεύθυνσης κίνησής του.



**Σχήμα 88:** Γωνιακή Ορμή/Στροφορμή – **Σχήμα 89:** Κανόνας του δεξιού χεριού  
Περιστρεφόμενη και ακίνητη σβούρα

Η γωνιακή ορμή ή Στροφορμή,  $\vec{H}$ , είναι η ποσότητα αντίστασης ενός περιστρεφόμενου αντικειμένου στην αλλαγή του ρυθμού περιστροφής ή τη φορά περιστροφής του. Η γραμμική ορμή είναι το γινόμενο της μάζας του αντικειμένου,  $m$ , (το οποίο αντιπροσωπεύει την αδράνεια του ή την τάση του να αντισταθεί σε μια αλλαγή ταχύτητας και κατεύθυνσης) και την ταχύτητά του,  $\vec{V}$ . Ομοίως, η γωνιακή ορμή είναι το γινόμενο της αντίστασης του αντικειμένου στην αλλαγή του ρυθμού περιστροφής ή της κατεύθυνσης του και του ρυθμού περιστροφής του. Η αντίσταση ενός αντικειμένου στην περιστροφική κίνηση είναι η ροπή αδράνειας του,  $I$ . Αναπαριστούμε την γωνιακή ταχύτητα, ως ένα διάνυσμα, με  $\vec{\Omega}$ . Έτσι βρίσκουμε το διάνυσμα της γωνιακής ορμής,  $\vec{H}$ , χρησιμοποιώντας την εξίσωση (7-2).

$$\vec{H} = I\vec{\Omega} \quad (7-2)$$

Όπου,

$\vec{H}$  = το διάνυσμα της γωνιακής ορμής (kg·m<sup>2</sup>/s)

$I$  = ροπή αδράνειας (kg·m<sup>2</sup>)

$\vec{\Omega}$  = διάνυσμα γωνιακής ταχύτητας (rad/s)

Για να υπολογίσουμε την κατεύθυνση της γωνιακής ορμής, πρέπει να εξετάσουμε τη γωνιακή ταχύτητα,  $\vec{\Omega}$ . Δείτε τον περιστρεφόμενο τροχό στο σχήμα 89 και εφαρμόστε τον κανόνα του δεξιού χεριού. Με τα δάχτυλά μας να στρέφονται μαζί με τη κατεύθυνση περιστροφής του τροχού, ο αντίχειρας μας δείχνει προς την κατεύθυνση του διανύσματος γωνιακής ταχύτητας  $\vec{\Omega}$  και του διανύσματος της γωνιακής ορμής  $\vec{H}$ . Όπως υποδηλώνει η εξίσωση (7-2), η γωνιακή ορμή  $\vec{H}$  είναι πάντα ομόρροπη με το διάνυσμα της γωνιακής ταχύτητας,  $\vec{\Omega}$ . Στην επόμενη ενότητα θα δούμε ότι, λόγω της γωνιακής ορμής, ένα περιστρεφόμενο αντικείμενο αντιστέκεται στην αλλαγή της κατεύθυνσης και της ταχύτητας περιστροφής του.

Μπορούμε να περιγράψουμε τη γωνιακή ορμή με ένα άλλο παράδειγμα. Μια μάζα που περιστρέφεται στην άκρη ενός σχοινού έχει επίσης γωνιακή ορμή. Στην περίπτωση αυτή, την υπολογίζουμε χρησιμοποιώντας την στιγμιαία εφαπτομενική ταχύτητα της περιστρεφόμενης μάζας,  $\vec{V}$ , και το μήκος της χορδής,  $\vec{R}$ , που ονομάζεται επίσης μοχλοβραχίονας. Συνδυάζουμε τα δύο αυτά μεγέθη με τη μάζα,  $m$ , χρησιμοποιώντας το εξωτερικό γινόμενο για να υπολογίσουμε το διάνυσμα  $\vec{H}$ .

$$\vec{H} = \vec{R} \times m\vec{V} \quad (7-3)$$

όπου,

$\vec{H}$  = το διάνυσμα της γωνιακής ορμής (kg·m/s)

$\vec{R}$  = απόσταση (m)

$m$  = μάζα (kg)

$\vec{V}$  = διάνυσμα ταχύτητας (m/s)

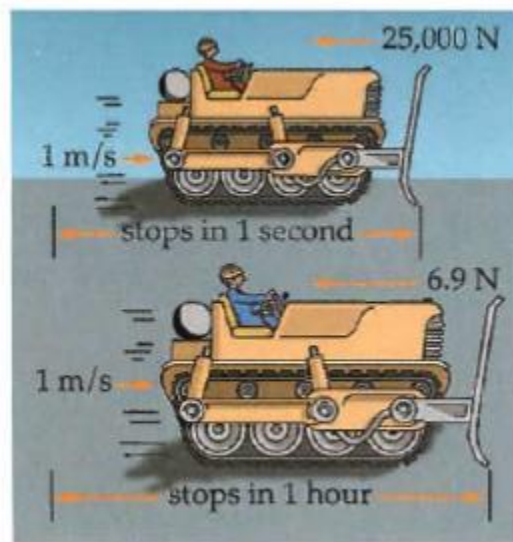
Από το εξωτερικό γινόμενο συμπεραίνουμε ότι το διάνυσμα  $\vec{H}$  είναι κάθετο στα διανύσματα  $\vec{R}$  και  $\vec{V}$ . Για άλλη μια φορά, μπορούμε να χρησιμοποιήσουμε τον κανόνα του δεξιού χεριού για να βρούμε το  $\vec{H}$ , όπως φαίνεται στο Σχήμα 89. Στις επόμενες ενότητες, θα δούμε ότι η γωνιακή ορμή είναι μια πολύ σημαντική ιδιότητα των τροχιών των διαστημικών σκαφών. Θα διαπιστώσουμε ότι η γωνιακή ορμή είναι επίσης μια χρήσιμη ιδιότητα των γυροσκοπίων για τον καθορισμό και τη διατήρηση του προσανατολισμού των διαστημικών σκαφών.

### 7.7.1 Μεταβολή της Ορμής

Αφού εξετάσαμε την ορμή, ας επιστρέψουμε στους νόμους κίνησης του Νεύτωνα. Όπως είδαμε, η γραμμική και η γωνιακή ορμή, αντιπροσωπεύουν την αντίσταση ενός κινούμενου αντικειμένου στην αλλαγή της διεύθυνσης ή του μέτρου της ταχύτητά του. Τώρα μπορούμε να δούμε με ποιον τρόπο μπορούμε να ξεπεράσουμε αυτήν την αντίσταση χρησιμοποιώντας τον δεύτερο Νόμο του Νεύτωνα ο οποίος μας λέει:

*‘Ο δεύτερος νόμος κίνησης του Νεύτωνα: Η συνισταμένη των δυνάμεων που ασκούνται σ’ ένα σώμα, ισούται με το ρυθμό μεταβολής της ορμής του σώματος.’*

Με άλλα λόγια, για να αλλάξουμε την ταχύτητα ενός αντικειμένου πολύ γρήγορα, όπως όταν χτυπάμε μια μπάλα για να κινηθεί γρήγορα, η δύναμη που θα ασκήσουμε θα πρέπει να είναι μεγάλη. Αντίθετα, εάν δεν βιαζόμαστε να αλλάξουμε την ορμή, μπορούμε να εφαρμόσουμε μια μικρότερη δύναμη για περισσότερο χρόνο. Ας φανταστούμε ότι βλέπουμε μια μπουλντόζα να κινείται στο δρόμο με ταχύτητα 1 m/s, όπως στο Σχήμα 90.



**Σχήμα 90: Ο δεύτερος νόμος κίνησης του Νεύτωνα**

Για να σταματήσει η μπουλντόζα πρέπει να εφαρμόσουμε σε αυτή κάποια δύναμη, συνήθως μέσω των φρένων. Πόση δύναμη θα εφαρμόσουμε εξαρτάται από το πόσο γρήγορα θέλουμε να σταματήσουμε τη μπουλντόζα. Εάν, για παράδειγμα, θέλουμε να σταματήσει σε ένα δευτερόλεπτο, θα πρέπει να εφαρμόσουμε μια τεράστια δύναμη. Από την άλλη πλευρά, αν θέλουμε να σταματήσουμε τη μπουλντόζα σε ένα λεπτό, μπορούμε να εφαρμόσουμε μια πολύ μικρότερη δύναμη. Έτσι, όσο μεγαλύτερη είναι η δύναμη που ασκείται σε ένα αντικείμενο, τόσο πιο γρήγορα αλλάζει η ορμή του.

Τώρα, ας δούμε τη συσχέτιση με το δεύτερο νόμο του Νεύτωνα. Συμβολίζουμε μια δύναμη με  $\vec{F}$ . Το σύμβολο  $\vec{p}$  αντιπροσωπεύει γραμμική ορμή. Για να υπολογίσουμε πόσο γρήγορα αλλάζει μια ποσότητα, χρησιμοποιούμε το ελληνικό σύμβολο "δέλτα",  $\Delta$ , που αντιπροσωπεύει μια πολύ μικρή αλλαγή σε οποιαδήποτε ποσότητα. Έτσι, υπολογίζουμε το ρυθμό μεταβολής μιας ποσότητας, όπως η ορμή,  $\vec{p}$ , για κάποιο σύντομο χρονικό διάστημα,  $t$  ως:

$$\frac{\Delta \vec{p}}{\Delta t} = \frac{\text{μεταβολή της ορμής}}{\text{μεταβολή του χρόνου}} \quad (7-4)$$

Αυτή η εξίσωση δείχνει πόσο γρήγορα μεταβάλλεται η ορμή. Τώρα εκφράζουμε το Δεύτερο Νόμο του Νεύτωνα ως:

$$\vec{F} = \frac{\Delta \vec{p}}{\Delta t} = \frac{\Delta(m\vec{V})}{\Delta t} \quad (7-5)$$

που ισχύει μόνο αν το  $\Delta t$  είναι πολύ μικρό. Μπορούμε να επεκτείνουμε αυτή την εξίσωση εφαρμόζοντας τον τελεστή  $\Delta$  σε κάθε όρο της παρένθεσης καταλήγοντας στην εξίσωση

$$\vec{F} = m \frac{\Delta \vec{V}}{\Delta t} + \frac{\Delta m}{\Delta t} \vec{V} \quad (7-6)$$

Γιατί είναι χρήσιμη αυτή η εξίσωση; Ας ξεκινήσουμε με τον όρο  $\frac{\Delta m}{\Delta t}$ . Ο λόγος αυτός αντιπροσωπεύει πόσο γρήγορα μεταβάλλεται η μάζα του αντικειμένου.

Στις περισσότερες περιπτώσεις, η μάζα του αντικειμένου δεν αλλάζει, οπότε ο όρος αυτός είναι μηδενικός. (σε άλλες περιπτώσεις, θα δούμε ότι δεν συμβαίνει αυτό στους πυραύλους.) Συνεπώς, για προβλήματα σταθερής μάζας, έχουμε μόνο τον πρώτο όρο  $\frac{\Delta \vec{V}}{\Delta t}$ , που αντιπροσωπεύει πόσο γρήγορα αλλάζει η ταχύτητα. Αυτός είναι ακριβώς ο ορισμός της επιτάχυνσης,  $\vec{a}$ . Αν αντικαταστήσουμε το  $\vec{a}$  με το  $\frac{\Delta \vec{V}}{\Delta t}$  στην εξίσωση (3-6), παίρνουμε την πιο οικεία εκδοχή

$$\vec{F} = m\vec{a} \quad (7-7)$$

Όπου,

$\vec{F}$  = διάνυσμα δύναμης ( $\text{kg}\cdot\text{m}/\text{s}^2 = \text{N}$ )

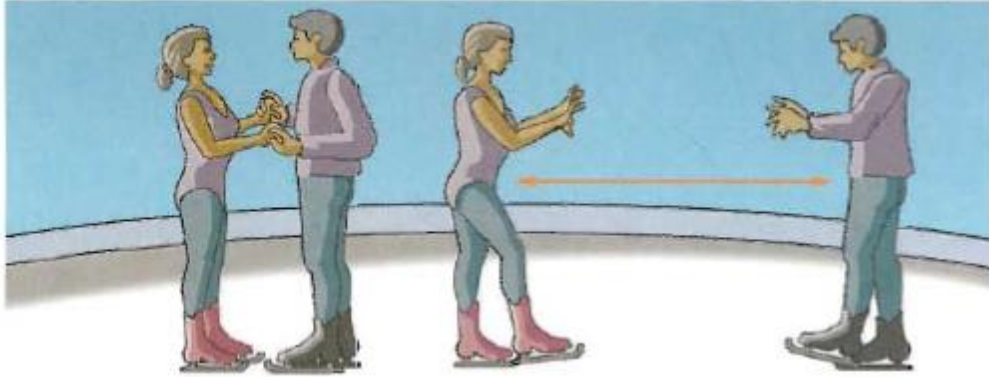
$m$  = μάζα (kg)

$\vec{a}$  = διάνυσμα επιτάχυνσης (m/s)

Η εξίσωση (7-7) είναι αναμφισβήτητη μία από τις πιο χρήσιμες εξισώσεις σε ολόκληρη τη φυσική και τη μηχανική. Μας επιτρέπει να καταλάβουμε πώς οι δυνάμεις επηρεάζουν την κίνηση των αντικειμένων. Οπλισμένοι με αυτή την απλή σχέση, μπορούμε να προσδιορίσουμε τα πάντα, από πόση δύναμη χρειαζόμαστε για να σταματήσουμε μια μπουλντόζα, έως την επιτάχυνση που προκαλεί η βαρύτητα της Γης στη Σελήνη.

### Δράση και αντίδραση

Οι δύο πρώτοι νόμοι του Νεύτωνα ήταν αρκετοί για να γίνει ευρέως γνωστός, όμως συνέχισε ανακαλύπτοντας έναν τρίτο νόμο ο οποίος περιγράφει μια πολύ σημαντική σχέση μεταξύ δράσης και αντίδρασης. Ένα απλό παράδειγμα του Τρίτου Νόμου του Νεύτωνα συναντάται στην παγοδρομία. Φανταστείτε δύο σκέιτερ πάγου, που στέκονται στο μέσο του παγοδρόμου, όπως φαίνεται στο σχήμα 91.



**Σχήμα 91: Τρίτος Νόμος του Νεύτωνα με ένα ζευγάρι αθλητών παγοδρομίου (σκέιτερ)**

Αν κάποιος δώσει ώθηση στο άλλο, τι συμβαίνει; Και οι δύο κινούνται προς τα πίσω! Ο πρώτος άσκησε μια δύναμη στο δεύτερο, αλλά με τη σειρά του ασκείται μια ίση αλλά αντίθετη δύναμη πάνω του, στέλνοντάς έτσι τον ίδιο πίσω! Στην πραγματικότητα, ο Νεύτωνας διαπίστωσε ότι η αντίδραση είναι ακριβώς ίση σε μέγεθος αλλά αντίθετη σε φορά με την αρχική δράση.

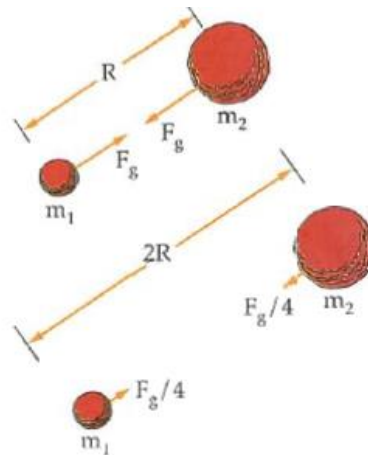
*Ο τρίτος νόμος κίνησης του Νεύτωνα. Οι δυνάμεις που εξασκούνται από την αλληλεπίδραση δύο σωμάτων (1 και 2) είναι πάντα ίσες κατά το μέτρο και αντίθετες κατά τη φορά*

Σε συνθήκες ελεύθερης πτώσης στο διάστημα, ένας αστροναύτης πρέπει να έχει γνώση αυτού του νόμου. Ας υποθέσουμε ότι ένας αστροναύτης προσπαθεί να χρησιμοποιήσει ένα κλειδί για να γυρίσει ένα απλό μπουλόνι. Χωρίς τη δύναμη της βαρύτητας να τον κρατά στη θέση του, θα αρχίσει να γυρίζει αυτός αντί για το μπουλόνι εάν δεν κρατηθεί από κάπου!

### 7.7.2 Βαρύτητα

Η εικόνα που οι περισσότεροι άνθρωποι έχουν από τον Νεύτωνα είναι ένας άντρας με σγουρά μαλλιά και καλσόν κάπου στον 17ο αιώνα, καθισμένο κάτω από μια μηλιά, με ένα μήλο να προσγειώνεται στο κεφάλι του. Αφού χτυπήθηκε από πάρα πολλά μήλα, σηκώθηκε ξαφνικά και φώναξε "Εύρηκα!" (μια φράση του Αρχιμήδη)" Ενώ αυτή η εικόνα είναι περισσότερο προϊόν του Χόλιγουντ παρά ιστορικό γεγονός, περιέχει κάποια αλήθεια. Ο Νεύτωνας παρατηρούσε την πτώση αντικειμένων, όπως τα μήλα, και είχε διαβάσει εκτενώς το έργο του Γαλιλαίου για την πτώση των αντικειμένων.

Η ανακάλυψη έγινε όταν ο Νεύτωνας συνειδητοποίησε ότι η δύναμη που οφείλεται στη βαρύτητα είναι αντιστρόφως ανάλογη του τετραγώνου της απόστασης από το σώμα που έλκει (Γη). Με άλλα λόγια, εάν διπλασιάσουμε την απόσταση ενός αντικειμένου από τη Γη, η έλξη από την βαρύτητα σε αυτό θα μειωθεί στο  $\frac{1}{4}$ . Ο Νεύτωνας προσπάθησε να επαληθεύσει με μετρήσεις αυτό το μοντέλο βαρύτητας προσαρμόζοντας το στη σχέση Γης και Σελήνης. Δυστυχώς, οι μετρήσεις του διαφώνουσαν με το μοντέλο του κατά  $\frac{1}{6}$ . Τελικά, απογοητευμένος ο Newton εγκατέλειψε το έργο του για τη βαρύτητα. Ωστόσο, χρόνια αργότερα, διαπίστωσε ότι η τιμή για τη μάζα της Γης που χρησιμοποιούσε στους υπολογισμούς του ήταν λάθος κατά ακριβώς  $\frac{1}{6}$ . Το μοντέλο βαρύτητάς του ήταν από την αρχή σωστό! Ονομάζουμε το μοντέλο αυτό νόμο της παγκόσμιας έλξης. "Παγκόσμιας" επειδή πιστεύουμε ότι πρέπει να ισχύει παντού στο σύμπαν. Στην πραγματικότητα, ένα μεγάλο μέρος της σύγχρονης κοσμολογίας – ό,τι γνωρίζουμε για τη δομή του σύμπαντος – προκύπτει από την εφαρμογή αυτού του απλού νόμου. Μπορούμε να δούμε πως εφαρμόζεται πιο απλά στο Σχήμα 92.



Σχήμα 92: Νόμος της Παγκόσμιας Έλξης (Βαρύτητας)

Νόμος της παγκόσμιας έλξης. Οι ελκτικές δυνάμεις μεταξύ δύο σωμάτων είναι ανάλογες του γινομένου των μαζών τους και αντιστρόφως ανάλογες του τετραγώνου της μεταξύ των κέντρων μάζας τους απόστασης.

Συμβολικά δίνεται από την εξίσωση:

$$F_g = \frac{Gm_1m_2}{R^2} \quad (7-8)$$

Όπου

$F_g$  = ελκτική δύναμη εξαιτίας της βαρύτητας (N)

$G$  = σταθερά της παγκόσμιας έλξης =  $6.67 \times 10^{-11} \left(\frac{\text{Nm}^2}{\text{kg}^2}\right)$

$m_1, m_2$  = μάζες σωμάτων (kg)

$R$  = απόσταση μεταξύ των κέντρων μάζας των σωμάτων (m)

Συνεπώς, για δύο σώματα όπως η Γη και η Σελήνη, η ελκτική δύναμη ισούται με το γινόμενο των μαζών επί την σταθερά της παγκόσμιας έλξης διά το τετράγωνο της μεταξύ τους απόστασης. Ας δούμε ένα παράδειγμα με πραγματικούς αριθμούς ώστε να αντιληφθούμε τη δύναμη που ασκείται μεταξύ της Γης και Σελήνης.

Η μάζα της Γης είναι περίπου  $5.98 \times 10^{24}$  kg και της Σελήνης  $7.35 \times 10^{22}$  kg. Η μέση απόσταση τους είναι  $3.84 \times 10^8$  m και γνωρίζουμε ήδη τη σταθερά G. Χρησιμοποιώντας την εξίσωση που περιγράψαμε προηγουμένως, η βαρυτική δύναμη ισούται με:

$$F_g = \frac{Gm_{Γη}m_{Σελήνη}}{R^2} = 1.98 \times 10^{20} \text{ N}$$

Με άλλα λόγια, υπάρχει μια τεράστια δύναμη που «συγκρατεί» τη Γη και τη Σελήνη μαζί. Αντιλαμβανόμαστε όμως εμείς αυτή τη δύναμη; Φυσικά! Ένα αποτέλεσμα αυτής της δύναμης είναι οι παλίρροιες των ωκεανών. Η πλευρά της Γης που βρίσκεται πιο κοντά στη Σελήνη προσελκύεται περισσότερο από την πλευρά μακριά από τη Σελήνη (η βαρύτητα μειώνεται με το τετράγωνο της απόστασης). Έτσι, το νερό στην πλευρά που βρίσκεται πλησιέστερα στη Σελήνη μετακινείται προς τη Σελήνη. Από την άλλη πλευρά, το νερό μετακινείται αντίθετα από τη Σελήνη λόγω της διατήρησης της γωνιακής ορμής καθώς η Γη περιστρέφεται. Ανάλογα με το βάθος και το σχήμα του ωκεανού, οι παλίρροιες μπορούν να αυξήσουν και να μειώσουν τη στάθμη της θάλασσας σε μερικά σημεία πάνω από 5 μέτρα. Η απίστευτα μεγάλη δύναμη που υπολογίσαμε παραπάνω αρχίζει να γίνεται αντιληπτή εάν σκεφτούμε πόση δύναμη χρειάζεται για να «σηκώσουμε» το μισό από το νερό του ωκεανού μόλις λίγα μέτρα. Είναι σημαντικό να θυμόμαστε ότι η δύναμη της βαρύτητας μειώνεται με το τετράγωνο της απόστασης μεταξύ των σωμάτων. Αυτό σημαίνει ότι εάν θέλετε να ζυγίσετε λιγότερο, θα πρέπει να ανεβείτε σε κάποιο βουνό! Εάν κανονικά ζείτε στην Λάρισα και ταξιδέψετε στο Όλυμπο, (υψόμετρο 2918 μ.), δεν θα ζυγίζεται το ίδιο στα δύο αυτά μέρη. Αυτό συμβαίνει επειδή είστε λίγο πιο μακριά από το σώμα που σας έλκει (το κέντρο της Γης). Προτού ξεκινήσετε το ταξίδι σας, ας μελετήσουμε προσεκτικά τι συμβαίνει. Το βάρος σας θα αλλάξει επειδή η δύναμη της βαρύτητας είναι ελαφρώς μικρότερη. Η μάζα σας όμως δεν θα αλλάξει. Θυμηθείτε, το βάρος μετρά τη δύναμη που ασκεί η βαρύτητα στο σώμα σας. Η μάζα εκφράζει την ποσότητα της ύλης του σώματος σας. Έτσι, παρόλο που η δύναμη που σας «τραβά» θα είναι μικρότερη, η μάζα θα παραμείνει σταθερή. Καθώς η βαρυτική έλξη αλλάζει, αλλάζει και η επιτάχυνση ενός σώματος εξαιτίας αυτής. Μπορούμε να υπολογίσουμε την επιτάχυνση των σωμάτων εξαιτίας της βαρύτητας συνδυάζοντας τον δεύτερο νόμο του Νεύτωνα και νόμο της παγκόσμιας έλξης. Γνωρίζουμε από τον δεύτερο νόμο του Νεύτωνα (αγνοώντας τους διανυσματικούς συμβολισμούς) ότι:

$$F = ma$$

Χρησιμοποιώντας την εξίσωση της παγκόσμιας έλξης προκύπτει η σχέση που περιγράφει την επιτάχυνση της βαρύτητας οποιουδήποτε αντικειμένου μάζας  $m$ :

$$ma_g = \frac{mGm_{Earth}}{R^2} \quad (7-9)$$

Που απλοποιείται σε:

$$a_g = \frac{Gm_{Earth}}{R^2} \quad (7-10)$$

Για ευκολία, συνήθως αντικαθιστούμε το γινόμενο  $Gm_{Earth}$  με  $\mu$  οπότε προκύπτει η εξίσωση:

$$a_g = \frac{\mu_{Earth}}{R^2} \quad (7-11)$$

όπου

$a_g$  = επιτάχυνση βαρύτητας ( $m/s^2$ )

$$\mu_{Earth} = Gm_{Earth} = 3.98 \times 10^{14} \left(\frac{m^3}{s^2}\right)$$

$R$  = απόσταση από το κέντρο μάζας της Γης (m)



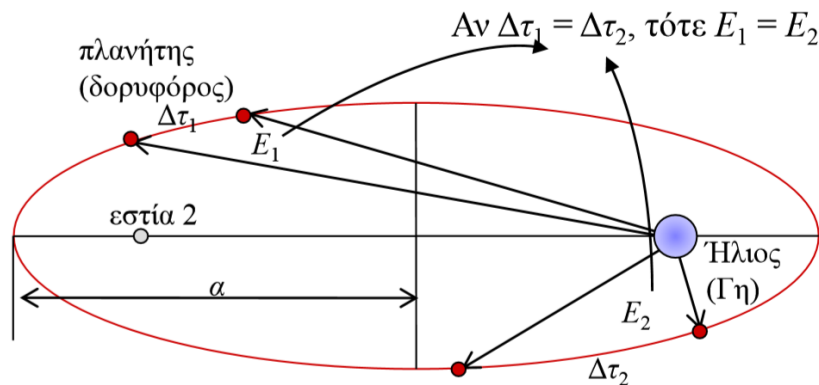
Αντικαθιστώντας τις τιμές για το  $\mu_{Earth}$  και  $R (= 6.378.137m)$  στην παραπάνω εξίσωση, η επιτάχυνση  $a_g$  προκύπτει ίση με  $9.798 \text{ m/s}^2$  στην επιφάνεια της Γης με κατεύθυνση προς το κέντρο της Γης.

### 7.7.3 Νόμοι του Κέπλερ (Νόμοι της πλανητικής κίνησης)

Ο Johan Kepler (1571-1630) ανέπτυξε, χρησιμοποιώντας τις παρατηρήσεις του Δανού αστρονόμου Tycho Brahe (1546-1601), την πρώτη κινηματική περιγραφή των τροχιών, ενώ ο Newton (1643-1727) θα αναπτύξει μια δυναμική περιγραφή με την χρήση της βαρύτητας.

Οι νόμοι του Κέπλερ (εν συντομία):

1. **1ος νόμος** των ελλειπτικών τροχιών. Οι πλανήτες (δορυφόροι) κινούνται σε ένα επίπεδο. Οι τροχιές τους είναι ελλείψεις των οποίων στη μία εστία βρίσκεται ο Ήλιος (η Γη)
2. **2ος νόμος** (νόμος των ίσων εμβαδών). Το διάνυσμα που περιγράφει την απόσταση μεταξύ πλανήτη (δορυφόρου) και Ήλιου (Γης) καλύπτει ίσες επιφάνειες σε ίσους χρόνους (Νόμος ίσων εμβαδών  $E_1=E_2$ )
3. **3ος νόμος** (των αρμονικών). Ο λόγος του τετραγώνου της περιόδου  $T$  της περιστροφής ενός πλανήτη (δορυφόρου) γύρω από τον Ήλιο (τη Γη) προς τον κύβο του μεγάλου ημιάξονα  $a$  της έλλειψης είναι ίδιος για όλους τους πλανήτες (δορυφόρους) ( $T$  ανάλογα του  $a^{3/2}$ ).



Σχήμα 93: Νόμοι του Κέπλερ και της κίνησης των πλανητών/δορυφόρων

### 7.8 Αρχή Διατήρησης της Ορμής (ΑΔΟ) και Αρχή Διατήρησης Μηχανικής Ενέργειας (ΑΔΜΕ)

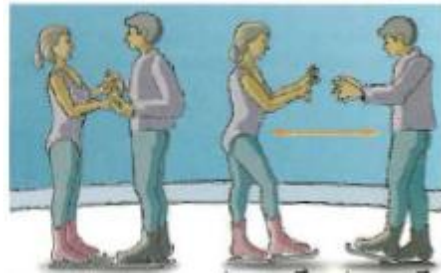
Για οποιοδήποτε μηχανικό σύστημα, βασικές ιδιότητες, όπως η ορμή και η ενέργεια, παραμένουν σταθερές. Στη φυσική λέμε ότι αν μια συγκεκριμένη ιδιότητα ή ποσότητα παραμείνει αμετάβλητη για ένα συγκεκριμένο σύστημα, αυτή η ιδιότητα ή ποσότητα διατηρείται. Ας ρίξουμε λοιπόν μια ματιά σε δύο βασικές ιδιότητες -την ορμή και την ενέργεια, για να δούμε πώς διατηρούνται.

#### Αρχή Διατήρησης της Ορμής (ΑΔΟ)

Μια πολύ σημαντική επίπτωση του Τρίτου Νόμου του Νεύτωνα έχει να κάνει με το μέγεθος της ορμής ενός συστήματος. Ο Τρίτος Νόμος του Νεύτωνα υποδηλώνει ότι η ολική ορμή σε ένα σύστημα παραμένει

αμετάβλητη ή διατηρείται. Αυτό το ονομάζουμε διατήρηση της ορμής. Για να κατανοήσουμε αυτή την ιδέα, ας πάμε πίσω στο παράδειγμα των παγοδρόμων. Αρχικά δύο παγοδρόμοι δεν κινούνται, οπότε η ολική ορμή του συστήματος ήταν μηδέν. Κατόπιν ο πρώτος έσπρωξε το δεύτερο ο οποίος άρχισε να κινείται προς μία κατεύθυνση με κάποια ταχύτητα, ενώ ο πρώτος κινήθηκε προς την αντίθετη κατεύθυνση. Οι ταχύτητές τους δεν θα είναι ίδιες, εκτός και εάν οι μάζες τους είναι ίδιες. Έχουν όμως ίση κατά μέτρο ορμή (γινόμενο μάζας και ταχύτητας), αντίθετης όμως κατεύθυνσης.

Ανάλογα με τον τρόπο με τον οποίο ορίζουμε το πλαίσιο αναφοράς μας, η ορμή του πρώτου παγοδρόμου μπορεί να είναι αρνητική, ενώ η άλλη να είναι θετική. Το άθροισμα των δύο ορμών ισούται με μηδέν, οπότε η αρχική ορμή του συστήματος δεν έχει αλλάξει. Έτσι, όπως δείχνει το Σχήμα 94, λέμε ότι η ολική ορμή του συστήματος διατηρείται.



**Σχήμα 94:** Η αρχική ορμή των δύο παγοδρόμων είναι μηδέν καθότι είναι ακίνητοι. Όταν σπρώξουν ο ένας τον άλλο οι δύο κινούνται σε αντίθετη κατεύθυνση. Προσθέτοντας τα δύο διανύσματα των ορμών μας δίνει άθροισμα μηδέν, οπότε η ορμή του συστήματος διατηρείται.



**Σχήμα 95:** Αργή περιστροφή. Οι παγοδρόμοι εκτείνουν τα χέρια τους για να αυξήσουν την ροπή αδράνειας, με συνέπεια να περιστρέφονται πιο αργά



**Σχήμα 96:** Γρήγορη περιστροφή. Οι παγοδρόμοι μαζεύουν τα χέρια τους για να μειώσουν την ροπή αδράνειας, με συνέπεια να περιστρέφονται πιο γρήγορα. Η συνολική στροφορμή είναι ίδια για τις δύο περιπτώσεις (Σχήμα 95 και 96)

Αυτή η αρχή διατήρησης ισχύει και για τη γωνιακή ορμή. Πιθανότατα έχετε δει έναν παγοδρόμο, που περιλαμβάνει ένα γύρισμα/σβούρα στη ρουτίνα του. Θυμηθείτε, μόλις ένα αντικείμενο αρχίσει να περιστρέφεται, έχει γωνιακή ορμή. Παρακολουθώντας με προσοχή τον παγοδρόμο, θα τον δείτε να κινεί

τα χέρια τος προς τα έξω ή προς τα μέσα για να μεταβάλλει την ταχύτητα περιστροφής του. Πώς αλλάζει αυτό το ρυθμό περιστροφής; Γνωρίζουμε από την Εξίσωση (7-2) ότι η γωνιακή ορμή,  $H$ , ισούται με το γινόμενο της ροπής αδράνειας  $I$ , και του ρυθμού περιστροφής,  $\vec{\omega}$ . Η ροπή αδράνειας ενός αντικειμένου είναι ανάλογη της απόστασης του από τον άξονα περιστροφής. Για να αλλάξει τη ροπή αδράνειας, ο παγοδρόμος απομακρύνει ή πλησιάζει τα χέρια του στο σώμα του, γεγονός που αυξάνει ή μειώνει την ακτίνα, αλλάζοντας έτσι το  $I$ . Επειδή η ορμή διατηρείται, παραμένει σταθερή καθώς αλλάζει η ροπή αδράνειας. Ο μόνος τρόπος που μπορεί να συμβεί αυτό είναι να αλλάζει η γωνιακή ταχύτητα  $\vec{\omega}$ . Έτσι, αν ο παγοδρόμος επεκτείνει τα χέρια του, όπως στο Σχήμα 95, αυξάνει τη ροπή αδράνειας και περιστρέφεται πιο αργά διατηρώντας την ίδια γωνιακή ορμή. Αν πλησιάσει τα χέρια στο σώμα του, όπως στο Σχήμα 96, η ροπή αδράνειας μειώνεται και αυξάνεται η ταχύτητα περιστροφής διατηρώντας πάλι την ίδια γωνιακή ορμή.

### Παράδειγμα 7-1

Ένας πύραυλος συνολικής μάζας  $M = 1.000\text{kg}$  κινείται κατακόρυφα απομακρυνόμενος από τη Γη. Κάποια στιγμή και ενώ η ταχύτητά του είναι  $u = 500\text{m/s}$ , ο πύραυλος διαχωρίζεται σε δύο κομμάτια. Το ένα κομμάτι έχει μάζα  $m_1 = 800\text{kg}$  και η ταχύτητά του αμέσως μετά τη διάσπαση είναι  $u_1 = 1.000\text{m/s}$ , ίδιας κατεύθυνσης με αυτήν της ταχύτητας  $u$ . Να βρείτε την ταχύτητα που έχει το άλλο κομμάτι αμέσως μετά τη διάσπαση.

Λύση

Από την ΑΔΟ πριν και μετά τη διάσπαση έχουμε:

$$Mu = m_1u_1 + m_2u_2 \quad \text{ή} \quad Mu = m_1u_1 + (M - m_1)u_2 \quad \text{ή} \quad u_2 = (Mu - m_1u_1)/(M - m_1) = (1000 \cdot 500 - 800 \cdot 1000)/200 \quad \text{ή} \quad u_2 = -1500 \text{ m/s}$$

Δηλαδή το κομμάτι  $m_2$  αποκτά ταχύτητα  $1500 \text{ m/s}$  αντίθετης κατεύθυνσης από αυτή της ταχύτητας  $u$  του πυραύλου μετά τη διάσπαση.

### Αρχή Διατήρησης Μηχανικής Ενέργειας

Τι ακριβώς είναι η ενέργεια; Η ενέργεια μπορεί να λάβει πολλές μορφές, συμπεριλαμβανομένων των ηλεκτρικής, χημικής, πυρηνικής και μηχανικής. Προς το παρόν, ασχοληθούμε μόνο με τη μηχανική μορφή της ενέργειας επειδή είναι η πιο σημαντική για την κατανόηση της κίνησης. Εάν έχετε πηδήσει από μια πλατφόρμα, σκαρφαλώσει σε μια σκάλα ή παίξει με ένα ελατήριο, έχετε σίγουρα βιώσει τη μηχανική ενέργεια. Η συνολική μηχανική ενέργεια,  $E$ , προέρχεται από τη θέση και την κίνηση ενός αντικειμένου. Αποτελείται από τη δυναμική ενέργεια,  $\Delta E$ , η οποία οφείλεται εξ ολοκλήρου στη θέση του αντικειμένου και την κινητική ενέργεια,  $KE$ , η οποία οφείλεται εξ ολοκλήρου στην κίνηση του αντικειμένου. Η συνολική μηχανική ενέργεια μπορεί να είναι μόνο δυναμική, κινητική, ή ο συνδυασμός και των δύο:

$$E = KE + \Delta E \quad (7-12)$$

Όπου

$E$  = ολική μηχανική ενέργεια ( $\text{kg m}^2/\text{s}^2$ )

$\Delta E$  = δυναμική ενέργεια ( $\text{kg m}^2/\text{s}^2$ )

$KE$  = κινητική ενέργεια ( $\text{kg m}^2/\text{s}^2$ )

Για να κατανοήσουμε καλύτερα ποια είναι η σχέση μεταξύ δυναμικής και κινητικής ενέργειας, πρέπει να καταλάβουμε που τις συναντάμε. Λέμε ότι η βαρύτητα είναι ένας συντηρητικό πεδίο – δηλαδή πεδίο μέσα στο οποίο η συνολική ενέργεια διατηρείται. Έτσι, το άθροισμα των  $KE$  και  $\Delta E$ , ή το σύνολο  $E$ , σε ένα συντηρητικό πεδίο, είναι σταθερό. Η δυναμική ενέργεια είναι η ενέργεια που έχει ένα αντικείμενο σε ένα συντηρητικό πεδίο εξ' ολοκλήρου λόγω της θέσης του. Για παράδειγμα, αν σηκώσετε μια μάζα 1 kg πάνω από το κεφάλι σας, όσο υψηλότερα την κρατάτε, τόσο μεγαλύτερη δυναμική ενέργεια έχει. Αυτή η ενέργεια γίνεται αντιληπτή όταν ρίχνετε τη μάζα και προσγειώνεται στο πόδι σας! Για να ποσοτικοποιήσουμε αυτή τη μορφή ενέργειας, πρέπει να χρησιμοποιήσουμε μια σχέση για την ποσότητα του έργου που απαιτείται για την ανύψωση του αντικειμένου πάνω από ένα σημείο αναφοράς (συνήθως την επιφάνεια της Γης) ενάντια στη δύναμη της βαρύτητας. Για μια μικρή απόσταση από την επιφάνεια της Γης, όπου η βαρύτητα παραμένει σταθερή προκύπτει ότι:

$$\Delta E = m a_g h \quad (7-13)$$

Όπου

$m$  = μάζα ( $kg$ )

$a_g$  = επιτάχυνση της βαρύτητας ( $m/s^2$ )

$h$  = υψομετρική απόσταση από το σημείο αναφοράς ( $m$ )

Έτσι, για να υπολογίσουμε τη δυναμική ενέργεια ενός αντικειμένου σε κάποιο ύψος, πρέπει να γνωρίζουμε τρία πράγματα: τη μάζα  $m$ , την απόσταση του πάνω από ένα σημείο αναφοράς  $h$ , και την επιτάχυνση της βαρύτητας  $g$ , σε αυτό το σημείο αναφοράς. Εάν θέλουμε να βρούμε τη δυναμική ενέργεια ενός διαστημικού σκάφους σε τροχιά ψηλά πάνω από τη Γη, δεν μπορούμε να υποθέσουμε ότι η βαρύτητα είναι σταθερή και δεν μπορούμε πλέον να χρησιμοποιήσουμε την επιφάνεια της Γης ως σημείο αναφοράς. Ας δούμε πώς βρίσκουμε δυναμική ενέργεια ενός διαστημικού σκάφους σε τροχιά. Όπως γνωρίζουμε από την τελευταία ενότητα, η επιτάχυνση της βαρύτητας εξαρτάται από την απόσταση των αντικειμένων από το κέντρο της Γης,  $R$ . Για να βρούμε την εξίσωση δυναμικής ενέργειας για αυτό το βαρυτικό πεδίο, πρέπει να καθορίσουμε την ποσότητα έργου που χρειάζεται το διαστημικό σκάφος για να μεταφερθεί από το κέντρο της Γης στην τροχιακή του θέση, μια απόσταση  $R$ . Η εξίσωση αυτή δίνεται από:

$$\Delta E = -\frac{m\mu}{R} \quad (7-14)$$

Όπου

$\Delta E$  = δυναμική ενέργεια διαστημικού σκάφους ( $kg \ km^2/s^2$ )

$m$  = μάζα διαστημικού σκάφους ( $kg$ )

$\mu_{Earth} = G m_{Earth} = 3.98 \times 10^{14} \left(\frac{m^3}{s^2}\right)$

$R$  = απόσταση διαστημικού σκάφους από το κέντρο της Γης ( $km$ )

Παρατηρήστε το αρνητικό σύμβολο στην Εξίσωση (7-14). Αυτό το σύμβολο οφείλεται στη σύμβαση που χρησιμοποιούμε, η οποία ορίζει ότι το  $R$  είναι θετικό προς τα έξω από το κέντρο της Γης. Γνωρίζουμε ότι η δυναμική ενέργεια πρέπει να αυξηθεί καθώς μεταφέρουμε ένα διαστημόπλοιο σε υψηλότερη τροχιά. Έτσι, καθώς αυξάνουμε την τροχιά του διαστημικού σκάφους μας, το  $R$  αυξάνεται, και το  $\Delta E$  γίνεται ολοένα λιγότερο αρνητικό - γίνεται δηλαδή όλο και μεγαλύτερο. Να θυμάστε ότι για τη δυναμική ενέργεια, το -3 είναι μεγαλύτερο από το -4 επειδή είναι λιγότερο αρνητικό. (Αυτή η προσέγγιση είναι ανάλογη με τη θερμότητα: ένας πάγος στους -3 βαθμούς Κελσίου είναι "θερμότερος" από έναν στους -4

βαθμούς Κελσίου.) Στην ακραία περίπτωση που το  $R$  ισούται με το άπειρο (ή είναι αρκετά κοντά σε αυτό), η  $\Delta E$  πλησιάζει το μηδέν.

Ένας τρόπος να απεικονιστεί αυτή η περίεργη κατάσταση είναι να σκεφτεί κανείς ότι το κέντρο της Γης βρίσκεται στο βάθος ενός βαθιού πηγαδιού. Στο κάτω μέρος του πηγαδιού, το  $R$  είναι μηδέν, οπότε το  $\Delta E$  έχει την ελάχιστη τιμή του ( $PE=-\infty$ ). Καθώς αρχίζουμε να ανεβαίνουμε το πηγάδι, το  $\Delta E$  αρχίζει να αυξάνεται (γίνεται λιγότερο αρνητικό) μέχρι να φτάσουμε στο χείλος του όπου το  $R=\infty$ . Σε αυτό το σημείο, το  $\Delta E$  μας είναι ουσιαστικά μηδέν, και για όλους τους πρακτικούς σκοπούς, έχουμε ξεφύγει από την επιρροή της βαρύτητας της Γης. Φυσικά, ποτέ δεν φτάνουμε πραγματικά σε μια "άπειρη" απόσταση από τη Γη, αλλά όπως θα δούμε όταν συζητήσουμε για τα διαπλανητικά ταξίδια, ουσιαστικά ξεφεύγουμε από το βαρυτικό πεδίο της Γης σε απόσταση περίπου ενός εκατομμυρίου χιλιομέτρων.

Πως αντιλαμβάνεστε τη δυναμική ενέργεια μιας μάζας 1kg που κρέμεται σε ένα συγκεκριμένο ύψος; Την αφήνεται να πέσει! Η βαρύτητα θα την επιταχύνει και θα πέσει στο έδαφος με ταχύτητα έχοντας μετατρέψει την ενέργεια της σε μία άλλη μορφή ενέργειας – την κινητική. Όμοια με την γραμμική ορμή, η κινητική ενέργεια αποτελεί αποκλειστικά συνάρτηση της μάζας και της ταχύτητας του αντικειμένου:

$$KE = \frac{1}{2} mV^2 \quad (7-15)$$

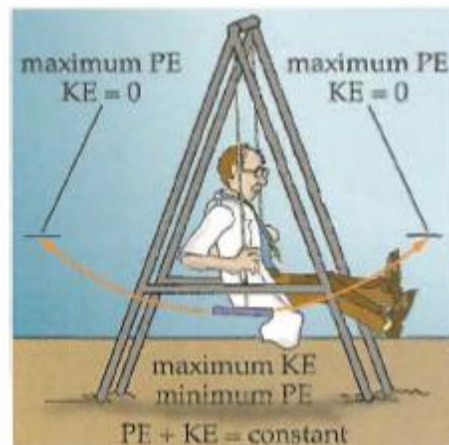
Όπου

$KE$  = κινητική ενέργεια ( $kg \ km^2/s^2$ )

$m$  = μάζα ( $kg$ )

$V$  = ταχύτητα ( $km/s$ )

Όπως είπαμε, η συνολική μηχανική ενέργεια σε ένα συντηρητικό πεδίο (όπως το βαρυτικό πεδίο) παραμένει σταθερή. Όμως, ένα διαστημικό σκάφος σε τροχιά μπορεί να πλησιάσει τη Γη και να απομακρυνθεί κατά τη διάρκεια της τροχιάς του. Έτσι, πώς διατηρείται σταθερή η μηχανική ενέργεια; Ανταλλάσσει τη δυναμική ενέργεια που χάνει καθώς κινείται πλησιέστερα, με κινητική ενέργεια (αυξημένη ταχύτητα). Στη συνέχεια, καθώς απομακρύνεται, η κινητική ενέργεια μειώνεται και η δυναμική ενέργεια αυξάνεται. Ατελείωτες μετατροπές μεταξύ  $\Delta E$  και  $KE$  συμβαίνουν παντού γύρω μας, αλλά συχνά δεν το παρατηρούμε. Έχουμε όλοι κάνει κούνια σε μια απλή παιδική χαρά όπως αυτή στο Σχήμα 97.



Σχήμα 97: Η Μηχανική ενέργεια διατηρείτε

Καθώς κινούμαστε εμπρός και πίσω, συνεχίζουμε το μετατρέπουμε την ΚΕ σε ΡΕ και αντίστροφα. Στο κάτω μέρος του τόξου κινούμαστε ταχύτερα, έτσι η ΚΕ είναι στο μέγιστο και η ΔΕ στο ελάχιστο. Καθώς ανεβαίνουμε, η ταχύτητά μας μειώνεται έως ότου, στην κορυφή του τόξου, σταματάμε για λίγο. Σε αυτό το σημείο, η ΚΕ είναι μηδέν επειδή δεν κινούμαστε (η ταχύτητα είναι μηδενική), αλλά η ΔΕ μας είναι μέγιστη. Το αντίστροφο συμβαίνει καθώς γυρίζουμε πίσω, αυτή τη φορά στρέφοντας την ΔΕ σε ΚΕ. Αν δεν υπήρχαν τριβές στα πλαίσια της κούνιας και η αντίσταση του αέρα, όταν ξεκινούσαμε μια κούνια, θα κινούμασταν για πάντα χωρίς κάποιος να μας κουνά. Ένας άλλος τρόπος να βιώσετε αυτή την εναλλαγή μεταξύ ΚΕ και ΔΕ είναι να μπείτε σε ένα τρενάκι του λούνα παρκ.

Μπορούμε τώρα να συνδυάσουμε την ΚΕ και την ΔΕ σε μια εξίσωση που μας δίνει την ολική μηχανική ενέργεια του διαστημικού μας σκάφους:

$$E = \frac{1}{2}mV^2 - \frac{m\mu}{R} \quad (7-16)$$

Όπου

$E$  = ολική μηχανική ενέργεια διαστημικού σκάφους ( $kg \ km^2/s^2$ )

$m$  = μάζα διαστημικού σκάφους ( $kg$ )

$\mu_{Earth} = Gm_{Earth} = 3.98 \times 10^{14} \left(\frac{m^3}{s^2}\right)$

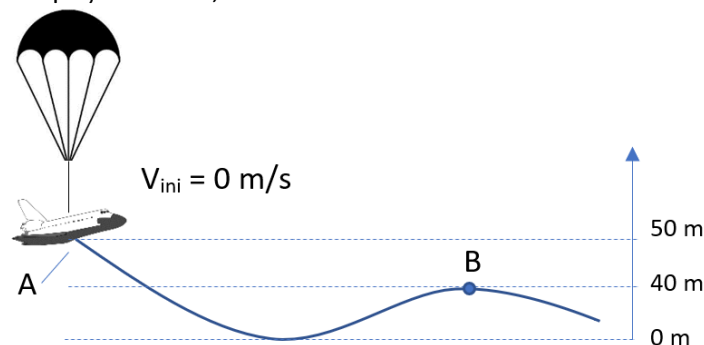
$R$  = απόσταση διαστημικού σκάφους από το κέντρο της Γης ( $km$ )

$V$  = ταχύτητα διαστημικού σκάφους ( $km/s$ )

Στη συνέχεια θα χρησιμοποιήσουμε αυτή την έκφραση για να αναπτύξουμε κάποια χρήσιμα εργαλεία για την ανάλυση της τροχιακής κίνησης.

### Παράδειγμα 7-2

Μία ερευνητική ομάδα κάνει δοκιμές αεροδυναμικής σε ένα νέο μοντέλο (υπό κλίμακα) διαστημικού σκάφους (spaceplane). Ένα αερόστατο αφήνει το διαστημικό σκάφος με ταχύτητα 0 m/s από ύψος 50 m (θέση Α) και αυτό διαγράφει την πορεία όπως στο παρακάτω σχήμα. Τι ταχύτητα θα έχει το διαστημικό σκάφος στην θέση Β στο ύψος των 40 m;



Λύση

- 1) Βρίσκουμε την Μηχανική Ενέργεια στο Σημείο Α

$$E_{\text{initial}} = m a_g h_{\text{initial}} + 1/2 m V_{\text{initial}}^2$$

$$\begin{aligned} \frac{E_{\text{initial}}}{m} &= (9.798 \text{ m/s}^2)(50 \text{ m}) + 1/2(0 \text{ m/s})^2 \\ &= 489.9 \text{ m}^2/\text{s}^2 \end{aligned}$$

2) Εφαρμόζουμε ΑΔΜΕ

$$E_{\text{initial}} = E_{\text{final}}$$

$$\frac{E_{\text{initial}}}{m} = \frac{E_{\text{final}}}{m}$$

$$\begin{aligned} 489.9 \text{ m}^2/\text{s}^2 &= a_g h_{\text{final}} + 1/2 V_{\text{final}}^2 \\ &= (9.798 \text{ m/s}^2)(40 \text{ m}) + 1/2 V_{\text{final}}^2 \end{aligned}$$

$$489.9 \text{ m}^2/\text{s}^2 - 391.9 \text{ m}^2/\text{s}^2 = 1/2 V_{\text{final}}^2$$

$$V_{\text{final}}^2 = 196 \text{ m}^2/\text{s}^2$$

$$V_{\text{final}} = 14 \text{ m/s}$$

**Συμπέρασμα:** Ξεκινώντας στο σημείο Α, το διαστημικό σκάφος έχει την μέγιστη δυναμική ενέργεια. Πέφτοντας σε ύψος, μειώνεται η δυναμική ενέργεια και αυξάνεται η κινητική του ενέργεια. Στο παραπάνω παράδειγμα δεν χρειάστηκε να γνωρίζουμε την μάζα του διαστημικού σκάφους, που σημαίνει ότι το σκάφος θα έφτανε την ταχύτητα των 14 m/s οποιαδήποτε και να ήταν η μάζα του. Σε παρακάτω ενότητες θα μελετήσουμε πιο λεπτομερώς το παράδειγμα αυτό εισάγοντας την ειδική μηχανική ενέργεια

## 7.9 Συστήματα Δύο Σωμάτων

Νωρίτερα, περιγράψαμε μια γενική προσέγγιση για την ανάλυση της κίνησης ενός αντικειμένου στην προηγούμενη ενότητα. Εκεί περιγράψαμε την κίνηση μιας μπάλας του μπέιζμπολ. Τώρα μπορούμε να χρησιμοποιήσουμε τα πρώτα τρία βήματα της ίδιας μεθόδου για να κατανοήσουμε την κίνηση οποιουδήποτε αντικειμένου σε τροχιά. Μια ειδική εφαρμογή της γενικής προσέγγισης που είδαμε είναι το πρόβλημα δύο σωμάτων. Όπως θα δούμε αργότερα σε αυτή την ενότητα, πρέπει να περιορίσουμε την ανάλυσή μας με υποθέσεις που μας διευκολύνουν. Γιατί έχουμε δύο σώματα; Αυτή είναι μια από τις υποθέσεις μας. Γιατί αποτελεί πρόβλημα; Η εύρεση μιας εξίσωσης που αντιπροσωπεύει αυτή την κίνηση αποτελεί ένα κλασικό πρόβλημα επιλυμένο και εκλεπτυσμένο από μαθητές και μαθηματικούς από την εποχή του Νεύτωνα.

### 7.9.1 Σύστημα συντεταγμένων

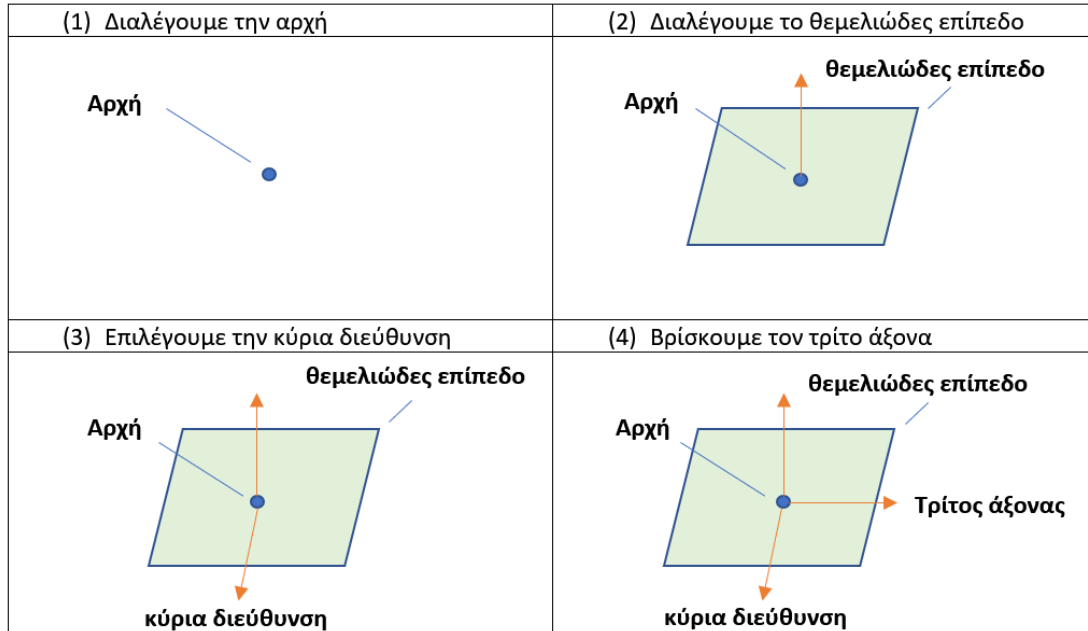
Για να είναι έγκυροι, οι νόμοι του Νεύτωνα πρέπει να εκφράζονται σε ένα αδρανειακό σύστημα αναφοράς, δηλαδή ένα σύστημα που δεν επιταχύνεται. Για να το καταλάβουμε αυτό, ας υποθέσουμε ότι

Θέλουμε να περιγράψουμε την κίνηση μιας μπάλας του μπέιζμπολ που πετάμε και πιάνουμε ενώ οδηγούμε στο αυτοκίνητό μας. Βλέπουμε την μπάλα να πηγαίνει πάνω και κάτω σε σχέση με μας. Το αυτοκίνητό μας μπορεί να επιταχύνεται σε σχέση με ένα αυτοκίνητο πίσω μας. Το αυτοκίνητό μας και το πίσω αυτοκίνητο ενδέχεται να επιταχύνουν σε σχέση με την επιφάνεια της Γης. Και φυσικά πρέπει να εξετάσουμε την κίνηση της Γης που γυρίζει στον άξονά της, την κίνηση της Γης γύρω από τον Ήλιο, την κίνηση του Ήλιου στον γαλαξία, την κίνηση του Γαλαξία στο σύμπαν και την επέκταση του σύμπαντος! Αυτά είναι όλα επιταχυνόμενα συστήματα αναφοράς για την κίνηση της μπάλας, που περιπλέκουν την προσπάθειά μας να περιγράψουμε αυτήν την κίνηση χρησιμοποιώντας τους νόμους του Νεύτωνα.

Πράγματι, από τις αστρονομικές παρατηρήσεις, φαίνεται ότι τα πάντα στο σύμπαν επιταχύνονται. Πώς μπορούμε λοιπόν να βρούμε ένα καθαρά μη επιταχυνόμενο σύστημα αναφοράς; Δεν μπορούμε! Για να εφαρμόσουμε τους νόμους του Νεύτωνα στο παράδειγμα με τη μπάλα, πρέπει να επιλέξουμε ένα σύστημα αναφοράς που είναι αρκετά αδρανές για το πρόβλημά μας.

Οποιοδήποτε σύστημα αναφοράς είναι απλώς μια συλλογή μοναδιαίων διανυσμάτων σε ορθή γωνία μεταξύ τους που μας επιτρέπει να καθορίσουμε το μέγεθος και την κατεύθυνση άλλων διανυσμάτων, όπως τη θέση και την ταχύτητα του διαστημικού σκάφους. Τα μοναδιαία αυτά διανύσματα μας επιτρέπουν να καθορίσουμε τις συνιστώσες των διανυσμάτων στον τρισδιάστατο χώρο. Ορίζοντας αυτά τα μοναδιαία διανύσματα, ορίζουμε ένα σύστημα συντεταγμένων.

Για να δημιουργήσουμε ένα σύστημα συντεταγμένων, πρέπει να καθορίσουμε τέσσερα ακόμα στοιχεία, ένα αρχικό σημείο, ένα θεμελιώδες επίπεδο, μια κύρια κατεύθυνση και έναν τρίτο άξονα, όπως φαίνεται στο σχήμα 98.



**Σχήμα 98: Σύστημα συντεταγμένων**

Το αρχικό σημείο ορίζει την αρχή των αξόνων του συστήματος συντεταγμένων. Οι άλλες τρεις παράμετροι καθορίζουν τον προσανατολισμό του συστήματος. Το θεμελιώδες επίπεδο περιέχει δύο άξονες του συστήματος. Εφόσον έχουμε το επίπεδο, μπορούμε να καθορίσουμε τον πρώτο άξονα ορίζοντας ένα μοναδιαίο διάνυσμα που ξεκινά από την αρχή και είναι κάθετο στο επίπεδο αυτό. Στη

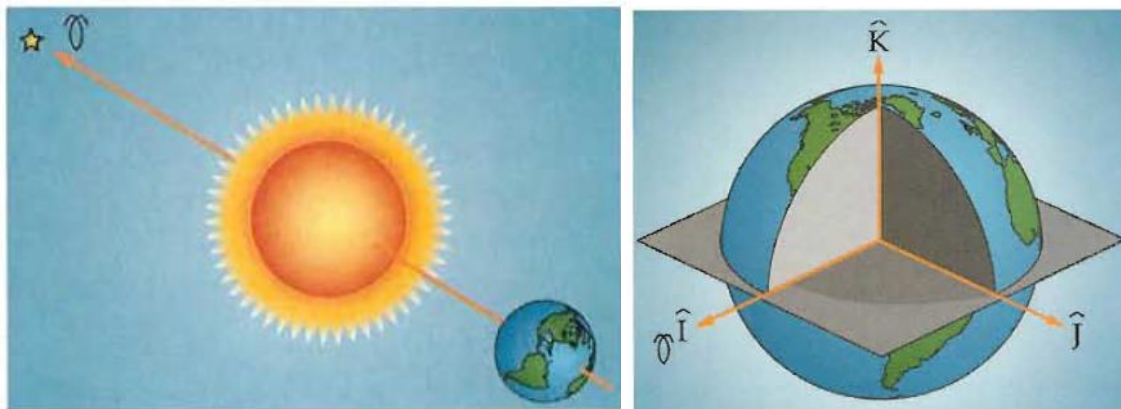


συνέχεια, χρειαζόμαστε μια κύρια κατεύθυνση μέσα στο επίπεδο, την οποία ορίζουμε χρησιμοποιώντας ένα μοναδιαίο διάνυσμα με φορά προς κάποιο μακρινό αντικείμενο, όπως ένα αστέρι. Τώρα που έχουμε δύο κατευθύνσεις (την κύρια κατεύθυνση και έναν άξονα κάθετο στο θεμελιώδες επίπεδο), μπορούμε να βρούμε τον τρίτο άξονα χρησιμοποιώντας τον κανόνα του δεξιού χεριού.

Τα συστήματα συντεταγμένων θα πρέπει να κάνουν τη ζωή μας ευκολότερη. Αν επιλέξουμε το σωστό σύστημα συντεταγμένων, η ανάπτυξη των εξισώσεων της κίνησης μπορεί να είναι απλή. Αν επιλέξουμε το λανθασμένο σύστημα, μπορεί να είναι σχεδόν αδύνατη. Για το διαστημικό σκάφος που περιβάλλει τη Γη, θα επιλέξουμε ένα δοκιμασμένο και πραγματικό σύστημα το οποίο γνωρίζουμε ότι διευκολύνει την επίλυση των εξισώσεων κίνησης.

Αυτό το γεωκεντρικό-ισημερινό σύστημα συντεταγμένων έχει αυτά τα χαρακτηριστικά:

- Η αρχή των αξόνων βρίσκεται στο κέντρο της Γης (εξ ου και το γεωκεντρικό όνομα)
- Θεμελιώδες επίπεδο είναι ο ισημερινός της Γης (εξ ου και γεωκεντρικός-ισημερινός). Κάθετο προς το επίπεδο του βόρειου πόλου.
- Η κύρια διεύθυνση είναι αυτή της εαρινής ισημερίας. Υπολογίζεται από την γραμμή που ενώνει τη Γη και τον Ήλιο την πρώτη μέρα της Άνοιξης, όπως φαίνεται στο Σχήμα 99. Ενώ αυτή η κατεύθυνση ίσως να μην φαίνεται "βολική" για εμάς, για τους αστρονόμους που καθόρισαν αρχικά το σύστημα είναι εξαιρετικά σημαντική.
- Ο τρίτος άξονας υπολογίζεται χρησιμοποιώντας τον κανόνα του δεξιού χεριού. Το σχήμα 100 δείχνει ολόκληρο το σύστημα συντεταγμένων.



**Σχήμα 99:** Διεύθυνση εαρινής ισημερίας είναι η ευθεία από την Γη στον Ήλιο την πρώτη μέρα της Άνοιξης – 21 Μαρτίου

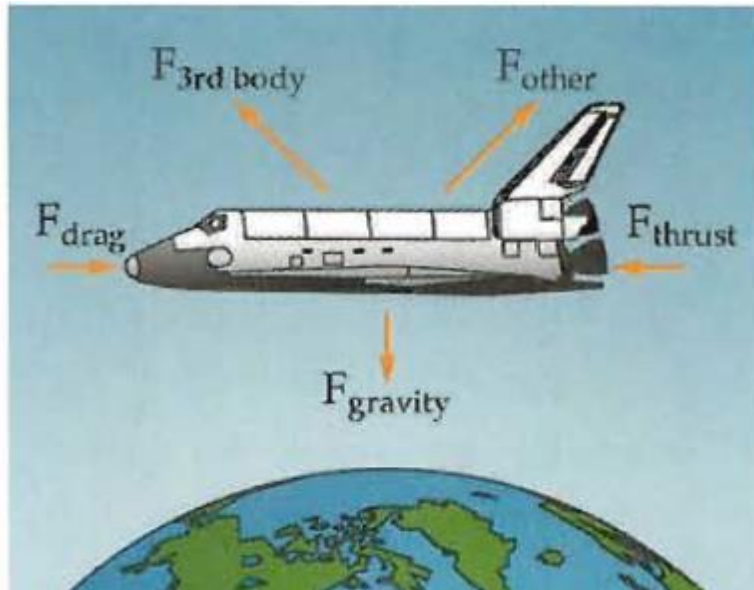
**Σχήμα 100:** γεωκεντρικό-ισημερινό σύστημα συντεταγμένων

### 7.9.2 Εξισώσεις Τροχιακής/Πλανητικής Κίνησης

Χρησιμοποιώντας το γεωκεντρικό-ισημερινό σύστημα συντεταγμένων μπορούμε να εφαρμόσουμε τους νόμους του Νεύτωνα για να μελετήσουμε τις εξωτερικές δυνάμεις που επιδρούν σε ένα σύστημα ή στην περίπτωση μας ένα διαστημικό σκάφος. Ας τοποθετήσουμε τον εαυτό μας μέσα σε ένα φανταστικό διαστημικό σκάφος σε τροχιά γύρω από τη Γη για να δούμε εάν μπορούμε να απαριθμήσουμε τις δυνάμεις που ασκούνται στο σκάφος.

- Βαρύτητα της Γης
- Ατμοσφαιρική τριβή (εάν είμαστε κοντά στην ατμόσφαιρα της Γης)
- Δύναμη (Ωση) κινητήρων (εάν υπάρχουν)

- Δύναμη-Έλξη από τρίτο σώμα (Ήλιος, Σελήνη ή άλλοι πλανήτες)
- Άλλες δυνάμεις



Σχήμα 101: Εξωτερικές δυνάμεις που επιδρούν σε ένα διαστημικό σκάφος

Αθροίζοντας αυτές τις δυνάμεις όπως φαίνεται στο Σχήμα 101, καταλήγουμε στην εξής εξίσωση κίνησης:

$$\Sigma \vec{F}_{external} = \vec{F}_{gravity} + \vec{F}_{drag} + \vec{F}_{thrust} + \vec{F}_{3rd\ body} + \vec{F}_{other} = m\vec{a} \quad (7-17)$$

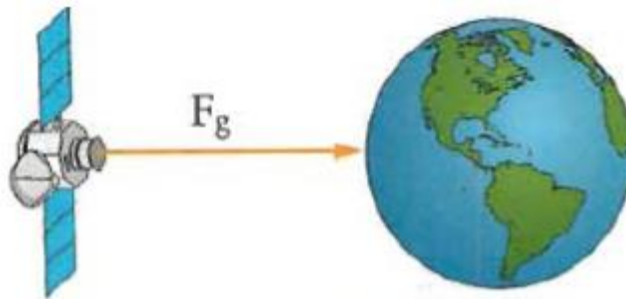
Εάν αντικαταστήσουμε τις δυνάμεις στην παραπάνω εξίσωση και προσπαθήσουμε να εξάγουμε τη λύση της εξίσωσης θα δημιουργήσουμε ένα πολύπλοκο πρόβλημα. Ας εξετάσουμε κάποιες λογικές υποθέσεις που μπορούμε να κάνουμε για να απλοποιήσουμε το πρόβλημα.

#### Υποθέσεις-Απλοποιήσεις

Χρησιμοποιώντας κάποιες υποθέσεις μπορούμε να απλοποιήσουμε το πρόβλημα όμως περιορίζουμε τη λύση μας στις περιπτώσεις που αυτές οι υποθέσεις/συνθήκες ισχύουν. Μπορούμε λοιπόν να θεωρήσουμε ότι:

- Το διαστημικό σκάφος βρίσκεται σε τροχιά αρκετά υψηλότερα από την ατμόσφαιρα της Γης οπότε  $\vec{F}_{drag} = 0$
- Το διαστημικό σκάφος δεν αλλάζει τη θέση και τον προσανατολισμό του οπότε  $\vec{F}_{thrust} = 0$
- Θεωρούμε ότι η κίνηση του είναι αρκετά κοντά στη Γη ώστε οι ελκτικές δυνάμεις από άλλα σώματα να είναι αμελητέες ( $\vec{F}_{3rd\ body} = 0$ )
- Η μάζα της Γης είναι πολύ μεγαλύτερη από τη μάζα του διαστημικού σκάφους ( $m_{earth} \gg m_{spacecraft}$ )
- Η Γη είναι σφαιρική με ομοιόμορφη πυκνότητα οπότε θεωρούμε ότι όλη η μάζα της είναι συγκεντρωμένη σε ένα σημείο, στο κέντρο της Γης. Συνεπώς, η βαρύτητα ενεργεί προς το κέντρο της Γης.
- Η μάζα του διαστημικού σκάφους παραμένει αμετάβλητη οπότε ισχύει η εξίσωση 7-7.
- Το γεωκεντρικό-ισημερινό σύστημα συντεταγμένων είναι επαρκώς αδρανειακό οπότε μπορούμε να εφαρμόσουμε τους νόμους του Νεύτωνα.

Έτσι η μόνη δύναμη που ασκείται στο διαστημικό σκάφος είναι η βαρυτική δύναμη και η εξίσωση της κίνησης γίνεται  $\Sigma \vec{F}_{external} = \vec{F}_{gravity} = m\vec{a}$  όπως φαίνεται στο Σχήμα 102.



**Σχήμα 102: Βαρυτική Δύναμη**

Εφαρμόζοντας το νόμο του Νεύτωνα για την παγκόσμια έλξη σε διανυσματική μορφή έχουμε:

$$\vec{F}_{gravity} = -\frac{\mu m \vec{R}}{R^2} \quad (7-18)$$

Αντικαθιστώντας την εξίσωση της βαρυτικής δύναμης στην παραπάνω εξίσωση παίρνουμε:

$$\vec{F}_{gravity} = -\frac{\mu m \vec{R}}{R^2} = m\vec{a} = m\ddot{\vec{R}} \quad (7-19)$$

Διαιρώντας τα δύο μέλη με  $m$  καταλήγουμε στην εξίσωση κίνησης δύο σωμάτων

$$\ddot{\vec{R}} + \frac{\mu}{R^2} \frac{\vec{R}}{R} = 0 \quad (7-20)$$

Όπου,

$\ddot{\vec{R}}$ : το διάνυσμα της επιτάχυνσης του διαστημικού σκάφους ( $\text{km/s}^2$ )

$\mu$ : η βαρυτική παράμετρος/σταθερά ( $\text{km}^3/\text{s}^2$ ) =  $3.986 \times 10^5 \text{ km}^3/\text{s}^2$  για τη Γη

$\vec{R}$ : διάνυσμα θέσης του διαστημικού σκάφους (km)

$R$ : μέτρο του διανύσματος θέσης του διαστημικού σκάφους (km)

Τί μπορούμε να συμπεράνουμε για τη κίνηση του διαστημικού σκάφους γύρω από τη Γη έχοντας την εξίσωση κίνησης δύο σωμάτων; Δυστυχώς, στην παρούσα μορφή (δεύτερης τάξης, μη γραμμική, διαφορική διανυσματική) δεν μας βοηθά να απεικονίσουμε τίποτα για την κίνηση. Για να κατανοήσουμε τη σημασία της εξίσωσης κίνησης δύο σωμάτων, πρέπει πρώτα να το λύσουμε χρησιμοποιώντας μια πολύπλοκη μαθηματική απλοποίηση. Έτσι καταλήγουμε σε μια έκφραση για το μέγεθος του διανύσματος θέσης (όχι της ταχύτητας) ενός αντικειμένου στο διάστημα συναρτήσει κάποιων νέων μεταβλητών.

$$R = \frac{k_1}{1+k_2 \cos v} \quad (7-20)$$

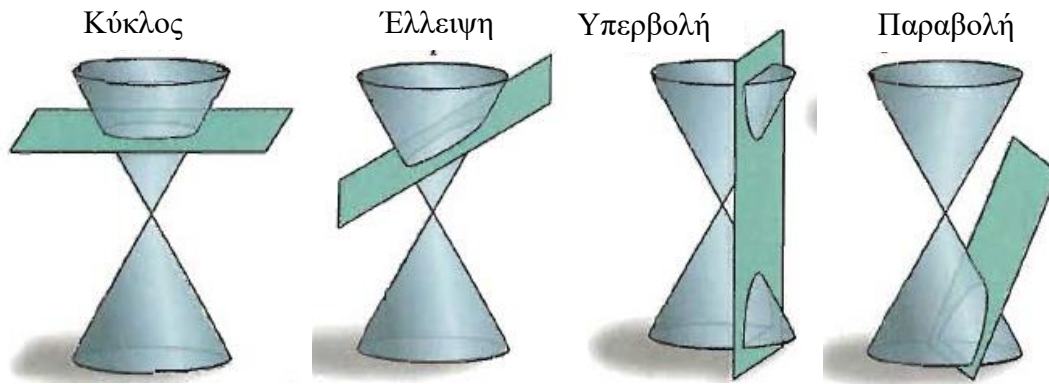
Όπου

$R$ : μέτρο του διανύσματος θέσης του διαστημικού σκάφους (km)

$k_1$ : σταθερά που εξαρτάται από τα  $\mu, \vec{R}, \vec{v}$

$k_2$ : σταθερά που εξαρτάται από τα  $\mu, \vec{R}, \vec{v}$

$v$ : πολική γωνία που σχηματίζεται ανάμεσα στον θεμελιώδη άξονα του συστήματος συντεταγμένων και στο διάνυσμα  $\vec{R}$

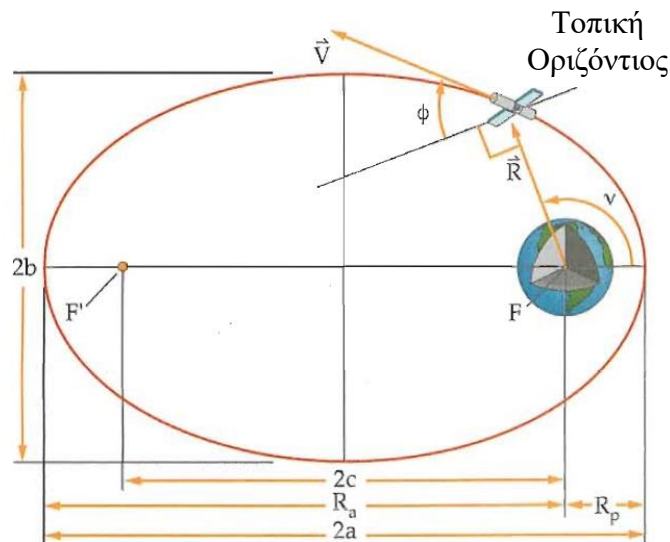


**Σχήμα 103: Κωνικές Τομές, η λύση για την κίνηση σε συστήματα 2 σωμάτων (δορυφόρων γύρω από την Γη)**

Αυτή η εξίσωση είναι η λύση στην εξίσωση κίνησης δύο σωμάτων και περιγράφει τη θέση του διαστημικού σκάφους  $R$  σε όρους δύο σταθερών και πολικής γωνίας  $\nu$ . Μπορεί να αναγνωρίσετε ότι αυτή η εξίσωση αντιπροσωπεύει επίσης μια γενική σχέση για κύκλο, έλλειψη, παραβολή ή υπερβολή, γνωστές και ως κωνικές τομές, όπως φαίνονται στο σχήμα 103. Μόλις αποδείξαμε τους νόμους της Κέπλερ για την πλανητική κίνηση! Ο Κέπλερ έδειξε ότι οι τροχιές των πλανητών ήταν ελλείψεις αλλά δεν μπορούσαν να εξηγήσουν γιατί. Τώρα δείξαμε γιατί: κάθε αντικείμενο που κινείται σε ένα πεδίο βαρύτητας πρέπει να ακολουθεί μία από τις κωνικές τομές. Στην περίπτωση των πλανητών ή των διαστημικών σκαφών σε τροχιά, αυτή η τομή είναι η έλλειψη ή ο κύκλος (που είναι μια ειδική περίπτωση έλλειψης). Τώρα μπορούμε να δούμε μερικούς τρόπους για να περιγράψουμε το μέγεθος και το σχήμα μιας τροχιάς.

### 7.9.3 Τροχιακή γεωμετρία

Επειδή ενδιαφερόμαστε κυρίως για τις τροχιές των διαστημικών σκαφών, οι οποίες γνωρίζουμε ότι είναι ελλείψεις, ας δούμε πιο κοντά την ελλειπτική γεωμετρία. Χρησιμοποιώντας το Σχήμα 104 ως αναφορά, ας ορίσουμε κάποιες σημαντικές γεωμετρικές παραμέτρους για μια έλλειψη.



**Σχήμα 104: Γεωμετρία Ελλειπτικής Τροχιάς**

$\vec{R}$ : διάνυσμα θέσης διαστημικού σκάφους ως προς το κέντρο της Γης

$\vec{V}$ : διάνυσμα ταχύτητας διαστημικού σκάφους

F και F': εστίες έλλειψης

$R_p$ : ακτίνα περιγείου

$R_a$ : ακτίνα απογείου

2a: μεγάλος άξονας

2b: μικρός άξονας

2c: απόσταση εστιών

a: μεγάλος ημιάξονας

b: μικρός ημιάξονας

v: αληθής ανωμαλία

φ: γωνία πτήσης

- R είναι η ακτίνα από την εστία της ελλείψεως (στην περίπτωση αυτή, του κέντρου της Γης) προς το διαστημικό σκάφος.
- F και F' είναι η κύρια (κατεχόμενες) και κενή εστία. Το κέντρο της Γης βρίσκεται στην κατεχόμενη εστία.
- $R_p$  είναι η ακτίνα της περιάψης (ακτίνα της πλησιέστερης προσέγγισης του Διαστημικού σκάφους στην κατεχόμενη εστίαση). Ονομάζεται ακτίνα του περιγείου όταν η τροχιά είναι γύρω από τη Γη
- $R_a$  είναι η ακτίνα της απόαψης (ακτίνα της πιο μακρινής προσέγγισης του Διαστημικού σκάφους στην κατεχόμενη εστίαση). Ονομάζεται ακτίνα του απόγειου όταν η τροχιά είναι γύρω από τη Γη
- 2a είναι ο κύριος άξονας ή το μήκος της ελλείψεως. Το μισό από αυτό είναι "a", ή ο μεγάλος ημιάξονας.
- 2b είναι ο μικρός άξονας ή το πλάτος της έλλειψης. Το μισό από αυτό είναι "b", ή ο μικρός ημιάξονας
- 2c είναι η απόσταση μεταξύ των εστιών,  $R_a - R_p$
- v είναι η αληθής ανωμαλία ή η πολική γωνία που μετράτε από το περίγειο έως το διάνυσμα θέσης του διαστημοπλοίου, R, προς την κατεύθυνση της κίνησης του διαστημικού σκάφους. Υπολογίζει τη θέση του διαστημικού σκάφους σε τροχιά. Για παράδειγμα, αν το  $v = 180^\circ$  το διαστημικό σκάφος είναι  $180^\circ$  από το περίγειο, βρίσκεται δηλαδή στο απόγειο. Το εύρος για την αληθής ανωμαλία είναι από  $0^\circ$  έως  $360^\circ$
- φ είναι η γωνία πτήσης που μετράτε από τον τοπικό οριζόντιο άξονα στο διάνυσμα ταχύτητας V. Στο διαστημικό σκάφος η τοπικός οριζόντιος άξονας είναι κάθετος προς το διάνυσμα θέσης, R. Όταν το διαστημικό σκάφος ταξιδεύει από το περίγειο στο απόγειο, το διάνυσμα ταχύτητας του είναι πάντα πάνω από τον τοπικό ορίζοντα, έτσι  $\phi > 0^\circ$ . Όταν ταξιδεύει από το απόγειο στο περίγειο, το διάνυσμα ταχύτητας του είναι πάντα κάτω από τον τοπικό ορίζοντα  $\phi < 0^\circ$ . Η μέγιστη τιμή της γωνίας πτήσης είναι  $90^\circ$ . Ακριβώς πάνω στο απόγειο και στο περίγειο μιας ελλειπτικής τροχιάς, ο φορέας ταχύτητας είναι παράλληλος προς τον τοπικό ορίζοντα, έτσι  $\phi = 0^\circ$ .
- e είναι η εκκεντρότητα, η οποία είναι ο λόγος 2c προς 2a.

$$e = \frac{2c}{2a}$$

- Η εκκεντρότητα ορίζει το σχήμα ή τον τύπο της κωνικής τομής. Η εκκεντρικότητα είναι ένας όρος που δηλώνει τον βαθμό της μη κυκλικότητας. Επειδή η κυκλική κίνηση θεωρήθηκε κάποτε τέλεια, κάθε απόκλιση ήταν ανώμαλη ή έκκεντρη. Επειδή η απόσταση ανάμεσα στις εστίες σε μια έλλειψη είναι πάντα μικρότερη από το μήκος της έλλειψης, η εκκεντρότητά της είναι μεταξύ 0 και 1. Ένας κύκλος

έχει  $e = 0$ . Μια πολύ μεγάλη, στενή έλλειψη η εκκεντρότητα  $e$  πλησιάζει τη μονάδα. Μια παραβολή έχει  $e = 1$  και μια υπερβολή  $e > 1$ .

Έχοντας ορίσει όλες αυτές τις γεωμετρικές παραμέτρους ας δούμε την πολική εξίσωσή του κώνου αντικαθιστώντας τις σταθερές  $k_1 < a(1-e^2)$  και  $k_2 = e$  (Εξ. 7-20). Έτσι, έχουμε

$$R = \frac{a(1-e^2)}{1+e\cos\nu} \quad (7-21)$$

όπου

$R$ : μέτρο του διανύσματος θέσης του διαστημικού σκάφους (km)

$a$ : μεγάλος ημιάξονας (km)

$e$ : εκκεντρότητα

$\nu$ : αληθής ανωμαλία (μοίρες ή ακτίνια)

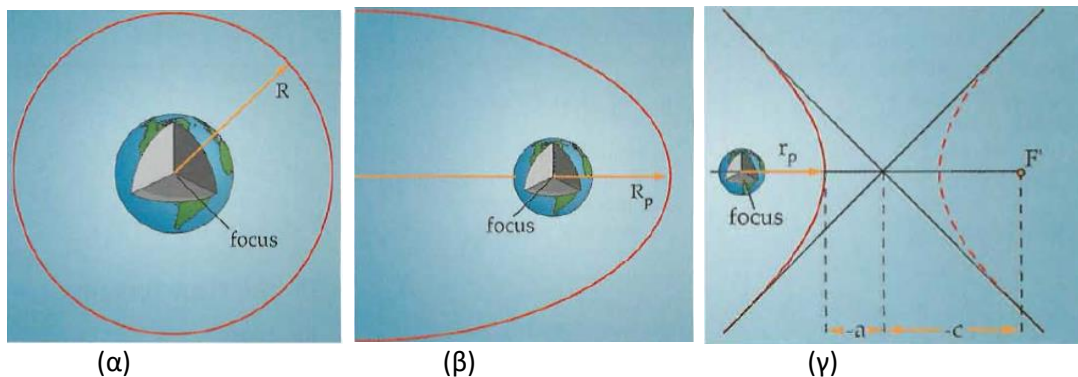
Για να υπολογίσουμε την απόσταση στο πλησιέστερο σημείο  $R_p$  και στο μακρύτερο σημείο  $R_a$  χρησιμοποιούμε την εξίσωση:

$$\text{Στο περίγειο, } \nu = 0^\circ, R = R_p = \frac{a(1-e^2)}{1+e\cos(0^\circ)} = a(1-e) \quad (7-22)$$

$$\text{Στο απόγειο, } \nu = 180^\circ, R = R_a = \frac{a(1-e^2)}{1+e\cos(180^\circ)} = a(1+e)$$

Εξετάζοντας τη γεωμετρία μιας έλλειψης, μπορούμε να δούμε ότι το μήκος της έλλειψης,  $2a$  ισούται με  $(R_p + R_a)$ , και η απόσταση μεταξύ των εστιών,  $2c$ , με  $(R_p - R_a)$ . Τώρα, εάν θέλουμε να υπολογίσουμε την εκκεντρότητα της τροχιάς με βάση την ακτίνα του περιγείου και του απόγειου, μπορούμε να χρησιμοποιήσουμε το δεύτερο μέρος της Εξίσωσης (7-23).

$$e = \frac{2c}{2a} = \frac{R_p - R_a}{R_p + R_a} \quad (7-23)$$



**Σχήμα 105: (α) Κύκλος, ειδική περίπτωση της έλλειψης (β) Παραβολή, η τροχιά με την οποία ξεφεύγουμε από την Γη (γ) Υπερβολή, τροχιά που χρησιμοποιείται για διαπλανητικές αποστολές**

Οι παράμετροι για την έλλειψη ισχύουν επίσης για τις κυκλικές, παραβολικές και υπερβολικές τροχιές. Το Σχήμα 105α δείχνει μια κυκλική τροχιά, όπου η ακτίνα από το κέντρο της Γης είναι σταθερή και ίση με τον μεγάλο ημιάξονα. Επομένως, αυτή η τροχιά δεν έχει περίγειο και απόγειο, και η εκκεντρότητα της είναι μηδέν. Η γωνία πτήσης είναι πάντα μηδέν. Η παραβολή στην Εικόνα 105β αντιπροσωπεύει την ελάχιστη τροχιά διαφυγής ή αλλιώς τη διαδρομή ώστε ένα διαστημικό σκάφος μόλις που ξεφεύγει από

τη Γη, χωρίς να επιστρέψει ποτέ. Επομένως δεν υπάρχει κανένα απόγειο και καμία κενή εστία. Έτσι, ο μεγάλος ημιάξονας και η απόσταση μεταξύ των εστιών ισούνται με άπειρο. Έτσι λέμε ότι η εκκεντρότητα είναι ίση με  $e = 1$ . Η αληθής ανωμαλία κυμαίνεται από  $0^\circ$  έως  $180^\circ$  στην εξερχόμενη διαδρομή. Η γωνία πτήσης είναι μεγαλύτερη από μηδέν. Φυσικά, όταν ένα διαστημικό σκάφος εισέρχεται σε μια παραβολική τροχιά, η αληθής του ανωμαλία είναι μεγαλύτερη από  $180^\circ$  μέχρι να περάσει το περίγειο. Στη συνέχεια, μηδενίζεται και αυξάνεται σχεδόν έως τις  $180^\circ$ . Η γωνία πτήσης είναι μικρότερη από το μηδέν μέχρι να περάσει το περίγειο.

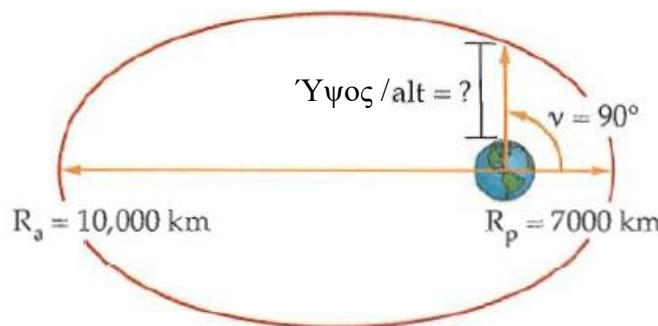
Η υπερβολή του Σχήματος 105γ αντιπροσωπεύει επίσης μια τροχιά διαφυγής, οπότε δεν υπάρχει απόγειο. Είναι ασυνήθιστο σχήμα με διαφορετική σύμβαση προσήμων. Επειδή το μήκος της υπερβολής (απόσταση μεταξύ των "άκρων") είναι εκτός της τομής, ορίζουμε την απόσταση  $2a$  ως αρνητική. Η ίδια σύμβαση ισχύει επίσης για την απόσταση μεταξύ των εστιών,  $2c$ , οπότε και το  $2c$  είναι επίσης αρνητικό. Το μέγεθος όμως του  $2c$  είναι πάντα μεγαλύτερο από το μέγεθος του  $2a$ , οπότε η εκκεντρότητα είναι μεγαλύτερη από 1. Η πραγματική ανωμαλία κυμαίνεται από  $0^\circ$  έως σε λιγότερο από  $180^\circ$  στην εξερχόμενη διαδρομή και σε μεγαλύτερη από  $180^\circ$  έως  $0^\circ$  στην εισερχόμενη διαδρομή. Η γωνία πτήσης είναι μεγαλύτερη από  $0^\circ$  στην εξερχόμενη διαδρομή και μικρότερη από  $0^\circ$  στην εισερχόμενη διαδρομή. Ο Πίνακας 4-1 συνοψίζει αυτές τις παραμέτρους.

Κωνική Τομή	$a$ = Ημιάξονας	$c$ = μισό της απόστασης από της Εστία	$e$ = εκκεντρότητα
Κύκλος	$a > 0$	$c = 0$	$e = 0$
Έλλειψη	$a > 0$	$0 < c < a$	$0 < e < 1$
Παραβολή	$a = \infty$	$c = \infty$	$e = 1$
Υπερβολή	$a < 0$	$ a  <  c  > 0$	$a > 1$

Πίνακας 1: Παράμετροι Κωνικών Τομών

### Παράδειγμα 7-2

Ένας δορυφόρος τηλεπαρατήρησης είναι σε τροχιά με περίγειο 7000 km και απόγειο 10000 km. Ποιο είναι το ύψος του δορυφόρου πάνω από την Γη αν η αληθής ανωμαλία είναι  $90^\circ$ ;



### Λύση

- 1) Βρίσκουμε την εκκεντρότητα  $e$

$$e = \frac{R_a - R_p}{R_a + R_p} = \frac{10,000 \text{ km} - 7000 \text{ km}}{10,000 \text{ km} + 7000 \text{ km}} = 0.1765$$

- 2) Βρίσκουμε τον μεγάλο ημιάξονα  $a$

$$a = \frac{R_a + R_p}{2} = \frac{10,000 \text{ km} + 7000 \text{ km}}{2} = 8500 \text{ km}$$

3) Βρίσκουμε την ακτίνα R από την εστία της ελλείψεως

$$R = \frac{a(1 - e^2)}{1 + e \cos \nu} = \frac{(8500 \text{ km})(1 - (0.1765)^2)}{1 + 0.1765 \cos 90^\circ}$$

$$R = 8235.2 \text{ km}$$

4) Βρίσκουμε το ύψος (alt) αφαιρώντας την ακτίνα της Γης

$$\begin{aligned} \text{Alt}_{\nu=90^\circ} &= 8235.2 \text{ km} - 6378.14 \text{ km} \\ &= 1857.1 \text{ km} \end{aligned}$$

### 7.9.4 Ειδική Μηχανική Ενέργεια

Είδαμε ότι για την κίνηση σε ένα συντηρητικό πεδίο η μηχανική ενέργεια και η γωνιακή ορμή διατηρούνται. Επειδή η τροχιακή κίνηση συμβαίνει σε ένα συντηρητικό βαρυτικό πεδίο, το διαστημικό σκάφος διατηρεί τη μηχανική ενέργεια και τη γωνιακή του ορμή. Ας δούμε λοιπόν πώς αυτές οι αρχές παρέχουν πολύτιμα εργαλεία για τη μελέτη της τροχιακής κίνησης.

Ας θυμηθούμε τον ορισμό της μηχανικής ενέργειας όπου προσθέτουμε την δυναμική (PE) και την κινητική ενέργεια (KE). Μαζί, σχηματίζουν μια σχέση μεταξύ της μάζας του διαστημικού σκάφους,  $m$ , της θέσης του  $R$ , της ταχύτητας  $V$  και της τοπικής βαρυτικής παραμέτρου  $\mu$  ( $3.986 \times 10^5 \text{ km}^3 / \text{s}^2$  για τη Γη).

$$E = \frac{1}{2} m V^2 - \frac{\mu m}{R} \quad (7-24)$$

Για να γενικεύσουμε αυτή την εξίσωση, ώστε παραλείψουμε τη μάζα, διαιρούμε τις δύο πλευρές της εξίσωσης με το  $m$ . Έτσι, ορίζουμε μια νέα έννοια της μηχανικής ενέργειας που ονομάζεται ειδική μηχανική ενέργεια,  $\varepsilon$ , η οποία δεν εξαρτάται από τη μάζα. Έτσι, μπορούμε να μιλήσουμε για την ενέργεια σε μια συγκεκριμένη τροχιά, είτε το αντικείμενο σε τροχιά είναι μια μπάλα του γκολφ είτε ο Διεθνής Διαστημικός Σταθμός. Η ειδική μηχανική ενέργεια,  $\varepsilon$ , είναι απλώς η συνολική μηχανική ενέργεια που διαιρείται με τη μάζα ενός διαστημικού σκάφους:

$$\varepsilon \equiv \frac{E}{m} = \frac{1}{2} V^2 - \frac{\mu}{R} \quad (7-25)$$

όπου

$\varepsilon$ : ειδική μηχανική ενέργεια του διαστημικού σκάφους ( $\text{km}^2/\text{s}^2$ )

$V$ : γραμμική ταχύτητα διαστημικού σκάφους ( $\text{km}/\text{s}$ )

$\mu$ : βαρυτική παράμετρος ( $\text{km}^3/\text{s}^2$ ) =  $3.98 \times 10^5 \text{ km}^3/\text{s}^2$  για τη Γη

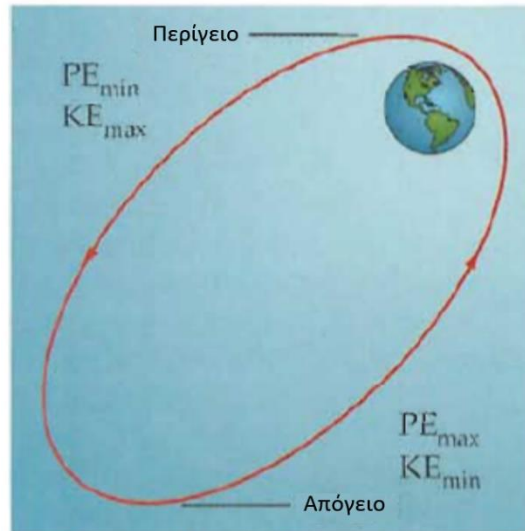
$R$ : μέτρο του διανύσματος θέσης του διαστημικού σκάφους ( $\text{km}$ )

Επειδή η ειδική μηχανική ενέργεια διατηρείται, είναι η ίδια σε οποιοδήποτε σημείο κατά μήκος μιας τροχιάς! Καθώς ένα διαστημικό σκάφος πλησιάζει το απόγειο, κερδίζει υψόμετρο, δηλαδή το  $R$  ή αλλιώς η απόσταση από το κέντρο της Γης, αυξάνεται. Η αύξηση του  $R$  σημαίνει ότι αποκτά δυναμική ενέργεια – δηλαδή η δυναμική ενέργεια ( $\Delta E$ ) γίνεται λιγότερο αρνητική (λόγω του τρόπου με τον οποίο την ορίζουμε). Ταυτόχρονα, η ταχύτητα του διαστημικού σκάφους μειώνεται και ως εκ τούτου χάνει κινητική ενέργεια (KE). Όταν φτάσει στο υψηλότερο σημείο, το  $\Delta E$  είναι στο μέγιστο. Ωστόσο, επειδή η ταχύτητά του σε αυτό το σημείο είναι ελάχιστη και η KE είναι ελάχιστη. Το άθροισμα των  $\Delta E$  και KE, δηλαδή η ειδική μηχανική ενέργεια είναι σταθερή. Καθώς το διαστημικό σκάφος περνάει από το απόγειο και αρχίζει να κινείται προς το περίγειο, αρχίζει να αλλάζει την  $\Delta E$  σε KE. Έτσι, η ταχύτητά του αυξάνεται



σταθερά μέχρι να φτάσει στο περίγειο, όπου η ταχύτητά του είναι μέγιστη όπως και η ΚΕ. Πάλι, το άθροισμα της δυναμικής και της κινητικής ενέργειας- ειδική μηχανική ενέργεια – παραμένει σταθερό.

Το σχήμα 106 απεικονίζει αυτές τη σχέση. Το γεγονός ότι η ειδική μηχανική ενέργεια είναι σταθερή μας δίνει ένα εξαιρετικά ισχυρό εργαλείο για την ανάλυση των τροχιών. Κοιτάξτε ξανά τη σχέση για συγκεκριμένη μηχανική ενέργεια,  $E$ . Σημειώστε ότι το  $E$  εξαρτάται μόνο από τη θέση, την ταχύτητα  $R$ , την ταχύτητα  $V$  και την τοπική βαρυτική παράμετρο. Αυτό σημαίνει ότι αν γνωρίζουμε τη θέση και την ταχύτητα ενός διαστημικού οχήματος σε οποιοδήποτε σημείο της τροχιάς του, γνωρίζουμε τη συγκεκριμένη μηχανική του ενέργεια για κάθε σημείο της τροχιάς του.



**Σχήμα 106: Μετατροπή Ενέργειας κατά την διάρκεια τροχιάς δορυφόρου, όπου το άθροισμα μένει σταθερό.**

Μια άλλη σημαντική έννοια για να ξεφύγουμε από αυτή της τροχιακής ενέργειας είναι η σχέση μεταξύ  $R$  και  $V$ . Ας υποθέσουμε ότι γνωρίζουμε την ενέργεια για μια τροχιά. Έτσι, σε οποιαδήποτε δεδομένη θέση,  $R$ , σε αυτή την τροχιά, υπάρχει μόνο μία δυνατή ταχύτητα,  $V$ ! Έτσι, εάν γνωρίζουμε την τροχιακή ενέργεια και το  $R$ , μπορούμε εύκολα να βρούμε την ταχύτητα σε αυτό το σημείο. Με μια απλή αναδιάταξη της σχέσης για την ενέργεια παίρνουμε μια εξαιρετικά χρήσιμη έκφραση για την ταχύτητα:

$$V = \sqrt{2\left(\frac{\mu}{R} + \varepsilon\right)} \quad (7-26)$$

όπου

$\varepsilon$ : ειδική μηχανική ενέργεια του διαστημικού σκάφους ( $\text{km}^2/\text{s}^2$ )

$V$ : γραμμική ταχύτητα διαστημικού σκάφους ( $\text{km/s}$ )

$\mu$ : βαρυτική παράμετρος ( $\text{km}^3/\text{s}^3$ )= $3.98 \times 10^5 \text{ km}^3/\text{s}^2$  για τη Γη

$R$ : μέτρο του διανύσματος θέσης του διαστημικού σκάφους ( $\text{km}$ )

Χρησιμοποιούμε συχνά αυτή την εξίσωση για τον προσδιορισμό των ταχυτήτων κατά την ανάλυση των τροχιών. Για παράδειγμα, κατά τη διάρκεια διαστημικών αποστολών πρέπει συχνά να μεταφέρουμε διαστημικά σκάφη από μια τροχιά σε μια άλλη. Μπορούμε να χρησιμοποιήσουμε αυτή τη σχέση για να καθορίσουμε πόσο πρέπει να αλλάξουμε την ταχύτητα για να "οδηγηθούμε" στη νέα τροχιά. Από τη συζήτησή μας για τις κωνικές τομές, θυμόμαστε ότι μια παράμετρος αντιπροσωπεύει τη μέση απόσταση

του διαστημικού σκάφους από την κύρια εστία. Αυτή η παράμετρος είναι ο μεγάλος ημιάξονας  $a$ . Μπορούμε να αναπτύξουμε μια νέα σχέση για την ειδική μηχανική ενέργεια η οποία εξαρτάται μόνο από  $a$  και το  $\mu$ .)

$$\varepsilon = -\frac{\mu}{2a} \quad (7-27)$$

όπου

$\varepsilon$ : ειδική μηχανική ενέργεια του διαστημικού σκάφους ( $\text{km}^2/\text{s}^2$ )

$\mu$ : βαρυτική παράμετρος ( $\text{km}^3/\text{s}^3$ )= $3.98 \times 10^5 \text{ km}^3/\text{s}^2$  για τη Γη

$a$ : μεγάλος ημιάξονας (km)

Αυτό σημαίνει ότι γνωρίζοντας απλώς τον μεγάλο ημιάξονα της τροχιάς ενός διαστημικού σκάφους μπορούμε να υπολογίσουμε την ειδική μηχανική του ενέργεια. Μπορούμε επίσης να μάθουμε τον τύπο της τροχιάς από το πρόσημο της ειδικής μηχανικής ενέργειας,  $\varepsilon$ . Για μια κυκλική ή ελλειπτική τροχιά, το  $\varepsilon$  είναι αρνητικό (επειδή το  $a$  είναι θετικό). Για μια παραβολή,  $\varepsilon = 0$  (επειδή  $a = \infty$ ). Για μια υπερβολή, το  $\varepsilon$  είναι θετικό (επειδή το  $a$  είναι αρνητικό).

Ένα άλλο όφελος αν γνωρίζουμε την ενέργεια είναι ότι μπορούμε να καθορίσουμε την τροχιακή περίοδο. Η τροχιακή περίοδος,  $P$ , είναι ο χρόνος που χρειάζεται ένα διαστημικό σκάφος για να ολοκληρώσει μια πλήρη περιστροφή γύρω από την τροχιά του. Από τον Τρίτο Νόμο της Πλανητικής Κίνησης του Κέπλερ, το  $P^2$  είναι ανάλογο του  $a^3$ , όπου " $a$ " είναι ο μεγάλος ημιάξονας. Χρησιμοποιώντας αυτή τη σχέση, μπορούμε να καταλήξουμε σε μια έκφραση για την τροχιακή περίοδο

$$P = 2\pi \sqrt{\frac{a^3}{\mu}} \quad (7-28)$$

Όπου

$P$ : περίοδος (seconds)

$\pi$ : 3.14159 (αδιάστατο)

$\mu$ : βαρυτική παράμετρος ( $\text{km}^3/\text{s}^3$ )= $3.98 \times 10^5 \text{ km}^3/\text{s}^2$  για τη Γη

$a$ : μεγάλος ημιάξονας (km)

Η ενέργεια  $\varepsilon$  μας αποκαλύπτει μόνο κάποιες πληροφορίες. Μας λέει το μέγεθος της τροχιάς, αλλά δεν μας λέει τίποτα για το πού βρίσκεται η τροχιά στο διάστημα. Για να κατανοήσουμε αυτό το σημαντικό κομμάτι πληροφορίας, πρέπει να εξετάσουμε την ειδική γωνιακή ορμή.

### Ειδική γωνιακή ορμή

Θυμηθείτε ότι μπορούμε να βρούμε την γωνιακή ορμή από την Εξίσωση (3-3):

$$\vec{H} = \vec{R} \times m\vec{V}$$

Για να απλοποιήσουμε τη ζωή μας, διαιρούμε τις δύο πλευρές της εξίσωσης με τη μάζα  $m$  του αντικειμένου που ερευνούμε. Έτσι, ορίζουμε την ειδική γωνιακή ορμή,  $\vec{h}$  ως:

$$\vec{h} \equiv \frac{\vec{H}}{m}$$

ή

$$\vec{h} \equiv \vec{R} \times \vec{V} \quad (7-29)$$

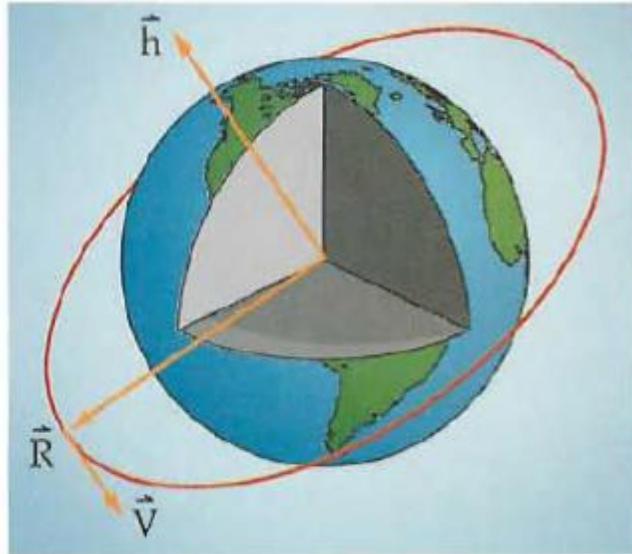
Όπου

$\vec{h}$ : διάνυσμα ειδικής γωνιακής ορμής του διαστημικού σκάφους (km)

$\vec{R}$ : διάνυσμα θέσης του διαστημικού σκάφους (km)

$\vec{V}$ : διάνυσμα ταχύτητας του διαστημικού σκάφους (km/s)

Παρατηρήστε ότι η ειδική γωνιακή ορμή είναι το εξωτερικό γινόμενο της θέσης και της ταχύτητας. Από τη γεωμετρία γνωρίζουμε ότι δύο γραμμές ορίζουν ένα επίπεδο. Έτσι στην περίπτωση αυτή, τα  $\vec{R}$  και  $\vec{V}$  είναι δύο γραμμές (διανύσματα με μέτρο και κατεύθυνση) που ορίζουν ένα επίπεδο. Ονομάζουμε αυτό το επίπεδο που περιέχει τα  $\vec{R}$  και  $\vec{V}$ , ως τροχιακό επίπεδο. Επειδή το εξωτερικό γινόμενο οποιωνδήποτε δύο διανυσμάτων ισούται με ένα τρίτο διάνυσμα κάθετο στα δύο πρώτα, το διάνυσμα γωνιακής ορμής  $\vec{h}$  πρέπει να είναι κάθετος προς τα  $\vec{R}$  και  $\vec{V}$ .

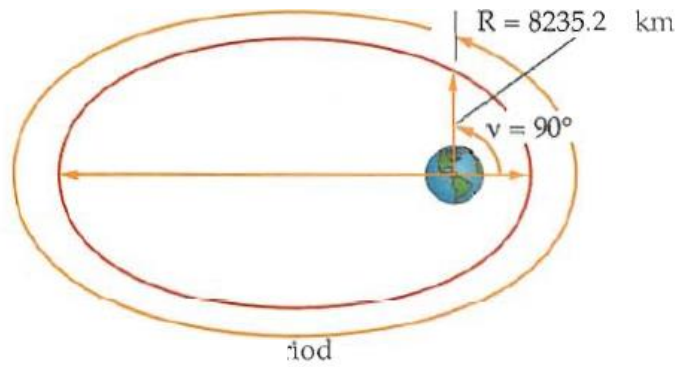


**Σχήμα 107: Ειδική Γωνιακή Ορμή/Στροφορμή**

Το σχήμα 107 δείχνει τα  $\vec{h}$ ,  $\vec{R}$  και  $\vec{V}$ . Εδώ πρέπει να εξετάσουμε τη λογική συνέπεια όσων αναφέραμε έως αυτό το σημείο. Πρώτα απ' όλα, όπως είδαμε, η γωνιακή ορμή και, συνεπώς, η ειδική γωνιακή ορμή είναι σταθερές σε μέγεθος και κατεύθυνση. Δεύτερον, τα  $\vec{R}$  και  $\vec{V}$  ορίζουν το τροχιακό επίπεδο. Στη συνέχεια, το  $\vec{h}$  είναι κάθετο στο τροχιακό επίπεδο. Επομένως, εάν είναι πάντα κάθετο στο τροχιακό επίπεδο και είναι σταθερό, το τροχιακό επίπεδο πρέπει επίσης να είναι σταθερό. Αυτό σημαίνει ότι στο περιορισμένο πρόβλημα δύο σωμάτων το τροχιακό επίπεδο παραμένει για πάντα ίδιο στον αδρανειακό χώρο! Ωστόσο, στην πραγματικότητα, όπως θα δούμε αργότερα, μικρές διαταραχές αναγκάζουν το τροχιακό επίπεδο να μεταβληθεί βαθμιαία με την πάροδο του χρόνου.

### Παράδειγμα 7-3

Ποια η ταχύτητα του δορυφόρου τηλεπαρατήρησης του παραδείγματος 7-2 όταν η αληθής ανωμαλία είναι  $90^\circ$ . Πόσος χρόνος χρειάζεται για να γυρίσει ο δορυφόρος στο ίδιο σημείο;



- 1) Βρίσκουμε την ειδική μηχανική ενέργεια

$$\epsilon = -\frac{\mu}{2a} = \frac{-3.986 \times 10^5 \frac{\text{km}^3}{\text{s}^2}}{2(8500 \text{ km})} = -23.45 \frac{\text{km}^2}{\text{s}^2}$$

- 2) Βρίσκουμε την ταχύτητα

$$\begin{aligned} V &= \sqrt{2\left(\frac{\mu}{R} + \epsilon\right)} \\ &= \sqrt{2\left(\frac{3.986 \times 10^5 \frac{\text{km}^3}{\text{s}^2}}{8235.2 \text{ km}} - 23.45 \frac{\text{km}^2}{\text{s}^2}\right)} \\ &= 7.065 \frac{\text{km}}{\text{s}} \end{aligned}$$

- 3) Βρίσκουμε την περίοδο

$$\begin{aligned} P &= 2\pi\sqrt{\frac{a^3}{\mu}} = 2\pi\sqrt{\frac{(8500 \text{ km})^3}{3.986 \times 10^5 \frac{\text{km}^3}{\text{s}^2}}} \\ &= 7799 \text{ seconds} \\ &\approx 130 \text{ minutes} \end{aligned}$$

### 7.10 Περιγραφή Τροχιών

Στην προηγούμενη ενότητα εξετάσαμε το πρόβλημα δύο σωμάτων (Γης-δορυφόρου) και αναπτύξαμε μια εξίσωση κίνησης για να περιγράψουμε με αυστηρούς μαθηματικούς όρους, πως ένα διαστημικό σκάφος κινείται στο διάστημα. Πολλές φορές δεν αρκεί να δημιουργηθεί ένας κατάλογος αριθμών που δείχνει τη θέση και την ταχύτητα του διαστημικού οχήματος στον αδρανειακό χώρο. Συχνά, θέλουμε να απεικονίζουμε την τροχιά του σε σχέση με τη Γη. Για παράδειγμα, μπορεί να θέλουμε να μάθουμε πότε ένα διαστημικό σκάφος τηλεπισκόπησης θα είναι πάνω από μια πληγείσα από πλημμύρες περιοχή (Εικόνα 108).



**Σχήμα 108:** Δορυφορική εικόνα από τον δορυφόρο τηλεπαρατήρησης Sentinel-2 απεικονίζει τις πλημμύρες της Κινέτας τον Νοέμβριο του 2019 και ύστερα από τις μεγάλες πυρκαγιές του καλοκαιριού του 2018

Σε αυτήν την ενότητα, θα διερευνήσουμε δύο σημαντικά εργαλεία που θα μας βοηθήσουν να «δούμε» την κίνηση των διαστημοπλοίων - τα κλασικά τροχιακά στοιχεία (ΚΤΣ) ή κεπλέρια στοιχεία και το τροχιακό ίχνος. Θα μπορείτε να χρησιμοποιήσετε τα ΚΤΣ για να απεικονίζετε πώς είναι μια τροχιά στο διάστημα. Το τροχιακό ίχνος θα σας επιτρέψει να καθορίζετε πότε θα περάσουν ορισμένα μέρη της Γης στο οπτικό πεδίο ενός διαστημικού σκάφους και πότε ένας παρατηρητής στη Γη μπορεί να δει το διαστημικό σκάφος.

#### Τροχιακά στοιχεία

Εάν πετάτε ένα αεροπλάνο και οι ελεγκτές εδάφους σας ρωτήσουν που βρίσκεστε και πού πηγαίνετε, πρέπει να τους πείτε τα εξής έξι πράγματα που αφορούν στο αεροπλάνο σας:

- Γεωγραφικό πλάτος
- Γεωγραφικό μήκος

- Υψόμετρο
- Οριζόντια ταχύτητα
- Προσανατολισμός (δηλαδή βόρεια, νότια, κ.λπ.)
- Κάθετη ταχύτητα (αύξουσα ή φθίνουσα)

Γνωρίζοντας αυτά τα πράγματα, οι ελεγκτές μπορούν στη συνέχεια να προβλέψουν τη μελλοντική σας θέση. Οι ελεγκτές διαστημικών αποστολών κάνουν κάτι παρόμοιο, εκτός από το ότι δεν ρωτούν που βρίσκεται ένα διαστημικό σκάφος. Αντίθετα, χρησιμοποιούν ραντάρ σε συγκεκριμένες τοποθεσίες παρακολούθησης για να μετρήσουν την τρέχουσα θέση,  $R$  και την ταχύτητα  $V$ . Όπως θα δούμε αργότερα, αυτές οι πληροφορίες τους βοηθούν να προβλέψουν τη μελλοντική θέση και ταχύτητα του διαστημικού οχήματος. Παρατηρήστε ότι η θέση,  $R$ , και η ταχύτητα,  $V$ , είναι διανύσματα. Δυστυχώς, σε αντίθεση με το γεωγραφικό πλάτος και το γεωγραφικό μήκος που χρησιμοποιούνται για τα αεροσκάφη, τα  $R$  και  $V$  δεν είναι πολύ χρήσιμα στην απεικόνιση της τροχιάς ενός διαστημικού σκάφους. Για παράδειγμα υποθέστε ότι γνωρίζετε την τρέχουσα θέση και ταχύτητα ενός διαστημικού σκάφους:

$$\vec{R} = 10000\vec{I} + 8000\vec{J} - 7000\vec{K} \text{ km}$$

$$\vec{V} = 4.4\vec{I} + 3.1\vec{J} - 2.7\vec{K} \text{ km/s}$$

Τι θα μπορούσατε να συμπεράνετε για το μέγεθος και το σχήμα της τροχιάς ή τη θέση του διαστημικού σκάφους; Με τα εργαλεία που έχετε μάθει, το μόνο που μπορείτε να κάνετε είναι να σχεδιάσετε το  $R$  και το  $V$  σε ένα τρισδιάστατο σύστημα συντεταγμένων και να προσπαθήσετε να απεικονίσετε την τροχιά. Ευτυχώς, υπάρχει ένας ευκολότερος τρόπος. Εκατοντάδες χρόνια πριν, ο Johannes Kepler ανέπτυξε μια μέθοδο περιγραφής των τροχιών που μας επιτρέπει να απεικονίσουμε το μέγεθος, το σχήμα και τον προσανατολισμό τους, καθώς και τη θέση του διαστημοπλοίου μέσα σε αυτές. Επειδή εξακολουθούμε να χρειαζόμαστε έξι μεταβλητές για να περιγράψουμε μια τροχιά και τη θέση του διαστημικού σκάφους σε αυτήν, ο Kepler όρισε έξι τροχιακά στοιχεία. Ονομάζονται κλασικά τροχιακά στοιχεία (ΚΤΣ) και θα τα χρησιμοποιήσουμε για να βρούμε τα τέσσερα εξής πράγματα:

- Το τροχιακό μέγεθος, (τροχιακό στοιχείο: μεγάλος ημιάξονας  $a$ )
- Το τροχιακό σχήμα, (τροχιακό στοιχείο: εκκεντρότητα  $e$ )
- Προσανατολισμός του τροχιακού επιπέδου στο διάστημα,
  - (τροχιακό στοιχείο: κλίση τροχιάς  $i$ )
  - (τροχιακό στοιχείο: Ορθή άνοδος ανοδικού κόμβου  $\Omega$ )
- Τον προσανατολισμό της τροχιάς στο επίπεδο (τροχιακό στοιχείο: όρισμα του περιγείου  $\omega$ ) και τέλος
- Τη θέση του διαστημικού σκάφους στην τροχιά (τροχιακό στοιχείο: Αληθής ανωμαλία  $v$ ).

Ας εξετάσουμε αυτά τα στοιχεία για να δούμε πως συμβάλλει το καθένα στην κατανόηση των τροχιών

### 7.10.1 Καθορισμός των κλασικών τροχιακών στοιχείων (ΚΤΣ)

Ας ξεκινήσουμε με το μέγεθος του τροχιάς. Στην προηγούμενη ενότητα συσχετίσαμε το μέγεθος μιας τροχιάς με τη ειδική μηχανική της ενέργεια χρησιμοποιώντας τη σχέση:

$$\varepsilon = -\frac{\mu}{2a} \quad (7-30)$$

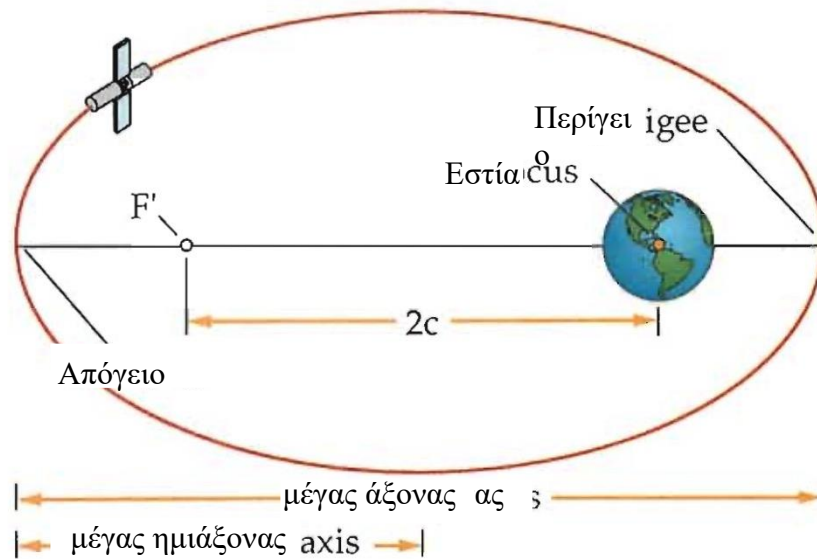
όπου

$\varepsilon$ : ειδική μηχανική ενέργεια του διαστημικού σκάφους ( $\text{km}^2/\text{s}^2$ )

$\mu$ : βαρυτική παράμετρος ( $\text{km}^3/\text{s}^3$ )= $3.98 \times 10^5 \text{ km}^3/\text{s}^2$  για τη Γη

$a$ : μεγάλος ημιάξονας (km)

Ο μεγάλος ημιάξονας,  $a$ , ισούται με το μισό του μεγάλου άξονα της τροχιάς, όπως φαίνεται στο παρακάτω σχήμα, και το θεωρούμε το πρώτο τροχιακό στοιχείο.

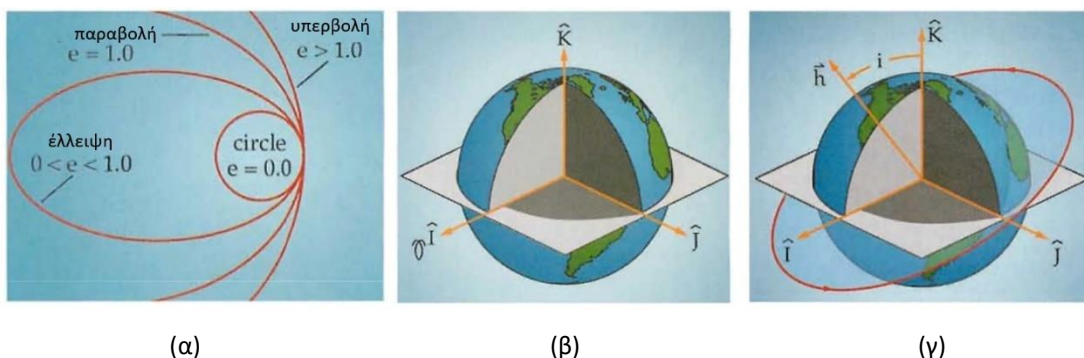


**Σχήμα 109: Ημιάξονας της Ελλειπτικής Τροχιάς**

Η εκκεντρότητα προσδιορίζει το σχήμα μιας τροχιάς εξετάζοντας την λόγο της απόστασης μεταξύ των δύο εστιών και του μήκους του κύριου άξονα.

$$e = \frac{2c}{2a} \tag{7-31}$$

Στην προηγούμενη ενότητα μάθαμε ότι επειδή η ειδική γωνιακή ορμή διατηρείται σταθερή, ένα τροχιακό επίπεδο παραμένει ακίνητο στον αδρανειακό χώρο. Για να περιγράψουμε τον προσανατολισμό του, αναφερόμαστε σε ένα αδρανειακό σύστημα συντεταγμένων - το γεωκεντρικό-ισημερινό σύστημα συντεταγμένων, που φαίνεται στο Σχήμα 110. Η πρώτη γωνία που χρησιμοποιούμε για να περιγράψουμε τον προσανατολισμό μιας τροχιάς σε σχέση με το σύστημα συντεταγμένων μας είναι κλίση,  $i$ . Η κλίση περιγράφει την κλίση του τροχιακού επιπέδου σε σχέση με το θεμελιώδες επίπεδο (το επίπεδο του ισημερινού σε αυτή την περίπτωση). Θα μπορούσαμε να περιγράψουμε αυτή την κλίση ως τη γωνία μεταξύ των δύο επιπέδων, αλλά αυτό είναι πιο δύσκολο να γίνει μαθηματικά. Αντίθετα, ορίζουμε την κλίση ως τη γωνία μεταξύ δύο διανυσμάτων. Το πρώτο είναι κάθετο στο το τροχιακό επίπεδο και συμβολίζεται με  $\vec{h}$  (διάνυσμα της ειδικής γωνιακής ορμής) ενώ το δεύτερο είναι κάθετο στο επίπεδο του ισημερινού,  $\vec{K}$ , όπως φαίνεται στο σχήμα 110γ. Η κλίση έχει εύρος τιμών από  $0^\circ$  έως  $180^\circ$ .

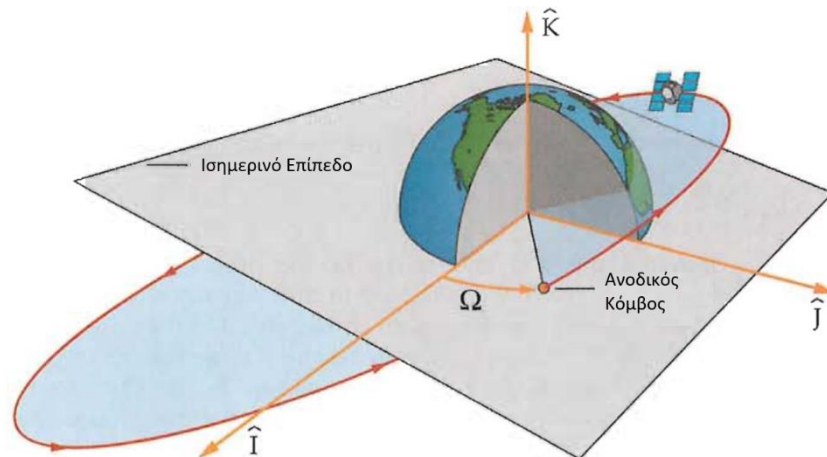


**Σχήμα 110: (α) Η εκκεντρότητα καθορίζει το σχήμα της τροχιάς (β) Το γεωκεντρικό-ισημερινό σύστημα συντεταγμένων (γ) Κλίση ή Έγκλιση Τροχιάς,  $i$**

Χρησιμοποιούμε την κλίση για να ορίσουμε διάφορα είδη τροχιάς. Για παράδειγμα, μια τροχιά γύρω από τη Γη με κλίση  $0^\circ$  ή  $180^\circ$  αποτελεί μια ισημερινή τροχιά, επειδή παραμένει πάνω στον ισημερινό. Αν η τροχιά έχει  $i = 90^\circ$ , την ονομάζουμε πολική τροχιά επειδή περνά ακριβώς πάνω από τους δύο πόλους. Χρησιμοποιούμε επίσης την τιμή της κλίσης για να διακρίνουμε δύο μεγάλες κατηγορίες τροχιών. Αν  $0^\circ < i < 90^\circ$ , το διαστημικό σκάφος κινείται με την περιστροφή της γης (σε ανατολική κατεύθυνση) και τότε λέμε ότι το διαστημικό σκάφος βρίσκεται σε ορθή τροχιά. Εάν το διαστημικό σκάφος βρίσκεται σε τροχιά με κλίση  $90^\circ < i < 180^\circ$ , τότε κινείται αντίθετα από την περιστροφή της Γης (σε δυτική κατεύθυνση) και η τροχιά αυτή ονομάζεται οπισθοδρομική/ανάδρομη. Ο Πίνακας 2 συνοψίζει αυτές τις τροχιές.

Έτσι, η κλίση είναι το τρίτο τροχιακό στοιχείο. Καθορίζει την κλίση του τροχιακού επιπέδου σε σχέση με το θεμελιώδες επίπεδο και μας βοηθά να κατανοήσουμε τον προσανατολισμό της τροχιάς σε σχέση με τον ισημερινό.


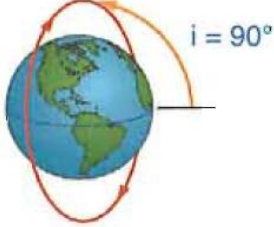


Το τέταρτο τροχιακό στοιχείο είναι μια άλλη γωνία, η ορθή άνοδος του ανοδικού κόμβου  $\Omega$ , που χρησιμοποιείται για να περιγράψει τον τροχιακό προσανατολισμό σε σχέση με την κύρια κατεύθυνση,  $I$ . Η ορθή άνοδος του ανοδικού κόμβου (RAAN) είναι μία γωνία, μετρούμενη από το κέντρο της Γης, από το σημείο εαρινής ισημερίας (Vernal Equinox) μέχρι το ανοδικό κόμβο (Ascending Node). Ο ανοδικός κόμβος είναι το σημείο του επιπέδου του ισημερινού από το οποίο περνά ένας δορυφόρος κινούμενος από νότο προς βορά. Αντίστοιχα, ο καθοδικός κόμβος είναι το σημείο του επιπέδου του ισημερινού από το οποίο περνά ο δορυφόρος κινούμενος από βορά προς νότο. Ο ανοδικός και το καθοδικός κόμβος ορίζουν μία ευθεία, η οποία είναι η τομή του επιπέδου της τροχιάς με το ισημερινό επίπεδο.



**Σχήμα 111: Το τέταρτο τροχιακό στοιχείο - ορθή άνοδος του ανοδικού κόμβου (RAAN)**

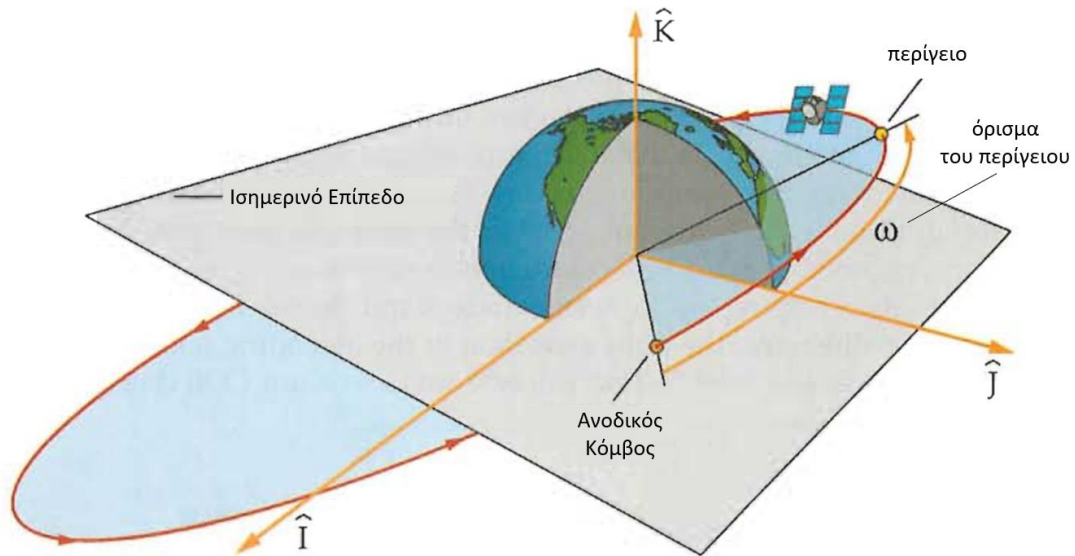
Κατά σύμβαση, η γωνία  $\Omega$  είναι ένας αριθμός που εκτείνεται από τις  $0^\circ$  μέχρι τις  $360^\circ$ . Ας δώσουμε ένα παράδειγμα για να εξηγήσουμε αυτό το τροχιακό στοιχείο: Τραβάμε μία γραμμή από το κέντρο της Γης μέχρι το σημείο απ' όπου ο δορυφόρος μας διασχίζει τον ισημερινό (από νότο προς βορά). Αν αυτή η γραμμή δείχνει απευθείας την εαρινή ισημερία, τότε  $\Omega=0^\circ$ . Αντίστοιχα, αν αυτή η γραμμή είναι διαμετρικά αντίθετη της εαρινής ισημερίας, τότε  $\Omega=180^\circ$ .



Κλίση	Τύπος Τροχιάς	Σχήμα
$0^\circ$ ή $180^\circ$	Ισημερινού	
$90^\circ$	Πολική	
$0^\circ \leq i < 90^\circ$	Ορθή (με τη φορά της Γης)	 Ανοδικός κόμβος
$90^\circ < i \leq 180^\circ$	Ανάδρομη (αντίθετη με την φορά της Γης)	 Καθοδικός κόμβος

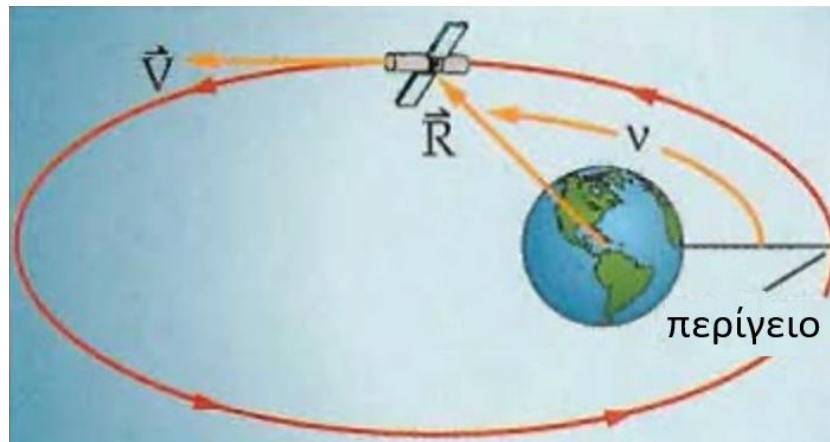
**Πίνακας 2: Τύποι Τροχιών και η Κλίση τους**

Ας ανακεφαλαιώσουμε που είμαστε. Γνωρίζουμε τώρα το μέγεθος της τροχιάς, το σχήμα της, την κλίση της, το  $i$  και την γωνία  $\Omega$ . Δεν γνωρίζουμε όμως πως η τροχιά είναι προσανατολισμένη στο επίπεδο. Για παράδειγμα, για μια ελλειπτική τροχιά, ίσως να θέλουμε να μάθουμε αν το περίγειο (το σημείο που βρίσκεται πιο κοντά στη Γη) βρίσκεται στο βόρειο ή το νότιο ημισφαίριο. Αυτό είναι σημαντικό αν θέλουμε να τραβήξουμε φωτογραφίες υψηλής ανάλυσης ενός συγκεκριμένου σημείου. Επομένως, χρησιμοποιούμε το πέμπτο τροχιακό στοιχείο, το όρισμα του περιγείου  $\omega$ . Το όρισμα του περιγείου  $\omega$  είναι η γωνία από την ορθή άνοδος του ανοδικού κόμβου μέχρι το περίγειο. Η γωνία μετράτε στο επίπεδο της τροχιάς και προς την κατεύθυνση της κίνησης. Για παράδειγμα, όταν  $\omega = 0$  μοίρες, το περίγειο βρίσκεται στην ίδια θέση με το ανοδικό κόμβο. Αυτό σημαίνει ότι ο δορυφόρος θα βρίσκεται κοντύτερα στη γη την ίδια στιγμή που θα διασχίζει τον ισημερινό. Όταν  $\omega = 180$  μοίρες, το απόγειο θα βρίσκεται στην ίδια θέση με το καθοδικό κόμβο. Αυτό σημαίνει ότι ο δορυφόρος θα βρίσκεται μακρύτερα από τη Γη την ίδια στιγμή που θα διασχίζει τον ισημερινό. Πολλές φορές, στην ξενόγλωσση βιβλιογραφία, το όρισμα του περιγείου απαντάται και με το γράμμα  $w$ .



Σχήμα 112: Το πέμπτο τροχιακό στοιχείο, το όρισμα του περιγείου  $\omega$

Αφού καθορίσαμε το μέγεθος και το σχήμα της τροχιάς, μαζί με τον προσανατολισμό της (κλίση και  $\Omega$ ), πρέπει ακόμα να βρούμε τη θέση του διαστημοπλοίου μέσα στην τροχιά. Όπως έχουμε δει ήδη, μπορούμε να τη βρούμε χρησιμοποιώντας την αληθής ανωμαλία. Η αληθής ανωμαλία,  $\nu$  είναι η πραγματική γωνία κατά την οποία μετακινήθηκε ένας δορυφόρος από την τελευταία φορά που πέρασε από το περίγειο.



Σχήμα 113: Η αληθής ανωμαλία,  $\nu$

Ισούται με τη μέση ανωμαλία μόνο κατά το περίγειο και το απόγειο για τις ελλειπτικές τροχίες, ενώ για τις κυκλικές τροχίες τα δύο αυτά στοιχεία ταυτίζονται. Από όλα τα τροχιακά στοιχεία, μόνο η πραγματική ανωμαλία αλλάζει με το χρόνο καθώς το διαστημικό σκάφος κινείται στην τροχιά του. Ο Πίνακας 3 συνοψίζει και τα έξι τροχιακά στοιχεία.

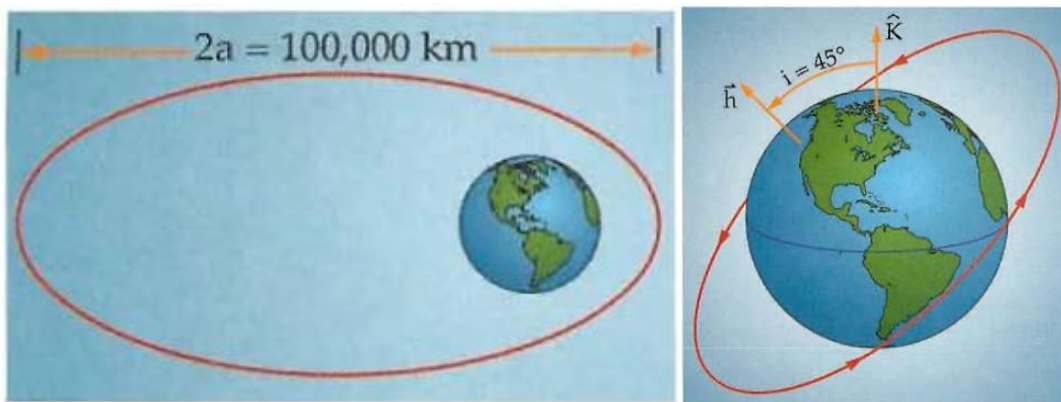
Στοιχείο	Όνομα	Χαρακτηριστικά	Τιμές (Όρια)
a	Ημιάξονας	Μέγεθος	Διάφορες
e	Εκκεντρότητα	Σχήμα της τροχιάς	e=0, κύκλος 0 < e < 1, έλλειψη
i	Κλίση ή έγκλιση	Κλίση, η γωνία μεταξύ του διανύσματος της ειδικής στροφορμής, $\vec{h}$ , με την κάθετο στο επίπεδο του ισημερινού, $\vec{K}$	0 ≤ i ≤ 180°
Ω	ορθή άνοδος του ανοδικού κόμβου	Η γωνία μεταξύ του σημείου εαρινής ισημερίας (Vernal Equinox) και του ανοδικού κόμβου	0 ≤ Ω ≤ 360°
ω	όρισμα του περιγείου	Η γωνία από την ορθή άνοδος του ανοδικού κόμβου μέχρι το περίγειο	0 ≤ ω ≤ 360°
ν	αληθής ανωμαλία	Η γωνία μεταξύ της θέσης του δορυφόρου μέχρι το περίγειο	0 ≤ ν ≤ 360°

**Πίνακας 3: Σύνοψη Κλασικών Τροχιακών Στοιχείων**

Ας δούμε ένα παράδειγμα για να δούμε πώς μπορούν τα τροχιακά στοιχεία να μας βοηθήσουν να απεικονίσουμε μια τροχιά. Ας υποθέσουμε ότι ένας δορυφόρος επικοινωνίας έχει τα ακόλουθα τροχιακά στοιχεία

- Μεγάλος ημιάξονας, a = 50.000 χλμ.
- Εκκεντρικότητα, e = 0.4
- Κλίση, i = 45°
- Ορθή άνοδος του ανοδικού κόμβου, Ω = 50°
- Όρισμα του περιγείου, ω=110°
- Αληθής ανωμαλία, ν = 170°

Όπως φαίνεται στο Σχήμα 114, μπορούμε να σχεδιάσουμε το μέγεθος και το σχήμα της τροχιάς, δεδομένου του μεγάλου ημιάξονα και της εκκεντρότητας. Η εκκεντρότητα 0.4 δείχνει μια ελλειπτική τροχιά (είναι μεταξύ 0 και 1).



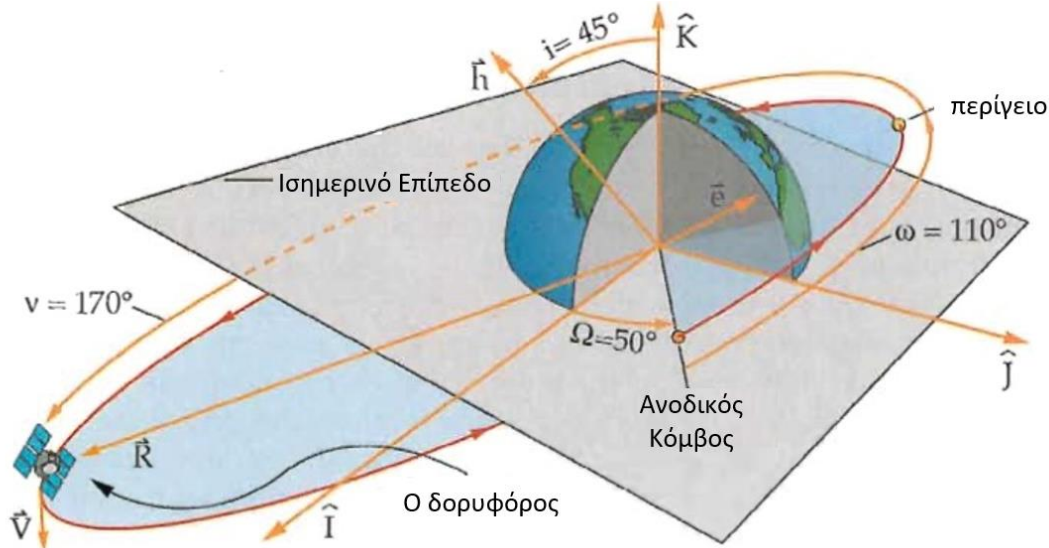
**Σχήμα 114: (Αριστερά) Μέγεθος και Σχήμα Τροχιάς (Δεξιά) Κλίση της τροχιάς 45°**

Ο μεγάλος ημιάξονας των 50.000 χλμ. μας λέει πόσο μεγάλη είναι η τροχιά. Τώρα που βλέπουμε την τροχιά σε δύο διαστάσεις, μπορούμε να χρησιμοποιήσουμε τα άλλα τροχιακά στοιχεία για να απεικονίσουμε πώς είναι προσανατολισμένη η τροχιά σε τρεις διαστάσεις. Επειδή η γωνία κλίσης είναι 45°, γνωρίζουμε ότι το τροχιακό επίπεδο γέρνει 45° από τον ισημερινό. Μπορούμε επίσης να

περιγράψουμε την κλίση ως γωνία μεταξύ του διανύσματος της ειδικής γωνιακής ορμής,  $\vec{h}$ , και του  $\vec{K}$  στο γεωκεντρικό-ισημερινό σύστημα συντεταγμένων. Έτσι μπορούμε να σχεδιάσουμε την τομή των δύο επιπέδων σε τρεις διαστάσεις όπως στο Σχήμα 110γ. Στη συνέχεια, για να βρούμε την περιστροφή του τροχιακού επιπέδου σε σχέση με την κύρια κατεύθυνση, χρησιμοποιούμε ορθή γωνία ανοδικού ισημερινού σημείου  $\Omega$ . Αφού εντοπίσουμε την κύρια κατεύθυνση στο ισημερινό επίπεδο,  $\vec{I}$ , περιστρέφουμε το τροχιακό επίπεδο τοποθετώντας το ανοδικό ισημερινό σημείο  $50^\circ$  ανατολικά του φορέα  $\vec{I}$ . Αυτά που γνωρίζουμε μέχρι στιγμής μας φαίνονται στο Σχήμα 115.

Έτσι, έχουμε καθορίσει πλήρως το μέγεθος και το σχήμα της τροχιάς, καθώς και τον προσανατολισμό του τροχιακού επιπέδου στο διάστημα. Στη συνέχεια, με το όρισμα του περιγείου,  $\omega$ , εντοπίζουμε το περίγειο στο τροχιακό επίπεδο. Έτσι, περιστρέφουμε το περίγειο  $110^\circ$  από το ανοδικό ισημερινό σημείο, προς την κατεύθυνση της κίνησης του διαστημικού σκάφους. Το σχήμα 115 δείχνει την τροχιά στο τροχιακό επίπεδο μετά την περιστροφή του περιγείου.

Τέλος, για να εντοπίσουμε το διαστημικό σκάφος μας στην τροχιά χρησιμοποιούμε την τιμή της αληθούς ανωμαλίας,  $v$ . Μετράμε  $170^\circ$  προς την κατεύθυνση της κίνησης του διαστημικού σκάφους από το περίγειο. Εκεί βρίσκεται το διαστημικό μας σκάφος όπως φαίνεται στο Σχήμα 115.



**Σχήμα 115: Βρίσκοντας την τροχιά. Η θέση του δορυφόρου μέσω των ΚΣΤ:  $a = 50000$  km,  $i = 45^\circ$ ,  $e = 0.4$ ,  $\Omega = 50^\circ$ ,  $\omega = 110^\circ$ ,  $v = 170^\circ$**

Όπως ήδη γνωρίζουμε, διάφορες αποστολές απαιτούν διαφορετικές τροχιές. Ο Πίνακας 4 παρουσιάζει διάφορους τύπους αποστολών και τις τυπικές τροχιές τους. Μια γεωστατική τροχιά είναι μια κυκλική τροχιά με περίοδο περίπου 24 ώρες και κλίση  $0^\circ$ . Οι γεωστατικές τροχιές είναι ιδιαίτερα χρήσιμες για τους δορυφόρους επικοινωνίας, επειδή ένα διαστημικό σκάφος σε αυτήν την τροχιά φαίνεται ακίνητο σε έναν παρατηρητή με βάση τη Γη, όπως ένας σταθερός επίγειος σταθμός για μια εταιρεία καλωδιακής τηλεόρασης. Οι γεωσύγχρονες τροχιές είναι κεκλιμένες τροχιές με περίοδο περίπου 24 ώρες. Μια ημι-σύγχρονη τροχιά έχει περίοδο ίση με 12 ώρες. Οι ηλιοσύγχρονες τροχιές είναι ανάδρομες, χαμηλής γήινης τροχιάς (LEO) που συνήθως έχουν κλίση  $95^\circ$  έως  $105^\circ$  και συχνά χρησιμοποιούνται για αποστολές τηλεπισκόπησης επειδή περνούν πάνω από σχεδόν κάθε σημείο της επιφάνειας της Γης. Μια τροχιά Molniya είναι μια ημι-σύγχρονη, έκκεντρη τροχιά που χρησιμοποιείται για συγκεκριμένες αποστολές επικοινωνίας.

Αποστολή	Τροχιά	Ημιάξονας	Περίοδος	Κλίση	Εκκεντρότητα
Τηλεπικοινωνίες Έγκαιρη προειδοποίηση Ανίχνευση Πυρηνικών	Γεωστατική	42158 km (35780 km)	~24 hr	~0°	e = 0
Τηλεπαρατήρηση	Ηλιοσύγχρονη	~6500-7300 km (~150-900 km)	~90 min	~90°	e = 0
Πλοήγηση/GPS	Ημι-ηλιοσύγχρονη	26610 km (20232 km)	12 hr	55°	e = 0
Επανδρωμένα οχήματα	Χαμηλή γήινη τροχιά	~6700 km (~300 km)	~90 min	28.5°~57°	e = 0
Τηλεπικοινωνίες/ Παρακολούθηση	Μολνίγια	26571 km (R <sub>p</sub> =7971 km, R <sub>a</sub> =45170 km)	12 hr	63.4°	ω = 270° e = 0.7

Πίνακας 4: Στοιχεία Τροχιάς για Διαστημικές Αποστολές

### 7.10.2 Υπολογίζοντας τα Τροχιακά Στοιχεία

Σε αυτήν την ενότητα θα μάθετε να προσδιορίζετε όλα τα τροχιακά στοιχεία δεδομένης της θέσης  $\vec{R}$  και της ταχύτητας  $\vec{V}$  ενός διαστημικού σκάφους μια συγκεκριμένη χρονική στιγμή.

#### Υπολογίζοντας τον μεγάλο ημιάξονα, $a$

Ο μεγάλος ημιάξονας  $a$  μας δείχνει το μέγεθος της τροχιάς και εξαρτάται από την ειδική μηχανική ενέργεια της τροχιάς,  $\epsilon$ . Επομένως, εάν γνωρίζουμε την ενέργεια της τροχιάς, μπορούμε να προσδιορίσουμε τον μεγάλο ημιάξονα. Πιο πριν, δείξαμε ότι η ειδική μηχανική ενέργεια εξαρτιέται μόνο από τα μεγέθη  $\vec{R}$ ,  $\vec{V}$  και τη βαρυτική σταθερά  $\mu$ :

$$\epsilon = \frac{V^2}{2} - \frac{\mu}{R} \quad (7-31)$$

όπου

$\epsilon$ : ειδική μηχανική ενέργεια του διαστημικού σκάφους ( $\text{km}^2/\text{s}^2$ )

$V$ : γραμμική ταχύτητα διαστημικού σκάφους ( $\text{km}/\text{s}$ )

$\mu$ : βαρυτική παράμετρος ( $\text{km}^3/\text{s}^3$ ) =  $3.98 \times 10^5 \text{ km}^3/\text{s}^2$  για τη Γη

$R$ : μέτρο του διανύσματος θέσης του διαστημικού σκάφους ( $\text{km}$ )

Γνωρίζουμε επίσης ότι το  $\epsilon$  σχετίζεται με τον μεγάλο ημιάξονα. Αν λοιπόν γνωρίζουμε το μέγεθος των  $\vec{R}$ ,  $\vec{V}$ , μπορούμε να υπολογίσουμε τον μεγάλο ημιάξονα ως:

$$a = -\frac{\mu}{2\epsilon} \quad (7-32)$$

Κάθε φορά που υπολογίζουμε τον μεγάλο ημιάξονα (ή οποιαδήποτε άλλη σχετική παράμετρο), είναι καλή ιδέα να κάνουμε έναν «έλεγχο πραγματικότητας» στο αποτέλεσμα μας. Για παράδειγμα, ένα διαστημικό σκάφος που βρίσκεται σε τροχιά θα πρέπει να έχει μεγάλο ημιάξονα μεγαλύτερο από την ακτίνα του πλανήτη γύρω από τον οποίο περιστρέφεται!

#### Υπολογίζοντας την εκκεντρότητα, $e$

Για να προσδιορίσουμε την εκκεντρότητα ορίζουμε ένα διάνυσμα εκκεντρότητας,  $\vec{e}$ , με αρχή το κέντρο της Γης και τέλος το περίγειο. Το μέτρο του ισούται με την εκκεντρότητα,  $e$ . Το διάνυσμα εκκεντρότητας  $\vec{e}$  σχετίζεται με τη θέση,  $\vec{R}$ , και ταχύτητα,  $\vec{V}$  ως:

$$\vec{e} = \frac{1}{\mu} \left[ (V^2 - \frac{\mu}{R}) \vec{R} - (\vec{R} \cdot \vec{V}) \vec{V} \right] \quad (7-33)$$

Όπου

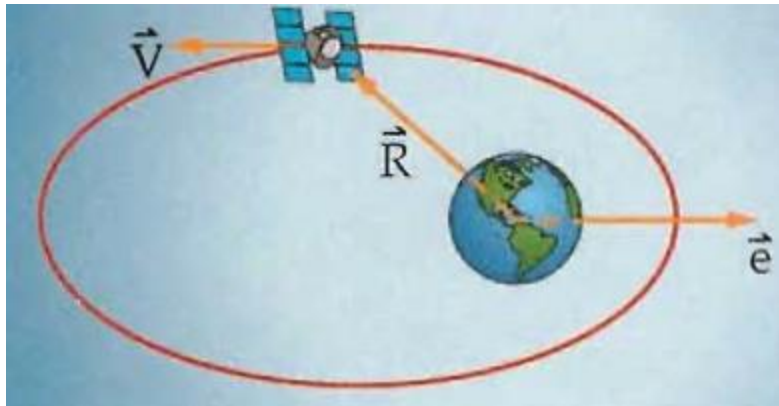
$\mu$ : η βαρυτική παράμετρος ( $\text{km}^3/\text{s}^2$ ) =  $3.986 \times 10^5 \text{ km}^3/\text{s}^2$  για τη Γη

$\vec{R}$ : διάνυσμα θέσης του διαστημικού σκάφους (km)

$R$ : μέτρο διανύσματος θέσης του διαστημικού σκάφους (km)

$\vec{V}$ : διάνυσμα ταχύτητας του διαστημικού σκάφους (km/s)

$V$ : μέτρο διανύσματος ταχύτητας του διαστημικού σκάφους (km/s)



Σχήμα 116: Το διάνυσμα εκκεντρότητας για μια τροχιά

Το σχήμα 116 δείχνει το διάνυσμα εκκεντρότητας για μια τροχιά. Τα μόνα που χρειαζόμαστε είναι τα  $\mu$ ,  $\vec{R}$ , και  $\vec{V}$  ώστε να βρούμε το διάνυσμα της εκκεντρικότητας. Επειδή το  $\vec{e}$  δείχνει προς στο περίγειο το αποκαλούμε και διάνυσμα του περιγείου. Σημειώστε ότι δεν ορίζεται  $\vec{e}$  για κυκλικές τροχιές.

### Υπολογίζοντας την κλίση, $i$

Τα άλλα τέσσερα τροχιακά στοιχεία είναι όλα γωνίες. Για να τα βρούμε, πρέπει να χρησιμοποιήσουμε τον ορισμό του εσωτερικού γινομένου, που μας επιτρέπει να βρούμε μια γωνία αν γνωρίζουμε τα δύο διανύσματα που τη σχηματίζουν. Ουμνηθείτε ότι ορίζουμε  $i$  ως τη γωνία μεταξύ  $\vec{K}$  και  $\vec{h}$ , όπως φαίνεται στο Σχήμα 117. Εφαρμόζουμε τη σχέση του εσωτερικού γινομένου ως:

$$i = \cos^{-1} \left( \frac{\vec{K} \cdot \vec{h}}{Kh} \right) \quad (7-34)$$

Όπου

$i$ : κλίση (μοίρες ή ακτίνια)

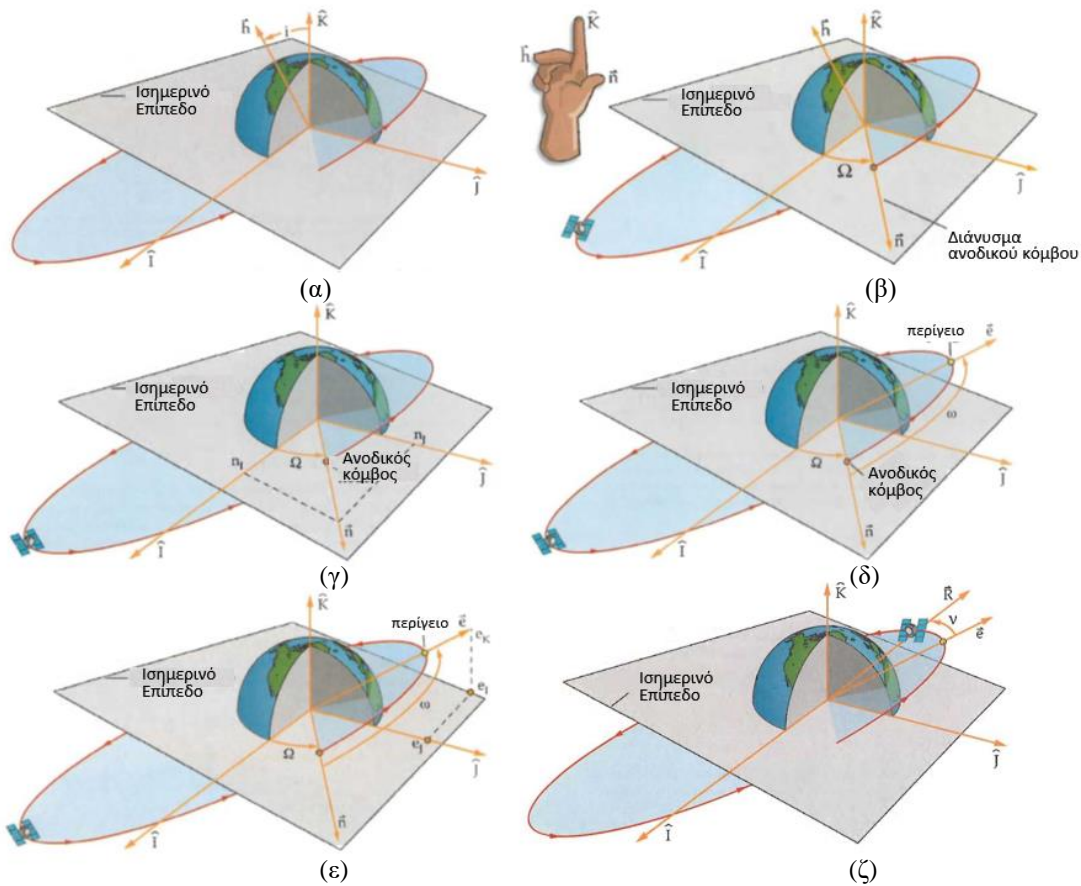
$\vec{K}$ : μοναδιαίο διάνυσμα που διέρχεται από τον βόρειο πόλο

$\vec{h}$ : διάνυσμα ειδικής γωνιακής ορμής ( $\text{km}^2/\text{s}$ )

$K$ : μέτρο του  $\vec{K}$ , ισούται με μονάδα

$h$ : μέτρο του  $\vec{h}$  ( $\text{km}^2/\text{s}$ )

Καθώς η τιμή της κλίσης βρίσκεται πάντοτε στο εύρος  $0^\circ < i < 180^\circ$ , παίρνουμε πάντα την μικρότερη τιμή που προκύπτει από τον υπολογισμό.



**Σχήμα 117: (α) Κλίση Τροχιάς (β) ορθή άνοδος ανοδικού κόμβου (ΟΑΑΚ) (γ) Υπολογισμός τεταρτημόριου (ΟΑΑΚ) (δ) όρισμα του περιγείου (ε) Υπολογισμός τεταρτημόριου για το όρισμα του περιγείου (ζ) Αληθής ανωμαλία ν**

**Υπολογίζοντας την ορθή άνοδο ανοδικού κόμβου, Ω**

Μπορούμε να βρούμε την ορθή άνοδο του ανοδικού κόμβου Ω, χρησιμοποιώντας την ίδια προσέγγιση που χρησιμοποιήσαμε για να βρούμε κλίση. Από τον ορισμό του Ω, γνωρίζουμε ότι είναι η γωνία μεταξύ της κύριας κατεύθυνσης  $\vec{I}$  και του ανοδικού ισημερινού σημείου. Σχεδιάσουμε ένα διάνυσμα από το κέντρο της Γης προς ανοδικό κόμβο (ισημερινό σημείο), το οποίο περνά από τη διασταύρωση των δύο επιπέδων - του τροχιακού και του ισημερινού επιπέδου. Αυτό το διάνυσμα ονομάζεται διάνυσμα του ορθού ανοδικού κόμβου  $\vec{n}$  και πρέπει να είναι κάθετο στο  $\vec{K}$  και στο  $\vec{h}$ , όπως φαίνεται στο Σχήμα 117. (Αυτό οφείλεται στο ότι το  $\vec{K}$  είναι κάθετο στο επίπεδο του ισημερινού και το  $\vec{h}$  είναι κάθετο στο τροχιακό επίπεδο.) Χρησιμοποιώντας τον ορισμό του εξωτερικού γινομένου (και του κανόνα του δεξιού χεριού), υπολογίζουμε:

$$\vec{n} = \vec{K} \times \vec{h} \tag{7-35}$$

Όπου

$\vec{n}$ : διάνυσμα ανοδικού ισημερινού σημείου (km<sup>2</sup>/s, με φορά προς το ανοδικό ισημερινό σημείο)

$\vec{K}$ : μοναδιαίο διάνυσμα που διέρχεται από τον βόρειο πόλο

$\vec{h}$ : διάνυσμα ειδικής γωνιακής ορμής (km<sup>2</sup>/s)

Καθώς το  $\vec{n}$  μετρείται στις μονάδες του  $\vec{h}$  δεν αποδίδεται κάποια φυσική σημασία στις μονάδες του. Επειδή το  $\Omega$  είναι η γωνία μεταξύ των  $\vec{I}$  και  $\vec{n}$  χρησιμοποιούμε το εσωτερικό γινόμενο για υπολογίσουμε την ορθή γωνία του ανοδικού ισημερινού σημείου  $\Omega$ :

$$\Omega = \cos^{-1} \left( \frac{\vec{I}\vec{n}}{In} \right) \quad (7-36)$$

Όπου

$\Omega$ : ορθή άνοδος ανοδικού κόμβου (μοίρες ή ακτίνια)

$\vec{I}$ : μοναδιαίο διάνυσμα στην κύρια κατεύθυνση

$\vec{n}$ : διάνυσμα ανοδικού ισημερινού σημείου (km<sup>2</sup>/s, με φορά προς το ανοδικό ισημερινό σημείο)

$I$ : μέτρο του  $\vec{I}$ , ισούται με μονάδα

$n$ : μέτρο του  $\vec{n}$ , (km<sup>2</sup>/s)

Η ορθή άνοδος ανοδικού κόμβου μπορεί να κυμαίνεται μεταξύ 0° και 360°, οπότε απαιτείται έλεγχος τεταρτημόριου. Πώς αποφασίζουμε σε ποιο τεταρτημόριο ανήκει το  $\Omega$ ; Εξετάζοντας το Σχήμα 117γ, βλέπουμε το ισημερινό επίπεδο και την θέση του διανύσματος ανοδικού ισημερινού σημείου κόμβου  $\vec{n}$ . Αν το  $\vec{n}$  είναι στα θετικά του άξονα  $\vec{J}$ , τότε το  $n_j$  είναι θετικό και το  $\Omega$  είναι μεταξύ 0° και 180°. Αν το  $\vec{n}$  βρίσκεται στην αρνητική πλευρά  $\vec{J}$ , τότε το  $n_j$  είναι αρνητικό και το  $\Omega$  είναι μεταξύ 180° και 360°. Εάν το  $\vec{n}$  ευθυγραμμίζεται με τον θετικό ή τον αρνητικό άξονα  $\vec{I}$ , τότε το  $\Omega$  είναι είτε 0° είτε 180°, αντίστοιχα. Μπορούμε έτσι να καταλήξουμε στα εξής:

$$\begin{aligned} \text{Εάν } n_j \geq 0 \text{ τότε } 0^\circ \leq \Omega \leq 180^\circ \\ \text{Εάν } n_j < 0 \text{ τότε } 180^\circ < \Omega < 360^\circ \end{aligned}$$

### Υπολογίζοντας το όρισμα του περιγείου, $\omega$

Το όρισμα του περιγείου,  $\omega$ , δηλώνει τη θέση του περιγείου στο τροχιακό επίπεδο. Θυμηθείτε ότι το ορίσαμε ως τη γωνία μεταξύ του ανοδικού ισημερινού σημείου και του περιγείου, όπως φαίνεται στην Εικόνα 45δ. Γνωρίζουμε ήδη πού είναι το ανοδικό ισημερινό σημείο από το διάνυσμα του ανοδικού ισημερινού σημείου,  $\vec{n}$ . Γνωρίζουμε επίσης ότι το διάνυσμα της εκκεντρότητας,  $\vec{e}$ , δείχνει προς το περιγείο. Χρησιμοποιώντας και πάλι τη σχέση του εσωτερικού γινομένου, μπορούμε να υπολογίσουμε το όρισμα του περιγείου,  $\omega$ .

$$\omega = \cos^{-1} \left( \frac{\vec{n}\vec{e}}{ne} \right) \quad (7-37)$$

Όπου

$\omega$ : όρισμα του περιγείου (μοίρες ή ακτίνια)

$\vec{n}$ : διάνυσμα ορθής άνοδος ανοδικού κόμβου (km<sup>2</sup>/s, με φορά προς το ανοδικό ισημερινό σημείο)

$n$ : μέτρο του  $\vec{n}$ , (km<sup>2</sup>/s)

$\vec{e}$ : διάνυσμα εκκεντρότητας (αδιάστατο μέγεθος, με φορά προς το περιγείο)

$e$ : μέτρο του  $\vec{e}$

Αντίστοιχα με την ορθή γωνία του ανοδικού ισημερινού σημείου εδώ εξετάζουμε την συνιστώσα  $\vec{K}$  της εκκεντρότητας για να βρούμε εάν το περιγείο βρίσκεται στο βόρειο ή στο νότιο ημισφαίριο και καταλήγουμε στα εξής:



$$\begin{aligned} \text{Εάν } e_k \geq 0 \text{ τότε } 0^\circ \leq \omega \leq 180^\circ \\ \text{Εάν } e_k < 0 \text{ τότε } 180^\circ < \omega < 360^\circ \end{aligned}$$

**Υπολογίζοντας την αληθή ανωμαλία,  $\nu$** 

Υπολογίζοντας την αληθής ανωμαλία βρίσκουμε τη θέση του διαστημικού σκάφους στην τροχιά του. Ορίζουμε ως  $\nu$  την γωνία μεταξύ των διανυσμάτων  $\vec{e}$  και  $\vec{R}$  όπως φαίνεται στο Σχήμα 117ζ.

Εφαρμόζοντας ξανά το εσωτερικό γινόμενο έχουμε:

$$\nu = \cos^{-1} \left( \frac{\vec{e} \cdot \vec{R}}{eR} \right) \quad (7-38)$$

Όπου

$\nu$ : αληθής ανωμαλία (μοίρες ή ακτίνια)

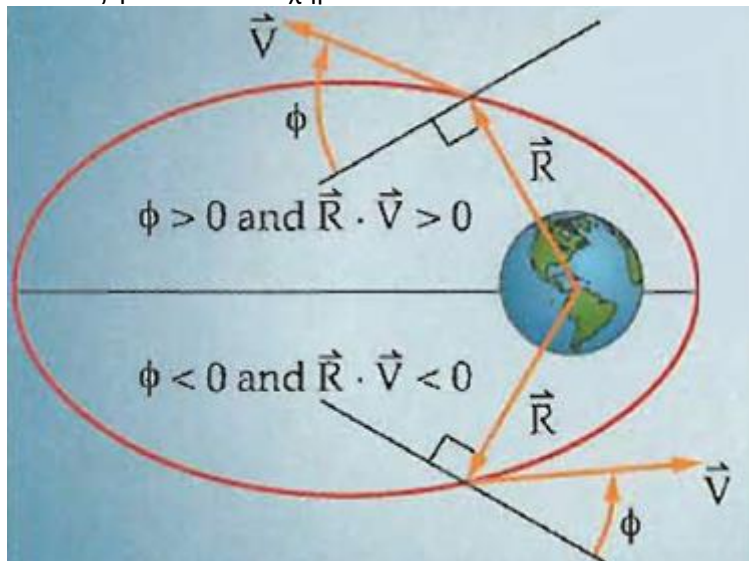
$\vec{e}$ : διάνυσμα εκκεντρότητας (αδιάστατο μέγεθος, με φορά προς το περίγειο)

$e$ : μέτρο του  $\vec{e}$

$\vec{R}$ : διάνυσμα θέσης διαστημικού σκάφους (km)

$R$ : μέτρο του  $\vec{R}$  (km)

Για να βρούμε εάν το διαστημικό σκάφος πλησιάζει ή απομακρύνεται από το περίγειο χρησιμοποιούμε αντίστοιχη ανάλυση με προηγούμενως. Εξετάζουμε το πρόσημο της γωνίας πτήσης  $\phi$ . Εάν η γωνία  $\phi$  είναι θετική τότε το διαστημικό σκάφος απομακρύνεται από το περίγειο ενώ για αρνητική γωνία  $\phi$  πλησιάζει στο περίγειο όπως φαίνεται στο Σχήμα 118.



Σχήμα 118: Υπολογισμός τεταρτημόριου για την αληθή ανωμαλία  $\nu$

Θυμηθείτε ότι η γωνία  $\phi$  είναι η γωνία μεταξύ του τοπικού οριζοντα και του διανύσματος της ταχύτητας του διαστημικού σκάφους. Εφαρμόζοντας την τριγωνομετρία παρατηρούμε ότι το πρόσημο της ποσότητας  $\vec{R} \cdot \vec{V}$  είναι ίδιο με το πρόσημο της γωνίας  $\phi$ . Έτσι καταλήγουμε στα εξής:

$$\begin{aligned} \text{Εάν } \vec{R} \cdot \vec{V} \geq 0 \text{ τότε } 0^\circ \leq \nu \leq 180^\circ \\ \text{Εάν } \vec{R} \cdot \vec{V} < 0 \text{ τότε } 180^\circ < \nu < 360^\circ \end{aligned}$$

Εάν  $\vec{R} \cdot \vec{V} = 0$  τότε δε γνωρίζουμε εάν η αληθής ανωμαλία  $\nu$  είναι  $0^\circ$  ή  $180^\circ$ . Σε αυτή την περίπτωση θα πρέπει να εξετάσουμε εάν το μέτρο του  $\vec{R}$  είναι ίσο με το περίγειο,  $R_p = a(1 - e)$  (την ακτίνα του περίγειου) ή ίσο με το απόγειο  $R_a = a(1 + e)$  (την ακτίνα του απογείου). Στην πρώτη περίπτωση έχουμε  $\nu = 0^\circ$  ενώ στην δεύτερη  $\nu = 180^\circ$ .

#### Παράδειγμα 7-4

Ο Ευρωπαϊκός Οργανισμός Διαστήματος (ΕΟΔ) μέσω του Ευρωπαϊκού Κέντρου Διαστημικών Λειτουργιών (European Space Operations Centre – ESOC) σας δίνει το διάνυσμα θέσης  $\vec{R}$  και την ταχύτητα  $\vec{V}$  για έναν νέο δορυφόρο που έχει μπει σε τροχιά:

$$\vec{R} = 8228 \hat{I} + 389.0 \hat{J} + 6888 \hat{K} \text{ km}$$

$$\vec{V} = -0.7000 \hat{I} + 6.600 \hat{J} - 0.6000 \hat{K} \text{ km/s}$$

Υπολογίστε το μέγεθος (μέγας ημιάξονας) και σχήμα (εκκεντρότητα) της τροχιάς του δορυφόρου.

Λύση

- 1) Υπολογίζουμε τα διανύσματα  $\vec{R}$  και  $\vec{V}$

$$R = \sqrt{(8228)^2 + (389)^2 + (6888)^2} = 10,738 \text{ km}$$

$$V = \sqrt{(-0.7000)^2 + (6.600)^2 + (-0.6000)^2} \\ = 6.664 \text{ km/s}$$

- 2) Βρίσκουμε τον μέγας ημιάξονα

$$\varepsilon = \frac{V^2}{2} - \frac{\mu}{R}$$

$$\varepsilon = \frac{(6.664 \text{ km/s})^2}{2} - \frac{3.986 \times 10^5 \text{ km}^3/\text{s}^2}{10,738 \text{ km}} \\ = -14.916 \text{ km}^2/\text{s}^2$$

$$\varepsilon = -\frac{\mu}{2a}$$

$$a = -\frac{\mu}{2\varepsilon} = \frac{-3.986 \times 10^5 \text{ km}^3/\text{s}^2}{2(-14.916 \text{ km}^2/\text{s}^2)} = 1.336 \times 10^4 \text{ km}$$

- 3) Εκκεντρότητα

$$\vec{e} = \frac{1}{\mu} \left[ \left( V^2 - \frac{\mu}{R} \right) \vec{R} - (\vec{R} \cdot \vec{V}) \vec{V} \right]$$

$$\vec{R} \cdot \vec{V} = (8228)(-0.7000) + (389.0)(6.600) + (6888)(-0.6000) = -7325 \text{ km}^2/\text{s}$$

$$\dot{e} = \frac{1}{3.986 \times 10^5 \text{ km}^3/\text{s}^2} \times$$

$$\left[ \left( \left( 6.664 \frac{\text{km}}{\text{s}} \right)^2 - \frac{3.986 \times 10^5 \frac{\text{km}^3}{\text{s}^2}}{10,738 \text{ km}} \right) \vec{R} - \left( -7325 \frac{\text{km}^2}{\text{s}} \right) \vec{V} \right]$$

$$\dot{e} = (2.5088 \times 10^{-6}) [(7.288) \vec{R} - (-7325) \vec{V}]$$

$$\dot{e} = (1.8284 \times 10^{-5}) [8228 \hat{I} + 389.0 \hat{J} + 6888 \hat{K}] - (-0.018377) [-0.7000 \hat{I} + 6.600 \hat{J} - 0.6000 \hat{K}]$$

$$\dot{e} = 0.15044 \hat{I} + 0.0071125 \hat{J} + 0.12594 \hat{K} - [0.012864 \hat{I} - 0.12129 \hat{J} + 0.011026 \hat{K}]$$

$$\dot{e} = 0.1376 \hat{I} + 0.1284 \hat{J} + 0.1149 \hat{K}$$

$$e = \sqrt{(0.1376)^2 + (0.1284)^2 + (0.1149)^2} = 0.2205$$

Βλέπουμε ότι ο μέγας ημιάξονας είναι 13,360 km. Εφόσον  $e = 0.2205$  ( $0 < e < 1$ ), η τροχιά είναι ελλειπτική.

### Παράδειγμα 7-5

Χρησιμοποιώντας το παράδειγμα 7-4 και τα διανύσματα θέσης/ταχύτητας, βρείτε την κλίση (η Έγκλιση) της τροχιάς.

Λύση

- 1) Βρίσκουμε το διάνυσμα της ειδικής στροφορμής  $\vec{h}$

$$\vec{h} = \vec{R} \times \vec{V}$$

$$\vec{R} \times \vec{V} = \begin{vmatrix} \hat{I} & \hat{J} & \hat{K} \\ 8228 & 389.0 & 6888 \\ -0.7000 & 6.600 & -0.6000 \end{vmatrix} \frac{\text{km}^2}{\text{s}}$$

$$\vec{h} = [(389.0)(-0.6000) - (6.600)(6888)] \hat{I} - [(8228)(-0.6000) - (-0.7000)(6888)] \hat{J} +$$

$$\begin{aligned}
 & [(8228)(6.600) - (-0.7000)(389.0)]\hat{K} \frac{\text{km}^2}{\text{s}} \\
 \vec{h} & = [(-233.4) - (45,460.8)]\hat{I} - \\
 & \quad [(-4936.8) + (4821.6)]\hat{J} + \\
 & \quad [(54,304.8) + (272.3)]\hat{K} \frac{\text{km}^2}{\text{s}} \\
 \vec{h} & = -45,694.2 \hat{I} + 115.2 \hat{J} + 54,577.1 \hat{K} \frac{\text{km}^2}{\text{s}} \\
 h & = \sqrt{(45,694.2)^2 + (115.2)^2 + (54,577.1)^2} \\
 & = 71,180.3 \frac{\text{km}^2}{\text{s}}
 \end{aligned}$$

2) Βρίσκουμε την κλίση  $i$

$$\begin{aligned}
 i & = \cos^{-1} \left( \frac{\hat{K} \cdot \vec{h}}{Kh} \right) = \cos^{-1} \left( \frac{\hat{K} \cdot \vec{h}}{h} \right) \\
 \hat{K} \cdot \vec{h} & = h_K = 54,577.1 \\
 i & = \cos^{-1} \left( \frac{h_K}{h} \right) = \cos^{-1} \left( \frac{54,577.1}{71,180.3} \right) = \cos^{-1}(0.76674)
 \end{aligned}$$

Από τα παραπάνω μπορούμε να έχουμε δύο τιμές για την κλίση  $i$ :  $i = 39.94^\circ$  ή  $(360^\circ - 39.94^\circ) = 320.1^\circ$ . Γνωρίζοντας όμως ότι το  $i$  πρέπει να είναι ανάμεσα από  $0^\circ$  και  $180^\circ$ , η απάντηση είναι  $i = 39.94^\circ$

### Παράδειγμα 7-6

Χρησιμοποιώντας το παράδειγμα 3-4 και τα διανύσματα θέσης/ταχύτητας, βρείτε την ορθή άνοδο του ανοδικού κόμβου, ορισμό του περιγείου και την αληθή ανωμαλία της τροχιάς.

Λύση

1) Βρίσκουμε το διάνυσμα  $\vec{n}$  της ορθής ανόδου του ανοδικού κόμβου

$$\begin{aligned}
 \vec{n} & = \hat{K} \times \vec{h} = \begin{vmatrix} \hat{I} & \hat{J} & \hat{K} \\ 0.0 & 0.0 & 1.0 \\ -45,694.2 & 115.2 & 54,577.1 \end{vmatrix} \\
 & = -115.2 \hat{I} - 45,694.2 \hat{J} + 0 \hat{K} \\
 & \text{Άρα } n = 45,694.3 \text{ km}^2/\text{s}
 \end{aligned}$$

2) Βρίσκουμε την γωνία  $\Omega$  της ορθής ανόδου του ανοδικού κόμβου και κάνουμε έλεγχο του τεταρτημόριου

$$\Omega = \cos^{-1} \left( \frac{\hat{\mathbf{i}} \cdot \hat{\mathbf{n}}}{In} \right) = \cos^{-1} \left( \frac{\hat{\mathbf{i}} \cdot \hat{\mathbf{n}}}{n} \right)$$

$$\hat{\mathbf{i}} \cdot \hat{\mathbf{n}} = n_i = -115.2$$

$$\Omega = \cos^{-1} \left( \frac{-115.2}{45,694.3} \right) = \cos^{-1}(-0.0025211)$$

$$\Omega = 91.4^\circ \text{ or } (360^\circ - 90.14^\circ) = 269.9^\circ$$

Υπάρχουν 2 δυνατές λύσεις:

Αν  $n_j \geq 0$  τότε  $0^\circ \leq \Omega \leq 180^\circ$

Αν  $n_j < 0$  τότε  $180^\circ < \Omega < 360^\circ$

Επειδή  $n_j = -45,694.2$ ,  $n_j < 0$  που σημαίνει  $180^\circ < \Omega < 360^\circ$ , άρα  $\Omega = 269.9^\circ$

3) Βρίσκουμε τον ορισμό του περιγείου,  $\omega$ , και κάνουμε έλεγχο του τεταρτημόριου

$$\omega = \cos^{-1} \left( \frac{\hat{\mathbf{n}} \cdot \hat{\mathbf{e}}}{ne} \right)$$

$$\hat{\mathbf{n}} \cdot \hat{\mathbf{e}} = (-115.2)(0.1376) + (-45,694.2)(0.1284) + (0.0)(0.1149) = -5882.99$$

$$\omega = \cos^{-1} \left[ \frac{-5882.99}{(45,694.3)(0.2205)} \right] = \cos^{-1}(-0.58389)$$

$$\omega = 125.7^\circ \text{ or } (360^\circ - 125.7^\circ) = 234.3^\circ$$

Υπάρχουν 2 δυνατές λύσεις:

Αν  $e_k \geq 0$  τότε  $0^\circ \leq \omega \leq 180^\circ$

Αν  $e_k < 0$  τότε  $180^\circ < \omega < 360^\circ$

Επειδή  $e_k = +0.1149$ ,  $e_k > 0$  που σημαίνει  $0^\circ < \omega < 180^\circ$ , άρα  $\omega = 125.7^\circ$

4) Βρίσκουμε την αληθή ανωμαλία της τροχιάς και κάνουμε έλεγχο του τεταρτημόριου

$$v = \cos^{-1} \left( \frac{\hat{\mathbf{e}} \cdot \hat{\mathbf{R}}}{eR} \right)$$

$$\hat{\mathbf{e}} \cdot \hat{\mathbf{R}} = (0.1376)(8228) + (0.1284)(389.0) + (0.1149)(6888) = 1974.05$$

$$v = \cos^{-1} \left[ \frac{1974.05}{(0.2205)(10,738)} \right] = \cos^{-1}(0.83373)$$

$$v = 33.52^\circ \text{ or } (360^\circ - 33.52^\circ) = 326.48^\circ$$

Υπάρχουν 2 δυνατές λύσεις

Αν  $(\hat{\mathbf{R}} \cdot \hat{\mathbf{V}}) \geq 0$  ( $\phi > 0$ ) τότε  $0^\circ \leq v \leq 180^\circ$

Αν  $(\hat{\mathbf{R}} \cdot \hat{\mathbf{V}}) < 0$  ( $\phi < 0$ ) τότε  $180^\circ \leq v \leq 360^\circ$

Βρήκαμε στο Παρ. 3-4 ότι  $(\hat{\mathbf{R}} \cdot \hat{\mathbf{V}}) = -7325$ . Επειδή  $(\hat{\mathbf{R}} \cdot \hat{\mathbf{V}}) < 0$ ,  $180^\circ \leq v \leq 360^\circ$  οπότε  $v = 326.5^\circ$

### 7.11 Ελιγμοί στο διάστημα

Σε αυτήν την ενότητα θα μάθετε να:

- Εξηγείτε τις πιο ενεργειακά αποδοτικές μεθόδους κίνησης μεταξύ δύο σημείων – μεταφορά Hohmann
- Προσδιορίζετε την απαιτούμενη μεταβολή ταχύτητας  $\Delta V$  για την εκτέλεση μιας μεταφοράς Hohmann μεταξύ δύο τροχιών
- Εξηγείτε τις αλλαγές στο τροχιακό επίπεδο και τον τρόπο να τις επιτύχετε
- Εξηγείτε τα τροχιακά ραντεβού και να προσδιορίζετε την απαιτούμενη μεταβολή ταχύτητας  $\Delta V$  καθώς και τη χρονική στιγμή εκκίνησης της μεταφοράς

Ένα διαστημικό σκάφος σπάνια παραμένει για μεγάλο χρονικό διάστημα σε μία μόνο τροχιά. Σχεδόν σε κάθε αποστολή στο διάστημα, υπάρχει η ανάγκη για αλλαγή ενός ή περισσότερων τροχιακών στοιχείων τουλάχιστον μία φορά. Οι δορυφόροι επικοινωνίας, για παράδειγμα, ποτέ δεν τοποθετούνται εξ αρχής στις γεωστατικές τους θέσεις. Αρχικά μεταβαίνουν σε χαμηλή τροχιά (περίπου 300 χλμ.) πριν μεταφερθούν σε γεωστατική με υψόμετρο (περίπου 35.780 χλμ.). Ενώ συμβαίνει αυτή η μεγάλη μεταβολή στον μεγάλο ημιάξονα, ένας ακόμα ελιγμός μειώνει την κλίση του δορυφόρου σε 0°. Ακόμη και μετά την άφιξή τους στην τροχιά της αποστολής τους, πρέπει να προσαρμόζονται τακτικά για να παραμείνουν στη θέση τους. Σε άλλες αποστολές, τα διαστημικά σκάφη χρειάζεται να εκτελέσουν ελιγμούς για να συναντηθούν με κάποιο άλλο διαστημόπλοιο, όπως το διαστημικό λεωφορείο που συναντήθηκε με το διαστημικό τηλεσκόπιο Hubble για να το επισκευάσει 5 φορές από το 1993-2009 (Σχήμα 119).



**Σχήμα 119: Ραντεβού σε τροχιά του Διαστημικού Λεωφορείου με το Διαστημικό Τηλεσκόπιο Hubble για την συντήρηση και αλλαγή οργάνων του Hubble**

Όπως θα δούμε σε αυτήν την ενότητα, αυτοί οι τροχιακοί ελιγμοί δεν είναι τόσο απλοί. Επειδή ένα διαστημικό σκάφος βρίσκεται πάντα στο βαρυτικό πεδίο κάποιου σώματος (όπως η Γη ή ο Ήλιος), πρέπει να ακολουθήσει τους νόμους περί τροχιακής κίνησης για να μεταφερθεί από ένα μέρος σε ένα άλλο. Σε αυτήν την ενότητα θα χρησιμοποιήσουμε το πρόβλημα των δύο σωμάτων για να μάθουμε για τους ελιγμούς στο διάστημα. Θα εξηγήσουμε τον οικονομικότερο τρόπο μετακίνησης από μια τροχιά σε μια άλλη, θα βρούμε πώς και πότε πρέπει να αλλάζουμε το τροχιακό επίπεδο ενός διαστημικού σκάφους και τέλος θα περιγράψουμε ό,τι απαιτείται για να βρεθούν δύο διαστημόπλοια μαζί με ασφάλεια σε τροχιά.

### 7.11.1 Μεταφορά Hohmann

Σε αυτή την ενότητα θα μάθετε να:

- Περιγράψετε τα βήματα μιας μεταφοράς Hohmann, τον πιο αποδοτικό-ως προς καύσιμα- τρόπο για μεταφορά από μία τροχιά σε μία άλλη στο ίδιο επίπεδο.
- Προσδιορίζετε την απαιτούμενη μεταβολή ταχύτητας ώστε να υλοποιηθεί μια μεταφορά Hohmann

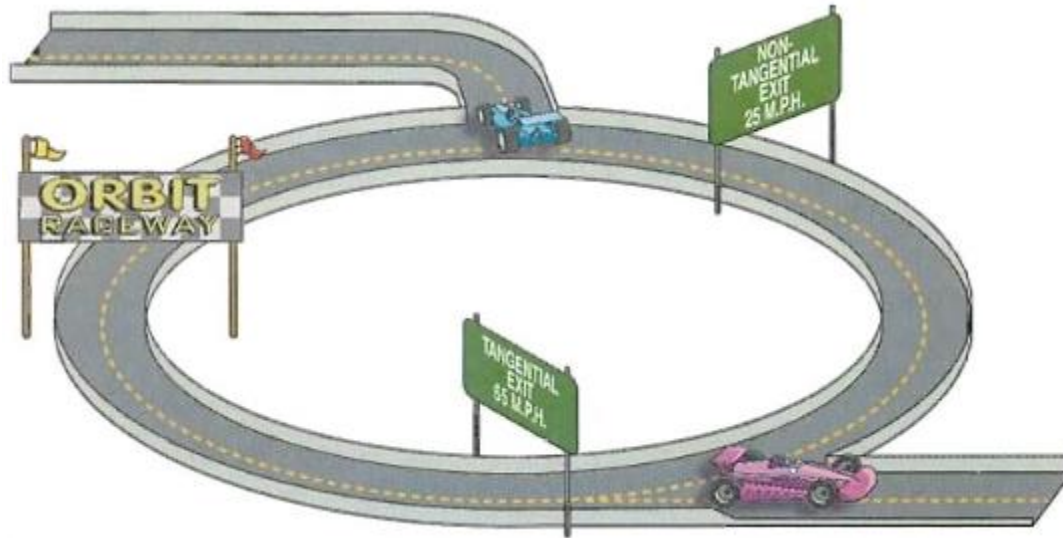
Ένα από τα πρώτα προβλήματα που αντιμετώπιζαν οι σχεδιαστές διαστημικών αποστολών ήταν η μετάβαση από μια τροχιά στην άλλη. Η βελτίωση αυτής της διαδικασίας για αποστολές στη Σελήνη ήταν ένας από τους στόχους του προγράμματος Gemini στη δεκαετία του 1960, όπως φαίνεται στο Σχήμα 120. Ας υποθέσουμε ότι βρισκόμαστε σε μια τροχιά και θέλουμε να μετακινηθούμε σε μια άλλη. Θα υποθέσουμε προς το παρόν ότι οι αρχικές και τελικές τροχιές βρίσκονται στο ίδιο επίπεδο. Συχνά χρησιμοποιούμε τέτοιους ελιγμούς για να μεταφέρουμε διαστημικά σκάφη από τις αρχικές τροχιές στάθμευσης στις τελικές τροχιές της αποστολής τους. Επειδή τα καύσιμα είναι κρίσιμα για όλους τους τροχιακούς ελιγμούς, ας δούμε την πιο οικονομικά αποδοτική μεταφορά, γνωστή ως μεταφορά Hohmann.



**Σχήμα 120:Το διαστημικό σκάφος της NASA Gemini 7 σε ελιγμό συνάντησης (ραντεβού) και πρόσδεσης (docking) με τον Gemini 6 το 1965**

Το 1925, ο Γερμανός μηχανικός, Walter Hohmann, επινόησε μια μέθοδο εξοικονόμησης καυσίμων για τη μεταφορά μεταξύ τροχιών. Αυτή η μέθοδος, που ονομάζεται Μεταφορά Hohmann, χρησιμοποιεί μια ελλειπτική τροχιά μεταφοράς που εφάπτεται στις αρχικές και τελικές τροχιές. Ας φανταστούμε ότι οδηγούμε ένα αυτοκίνητο γύρω από μια πίστα, όπως φαίνεται στο Σχήμα 121. Η προσπάθεια που απαιτείται για να βγείτε από την πίστα εξαρτάται από τη θέση και τον προσανατολισμό της εξόδου. Για παράδειγμα, αν η έξοδος εφάπτεται στην τροχιά σας, τότε θα βγείτε εύκολα - απλά ισιώνετε τις ρόδες. Αντίθετα αν η έξοδος είναι κάθετη στην πίστα, πρέπει να επιβραδύνετε πολύ, ίσως να σταματήσετε και έπειτα στρίψετε. Με την εφαιπτόμενη έξοδο χρειάζεται να αλλάξετε μόνο το μέγεθος της ταχύτητάς σας, πατώντας απλά τα φρένα. Με την κάθετη έξοδο, πρέπει γρήγορα να αλλάξετε το μέγεθος και την κατεύθυνση της ταχύτητάς σας που είναι δύσκολο να γίνει χωρίς να αναποδογυρίσετε το αυτοκίνητο σας.





**Σχήμα 121: Οι ελιγμοί (μανούβρες) δορυφόρων ως μία ‘πίστα’ με αγωνιστικά αυτοκίνητα**

Η μεταφορά Hohmann εφαρμόζει αυτό το απλό παράδειγμα της πίστας σε τροχιές. Χρησιμοποιώντας εισόδους και εξόδους που εφάπτονται στις αρχικές και τελικές τροχιές μας, αλλάζουμε τις τροχιές χρησιμοποιώντας όσο το δυνατόν λιγότερη ενέργεια. Για τους μηχανικούς, η εξοικονόμηση ενέργειας σημαίνει εξοικονόμηση καυσίμων, κάτι που είναι πολύτιμο για τις αποστολές στο διάστημα.

Εξ ορισμού, περιορίζουμε τις Μεταφορές Hohmann σε:

- Τροχιές στο ίδιο επίπεδο (συνεπίπεδες τροχιές)
- Τροχιές με τους μεγάλους άξονες (γραμμή των αψίδων) ευθυγραμμισμένους (κυκλικές τροχιές)
- Στιγμιαίες μεταβολές ταχύτητας ( $\Delta V$ s) εφαπτόμενες στις αρχικές και τελικές τροχιές

Θα ασχοληθούμε αργότερα με το πρόβλημα της αλλαγής μεταξύ τροχιακών επιπέδων. Οι κυκλικές τροχιές έχουν τους μεγάλους άξονες τους (γραμμή των αψίδων) ευθυγραμμισμένους μεταξύ τους. Επίσης, στην περίπτωση των στιγμιαίων αλλαγών ταχύτητας υποθέτουμε ότι ο χρόνος που ο κινητήρας λειτουργεί είναι πολύ μικρός σε σύγκριση με τον χρόνο ολοκλήρωσης της μεταφοράς Hohmann. Η εφάπτομενική αλλαγή ταχύτητας σημαίνει ότι το διαστημικό σκάφος αλλάζει το μέτρο του διανύσματος ταχύτητας, αλλά όχι κατεύθυνση του για να ξεκινήσει και να τελειώσει η μεταφορά Hohmann. Για να γίνει αυτό, το διαστημικό σκάφος θα πρέπει να λειτουργήσει τις μηχανές του σε διεύθυνση παράλληλη με το διάνυσμα ταχύτητας του.

Ας εξετάσουμε πως αυτές οι αλλαγές ταχύτητας επηρεάζουν την τροχιά. Υποθέτοντας ότι όλα τα  $\Delta V$  εμφανίζονται σχεδόν στιγμιαία, χρησιμοποιούμε τα αποτελέσματα από το πρόβλημα δύο σωμάτων. Κάθε φορά που αυξάνουμε ή ελαττώνουμε ταχύτητα, αλλάζουμε την ειδική μηχανική ενέργεια της τροχιάς,  $\epsilon$ , και επομένως το μέγεθος ή αλλιώς τον μεγάλο ημιάξονα της,  $a$ . Θυμηθείτε ότι αυτές οι ποσότητες συνδέονται ως:

$$\epsilon = -\frac{\mu}{2a} \quad (7-39)$$

όπου

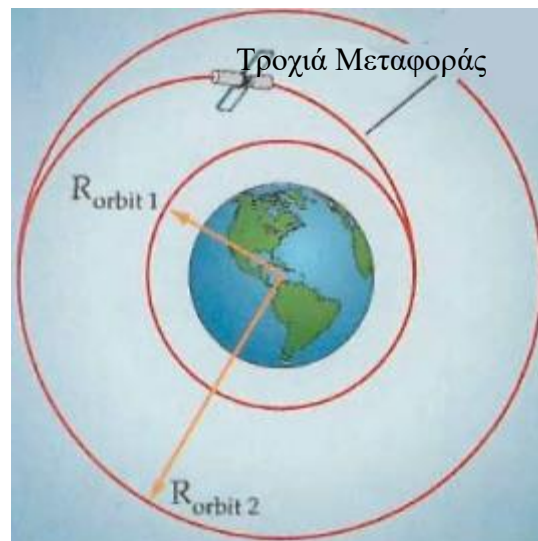
$\epsilon$ : ειδική μηχανική ενέργεια του διαστημικού σκάφους ( $\text{km}^2/\text{s}^2$ )

$\mu$ : βαρυτική παράμετρος ( $\text{km}^3/\text{s}^3$ ) =  $3.98 \times 10^5 \text{ km}^3/\text{s}^2$  για τη Γη

$a$ : μεγάλος ημιάξονας (km)

Εάν θελήσουμε να μετακινήσουμε ένα διαστημικό σκάφος σε υψηλότερη τροχιά, πρέπει να αυξήσουμε τον μεγάλο ημιάξονα (προσθήκη ενέργειας στην τροχιά) αυξάνοντας την ταχύτητα. Από την άλλη πλευρά, για να μετακινήσουμε το διαστημικό σκάφος σε μια χαμηλότερη τροχιά, θα πρέπει να μειώσουμε την ενέργεια και άρα την ταχύτητα.

Κατά τη διάρκεια μιας αποστολής, μερικές φορές πρέπει να μεταφέρουμε ένα διαστημικό σκάφος από μια τροχιά (τροχιά 1) σε μια άλλη (τροχιά 2). Το διαστημικό σκάφος πρέπει να τεθεί σε μια τροχιά μεταφοράς, όπως φαίνεται στο Σχήμα 122. Για να πάμε από την τροχιά 1 στην τροχιά μεταφοράς, αλλάζουμε την ενέργεια της τροχιάς (μεταβάλλοντας την ταχύτητα του διαστημικού σκάφους κατά  $\Delta V_1$ ).



**Σχήμα 122: Τροχιά Μεταφοράς, πηγαίνοντας από μία αρχική τροχιά (orbit 1) σε μία άλλη (τροχιά 2)**

Στη συνέχεια, όταν το διαστημικό σκάφος φτάσει στην τροχιά 2, αλλάζουμε και πάλι την ενέργειά του (αλλάζοντας την ταχύτητά του κατά  $\Delta V_2$ ). Εάν δεν αλλάξουμε τη δεύτερη φορά την ενέργεια του, το διαστημικό σκάφος θα παραμείνει στην τροχιά μεταφοράς επ' αόριστον, περνώντας από το σημείο που ξεκίνησε στην τροχιά 1, και το σημείο της τροχιάς 2. Έτσι, ένας πλήρης ελιγμός απαιτεί δύο ξεχωριστές ενεργειακές αλλαγές που επιτυγχάνεται με την αλλαγή των τροχιακών ταχυτήτων ( $\Delta V_1$  και  $\Delta V_2$ ). Το  $\Delta V$  αντιπροσωπεύει την αλλαγή από την τρέχουσα ταχύτητα σε μια επιθυμητή ταχύτητα:

$$\Delta V = |V_{\text{επιθ}} - V_{\text{τρεχ}}|$$

Παρατηρήστε ότι παίρνουμε την απόλυτη τιμή αυτής της διαφοράς επειδή θέλουμε να γνωρίζουμε το μέτρο της μεταβολής της ταχύτητας, ώστε να μπορούμε να υπολογίσουμε την ενέργεια και επομένως το απαραίτητο καύσιμο. Δεν ανησυχούμε για το πρόσημο του  $\Delta V$  επειδή χρειαζόμαστε καύσιμο είτε το διαστημικό σκάφος επιταχύνει είτε επιβραδύνει. Αν  $\Delta V_1$  είναι η ταχύτητα που μεταφέρει το διαστημικό σκάφος από την τροχιά 1 στην τροχιά μεταφοράς τότε

$$\Delta V_1 = |V_{\text{μεταφ}_1} - V_{\text{τροχια}_1}|$$

Όπου

$\Delta V_1$ : μεταβολή ταχύτητας για αλλαγή από τροχιά<sub>1</sub> σε τροχιά μεταφοράς (km/s)

$V_{\text{μεταφ}_1}$ : ταχύτητα στην τροχιά μεταφοράς σε ακτίνα της τροχιά<sub>1</sub> (km/s)

$V_{\text{τροχια}_1}$ : ταχύτητα στην τροχιά<sub>1</sub> (km/s)

$\Delta V_2$  είναι η μεταβολή ταχύτητας ώστε να μεταφερθεί το διαστημικό σκάφος από την τροχιά μεταφοράς στην τροχιά<sub>2</sub>

$$\Delta V_2 = |V_{\text{τροχια}_2} - V_{\text{μεταφ}_2}|$$

Όπου

$\Delta V_2$ : μεταβολή ταχύτητας για αλλαγή από τροχιά μεταφοράς σε τροχιά<sub>2</sub> (km/s)

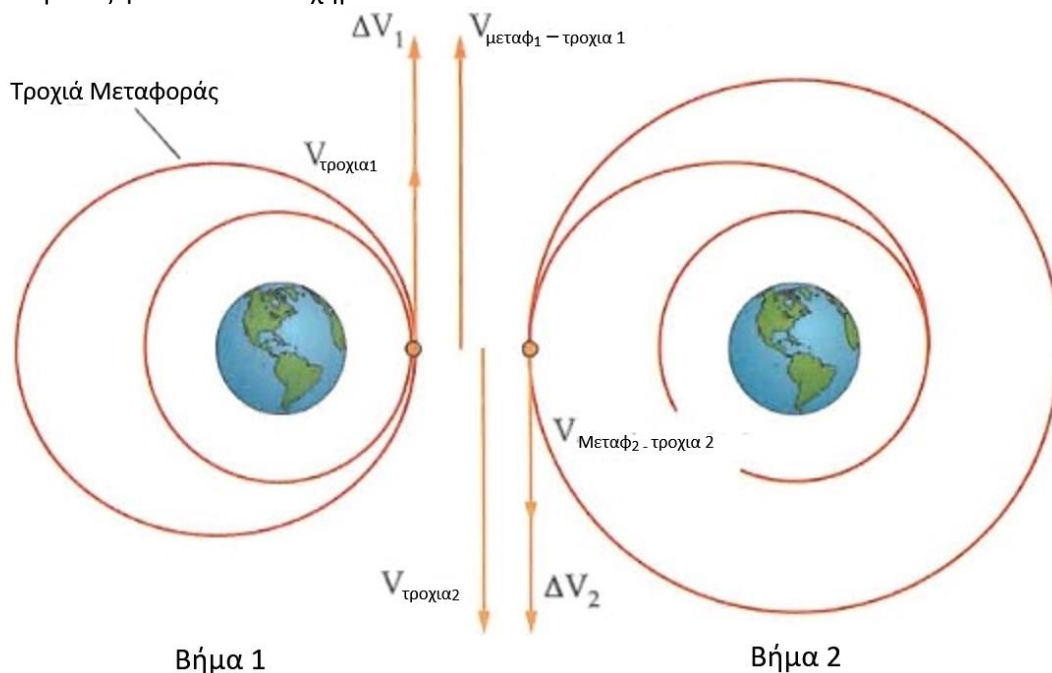
Για να υπολογίσουμε την ολική  $\Delta V$  που χρειαζόμαστε, αθροίζουμε :

$$\Delta V_{\text{total}} = \Delta V_1 + \Delta V_2$$

Όπου

$\Delta V_{\text{total}}$ : ολική μεταβολή ταχύτητας για τη μεταφορά (km/s)

Οι δύο μεταβολές φαίνονται στο Σχήμα 123.



**Σχήμα 123: Μεταφορά Hohmann. Βήμα 1:** Η πρώτη πυροδότηση (καύση) ή  $\Delta V$  βγάξει τον δορυφόρο από την αρχική του κυκλική τροχιά και μπαίνει σε μία ενδιάμεση ελλειπτική τροχιά μεταφοράς. **Βήμα 2:** Η δεύτερη πυροδότηση μεταφέρει τον δορυφόρο από την ελλειπτική τροχιά μεταφοράς στην τελική κυκλική τροχιά

Για να υπολογίσουμε τη  $\Delta V_{\text{total}}$ , χρησιμοποιούμε τις εξισώσεις ενέργειας από την τροχιακή μηχανική. Όλα όσα πρέπει να γνωρίζουμε για την επίλυση ενός προβλήματος τροχιακών ελιγμών προέρχονται από αυτές τις δύο πολύτιμες σχέσεις, όπως είδατε στο Παράδειγμα 3-3. Πρώτον, χρειαζόμαστε την ειδική μηχανική ενέργεια,  $\varepsilon$ :

$$\varepsilon = \frac{1}{2}V^2 - \frac{\mu}{R} \quad (7-40)$$

όπου

$\varepsilon$ : ειδική μηχανική ενέργεια του διαστημικού σκάφους ( $\text{km}^2/\text{s}^2$ )

$V$ : γραμμική ταχύτητα διαστημικού σκάφους (km/s)

$\mu$ : βαρυτική παράμετρος ( $\text{km}^3/\text{s}^3$ )= $3.98 \times 10^5 \text{ km}^3/\text{s}^2$  για τη Γη

$R$ : μέτρο του διανύσματος θέσης του διαστημικού σκάφους (km)

Στη συνέχεια χρειαζόμαστε την ειδική μηχανική ενέργεια στη μορφή:

$$\varepsilon = -\frac{\mu}{2a} \quad (7-41)$$

όπου

$\varepsilon$ : ειδική μηχανική ενέργεια του διαστημικού σκάφους ( $\text{km}^2/\text{s}^2$ )

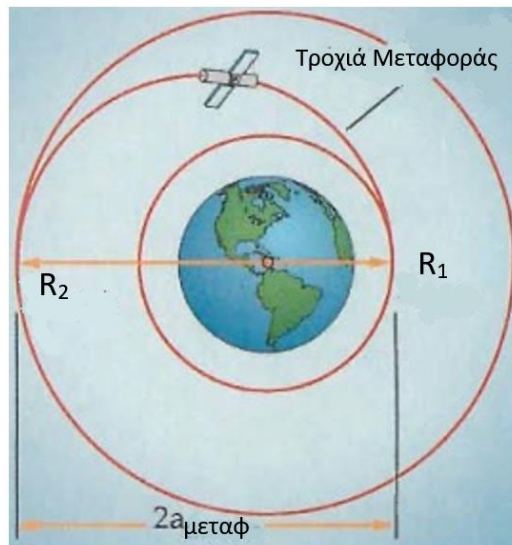
$\mu$ : βαρυτική παράμετρος ( $\text{km}^3/\text{s}^3$ )= $3.98 \times 10^5 \text{ km}^3/\text{s}^2$  για τη Γη

$a$ : μεγάλος ημιάξονας (km)

Ας αναθεωρήσουμε τα βήματα στη διαδικασία μεταφοράς. Αναφερόμενοι στο Σχήμα 123:

- Βήμα 1: η μεταβολή  $\Delta V_1$  μεταφέρει το διαστημικό σκάφος από την τροχιά<sub>1</sub> στην τροχιά μεταφοράς
- Βήμα 2: η μεταβολή  $\Delta V_2$  μεταφέρει το διαστημικό σκάφος από την τροχιά μεταφοράς στην τροχιά<sub>2</sub>

Για να λύσουμε ως προς τα  $\Delta V_1$  και  $\Delta V_2$ , πρέπει να βρούμε την ενέργεια σε κάθε τροχιά. Αν γνωρίζουμε τα μεγέθη των τροχιών 1 και 2, τότε γνωρίζουμε τους μεγάλους ημιάξονες τους ( $a_1, a_2$ ). Ο μεγάλος άξονας της τροχιάς μεταφοράς ισούται με το άθροισμα των ακτινών των δύο τροχιών όπως φαίνεται στο Σχήμα 124.



Σχήμα 124: Μέγεθος της τροχιάς μεταφοράς

$$2a_{\text{μεταφ}} = R_1 + R_2 \quad (7-42)$$

Χρησιμοποιώντας την εναλλακτική εξίσωση για την περιγραφή της ειδικής μηχανικής ενέργειας προκύπτει:

$$\varepsilon_1 = -\frac{\mu}{2a_1} \quad (7-43)$$

$$\varepsilon_2 = -\frac{\mu}{2a_2} \quad (7-44)$$

$$\varepsilon_{\text{μεταφ}} = -\frac{\mu}{2a_{\text{μεταφ}}} \quad (7-45)$$

Γνωρίζοντας αυτές τις ενέργειες μπορούμε να υπολογίσουμε:

$$V_{\text{τροχια}_1} = \sqrt{2\left(\frac{\mu}{R_1} + \varepsilon_1\right)}$$

$$V_{\text{τροχια}_2} = \sqrt{2\left(\frac{\mu}{R_2} + \varepsilon_2\right)}$$

$$V_{\text{μεταφ}_1} = \sqrt{2\left(\frac{\mu}{R_1} + \varepsilon_{\text{μεταφ}}\right)}$$

$$V_{\text{μεταφ}_2} = \sqrt{2\left(\frac{\mu}{R_2} + \varepsilon_{\text{μεταφ}}\right)}$$

Τελικά, για να υπολογίσουμε τις  $\Delta V_1, \Delta V_2$  παίρνουμε τις διαφορές:

$$\Delta V_1 = |V_{\text{μεταφ}_1} - V_{\text{τροχια}_1}|$$

$$\Delta V_2 = |V_{\text{τροχια}_2} - V_{\text{μεταφ}_2}|$$

και προσθέτουμε:

$$\Delta V_{\text{ολική}} = \Delta V_1 + \Delta V_2$$

Η μεταφορά Hohmann είναι ενεργειακά αποδοτική, αλλά απαιτεί χρόνο για να ολοκληρωθεί. Για να υπολογίσουμε τον απαιτούμενο χρόνο μεταφοράς ας κοιτάξουμε το σχήμα του ελιγμού. Η μεταφορά καλύπτει ακριβώς το μισό μιας έλλειψης. Θυμηθείτε ότι βρίσκουμε τη συνολική περίοδο για οποιαδήποτε κλειστή τροχιά από την εξίσωση:

$$P = 2\pi \sqrt{\frac{a^3}{\mu}} \quad (7-46)$$

Συνεπώς ο χρόνος πτήσης/μεταφοράς ισούται με:

$$TOF = \frac{P}{2} = \pi \sqrt{\frac{a_{\text{μεταφ}}^3}{\mu}} \quad (7-47)$$

Όπου

$TOF$ : χρόνος πτήσης/μεταφοράς (s)

$P$ : περίοδος τροχιάς (s)

$\mu$ : βαρυτική παράμετρος ( $\text{km}^3/\text{s}^3$ ) =  $3.98 \times 10^5 \text{ km}^3/\text{s}^2$  για τη Γη

$a$ : μεγάλος ημιάξονας (km)

Το παράδειγμα 7-7 δείχνει πως υπολογίζουμε το χρόνο πτήσης/μεταφοράς για μια μεταφορά Hohmann.

Στο παράδειγμα, το διαστημικό σκάφος πήγε από μια χαμηλή τροχιά σε μια υψηλότερη τροχιά. Για να γίνει αυτό, έπρεπε να επιταχυνθεί δύο φορές ( $\Delta V_1$  και  $\Delta V_2$ ). Παρατηρήστε ότι η ταχύτητα στην

υψηλότερη κυκλική τροχιά είναι μικρότερη από αυτή στη χαμηλότερη κυκλική τροχιά. Έτσι, το διαστημικό σκάφος επιταχύνθηκε δύο φορές, αλλά κατέληξε σε πιο αργή τροχιά! Βγάζει νόημα; Η  $\Delta V_1$  αυξάνει την ταχύτητα του διαστημικού σκάφους, μεταφέροντας το από την τροχιά 1 στην τροχιά μεταφοράς. Στην τροχιά μεταφοράς, η ταχύτητά του μειώνεται σταδιακά καθώς η ακτίνα του αυξάνεται, μετατρέποντας την κινητική ενέργεια του σε δυναμική ενέργεια, όπως ακριβώς συμβαίνει όταν πετάμε μια μπάλα στον αέρα. Όταν το διαστημικό σκάφος φτάσει στην ακτίνα της υψηλής τροχιάς, επιταχύνει και πάλι. Η  $\Delta V_2$  δηλαδή το τοποθετεί στην τελική/υψηλή τροχιά. Παρόλο που η ταχύτητα στην τροχιά 2 είναι χαμηλότερη από την τροχιά 1, η συνολική ενέργεια είναι υψηλότερη επειδή η ακτίνα είναι μεγαλύτερη. Θυμηθείτε, η ενέργεια είναι το άθροισμα της κινητικής και της δυναμικής ενέργειας. Έτσι, χρησιμοποιούμε τους πυραύλους για να προσθέσουμε κινητική ενέργεια που μετατρέπεται σε δυναμική.

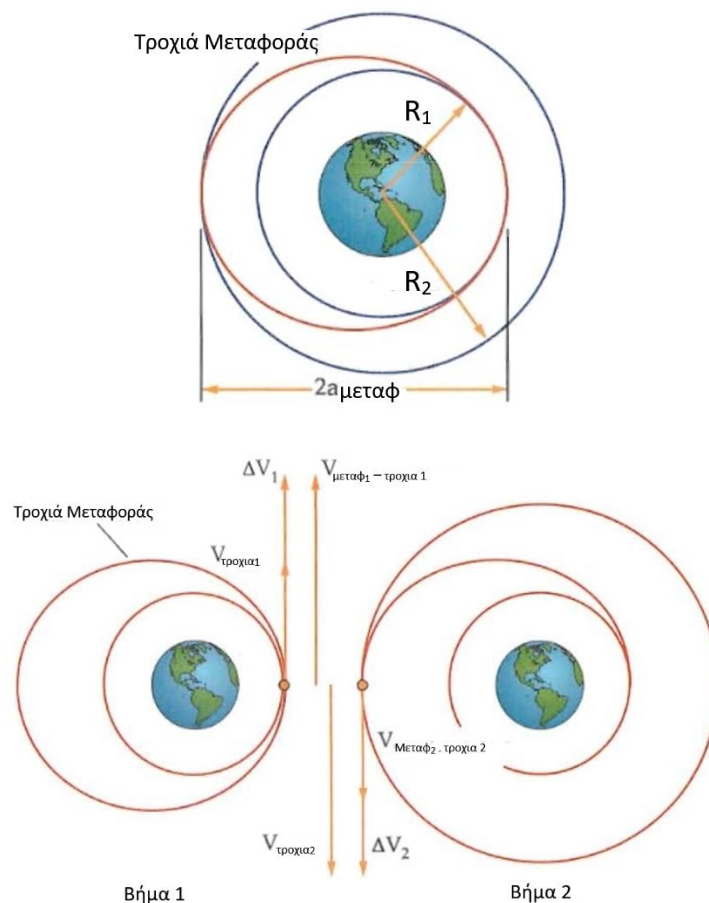
### Παράδειγμα 7-7

Υποθέτουμε ότι η NASA θέλει να μεταφέρει έναν δορυφόρο τηλεπικοινωνιών από χαμηλή (LEO) τροχιά σε γεωσύγχρονη τροχιά. Δίνονται:

- $R_1 = 6570 \text{ km}$
- $R_2 = 42160 \text{ km}$

Πόση είναι η ολική  $\Delta V$  για αυτή την μεταφορά και πόσος χρόνος απαιτείται για να ολοκληρωθεί;

Σχήμα προβλήματος



### Λύση

Υπολογίζουμε τον μεγάλο ημιάξονα της τροχιάς μεταφοράς:

$$\alpha_{\text{μεταφ}} = \frac{R_1 + R_2}{2} = 24365 \text{ km}$$

Υπολογίζουμε την ειδική μηχανική ενέργεια της τροχιάς μεταφοράς:

$$\varepsilon_{\text{μεταφ}} = -\frac{\mu}{2\alpha_{\text{μεταφ}}} = -8.1798 \text{ km}^2/\text{s}^2$$

Υπολογίζουμε την ειδική μηχανική ενέργεια και την ταχύτητα για την τροχιά 1:

$$\varepsilon_1 = -\frac{\mu}{2\alpha_1} = -30.33 \text{ km}^2/\text{s}^2$$

$$\alpha_1 = R_1 \text{ (κυκλική τροχιά)}$$

$$V_1 = \sqrt{2\left(\frac{\mu}{R_1} + \varepsilon_1\right)} = 7.789 \text{ km/s}$$

Υπολογίζουμε την ταχύτητα:

$$V_{\text{μεταφ}_1} = \sqrt{2\left(\frac{\mu}{R_1} + \varepsilon_{\text{μεταφ}}\right)} = 10.246 \text{ km/s}$$

Βρίσκουμε:

$$\Delta V_1 = |V_{\text{μεταφ}_1} - V_1| = 2.457 \text{ km/s}$$

Αντίστοιχα υπολογίζουμε την ταχύτητα:

$$V_{\text{μεταφ}_2} = \sqrt{2\left(\frac{\mu}{R_2} + \varepsilon_{\text{μεταφ}}\right)} = 1.597 \text{ km/s}$$

Λύνουμε ως προς την ενέργεια και την ταχύτητα για την τροχιά 2:

$$\varepsilon_2 = -\frac{\mu}{2\alpha_2} = -4.727 \text{ km}^2/\text{s}^2$$

$$\alpha_2 = R_2 \text{ (κυκλική τροχιά)}$$

$$V_2 = \sqrt{2\left(\frac{\mu}{R_2} + \varepsilon_2\right)} = 3.075 \text{ km/s}$$

Υπολογίζουμε την  $\Delta V_2$ :

$$\Delta V_2 = |V_2 - V_{\text{μεταφ}_2}| = 1.478 \text{ km/s}$$

Η ολική  $\Delta V_{\text{ολική}}$  ισούται με:

$$\Delta V_{\text{ολική}} = \Delta V_1 + \Delta V_2 = 3.935 \text{ km/s}$$

Υπολογίζουμε το χρόνο πτήσης/μεταφοράς από:

$$TOF = \pi \sqrt{\frac{\alpha_{\text{μεταφ}}^3}{\mu}} = 315 \text{ min}$$

### 7.11.2 Αλλαγή Επιπέδου/Κλίσης Τροχιάς

Σε αυτή την ενότητα θα μάθετε να:

- Εξηγείτε πότε πρέπει να χρησιμοποιήσετε μια απλή αλλαγή επιπέδου και πώς επηρεάζει ένα τροχιακό επίπεδο.
- Εξηγείτε πως μπορείτε να χρησιμοποιήσετε μια αλλαγή επιπέδου σε συνδυασμό με μια μεταφορά Hohmann για να αλλάξετε αποτελεσματικά το μέγεθος και τον προσανατολισμό της τροχιάς.
- Προσδιορίζετε το  $\Delta V$  που απαιτείται για απλές και σύνθετες αλλαγές στο επίπεδο.

Μέχρι τώρα έχουμε δει πως αλλάζουμε το μέγεθος μιας τροχιάς χρησιμοποιώντας τη μεταφορά Hohmann. Ωστόσο, περιορίσαμε τη μεταφορά αυτή σε συνεπίπεδες τροχιές. Όπως θα περίμενε κανείς, για να αλλάξει το τροχιακό επίπεδο, ενός διαστημικού σκάφους θα πρέπει η μεταβολή στην ταχύτητά του ( $\Delta V$ ) να μην είναι παράλληλη στο τρέχον επίπεδο. Αλλάζοντας το τροχιακό επίπεδο, μεταβάλλεται επίσης την κλίση της τροχιάς (κλίση,  $i$ ) ή τον ανερχόμενο κόμβο, ανάλογα με το που στην τροχιά γίνεται η εκκίνηση του  $\Delta V$ . Για τις αλλαγές επιπέδου, πρέπει να εξετάσουμε την κατεύθυνση και το μέγεθος των αρχικών και τελικών ταχυτήτων του διαστημικού σκάφους.

Για να κατανοήσετε τις αλλαγές στο επίπεδο, φανταστείτε ότι βρίσκεστε σε ένα αγωνιστικό δρόμο με λωρίδες εξόδου όπως αυτές σε έναν αυτοκινητόδρομο. Αν θέλετε να βγείτε από τον δρόμο, όχι μόνο πρέπει να αλλάξετε την ταχύτητά σας στο επίπεδο, αλλά πρέπει επίσης να μετακινηθείτε πάνω ή κάτω στο επίπεδο του δρόμου; Αυτός ο ελιγμός "έξω από το επίπεδο του δρόμου" απαιτεί περισσότερη ενέργεια σε σχέση με την έξοδο στο ίδιο επίπεδο επειδή τώρα πρέπει να επιταχύνετε ή να επιβραδύνεται ανεβαίνοντας ή κατεβαίνοντας αντίστοιχα την λωρίδα εξόδου. Έτσι, οι ελιγμοί εκτός επιπέδου συνήθως απαιτούν πολύ περισσότερη ενέργεια από τους ελιγμούς στο επίπεδο.

Ας δούμε τους δύο τύπους αλλαγής επιπέδου - απλές και σύνθετες. Η διαφορά μεταξύ των δύο είναι ο τρόπος που αλλάζει το διάνυσμα της τροχιακής ταχύτητας. Για μια απλή αλλαγή επιπέδου μόνο η κατεύθυνση της τροχιακής ταχύτητας αλλάζει. Για μια σύνθετη αλλαγή, μεταβάλλουμε την κατεύθυνση και το μέγεθος της τροχιακής ταχύτητας.

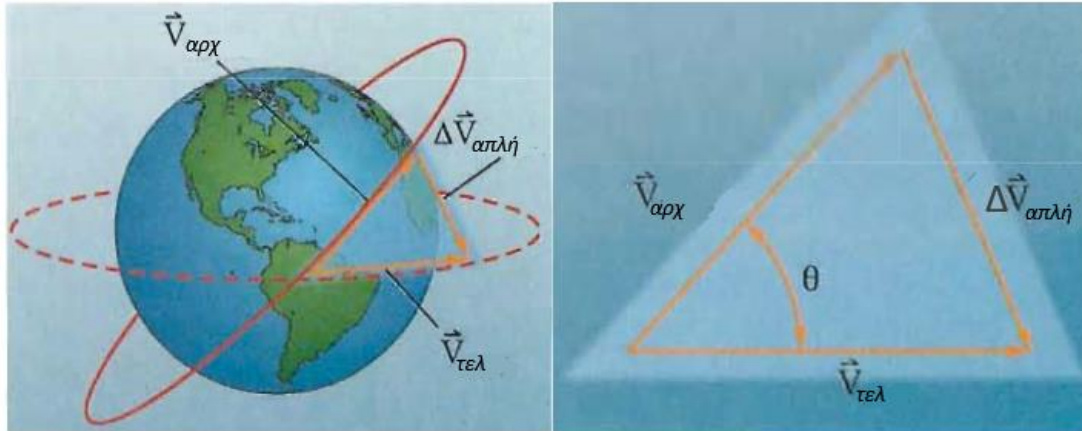
Θα εξετάσουμε πρώτα την απλή αλλαγή επιπέδου.

#### Απλή αλλαγή επιπέδου τροχιάς

Ας φανταστούμε ότι έχουμε ένα διαστημόπλοιο σε τροχιά με κλίση,  $28,5^\circ$ . (κλίση για εκτόξευση προς τα ανατολικά από το διαστημικό κέντρο Kennedy, όπως για το διαστημικό λεωφορείο). Υποθέστε ότι θέλουμε να την αλλάξουμε σε μια ισημερινή τροχιά ( $i = 0^\circ$ ). Πρέπει να αλλάξουμε την ταχύτητα του διαστημικού σκάφους για να το κάνουμε αυτό, μεταβάλλοντας μόνο τον προσανατολισμό της τροχιάς και όχι το μέγεθός της. Αυτό σημαίνει ότι το μέτρο του διανύσματος της ταχύτητας παραμένει το ίδιο -

$$|\vec{V}_{αρχ}| = |\vec{V}_{τελ}| \text{ ενώ η κατεύθυνση μεταβάλλεται.}$$





Σχήμα 125: Αλλαγή Επιπέδου Τροχιάς

Πώς αλλάζουμε μόνο την κατεύθυνση του διανύσματος της ταχύτητας; Κοιτάξτε την κατάσταση στο Σχήμα 125. Μπορείτε να δείτε ότι αρχικά έχουμε μια κεκλιμένη τροχιά με ταχύτητα  $\vec{V}_{\alpha\rho\chi}$  και θέλουμε να περιστρέψουμε την τροχιά κατά γωνία  $9^\circ$  για να φτάσουμε σε μια τελική ταχύτητα,  $\vec{V}_{\tau\epsilon\lambda}$ . Το τρίγωνο των διανυσμάτων που φαίνεται στο σχήμα 125 (δεξιά) συνοψίζει αυτό το πρόβλημα. Πρόκειται για ισοσκελές τρίγωνο. Χρησιμοποιώντας την γεωμετρία καταλήγουμε στη σχέση για την  $\Delta V_{\alpha\pi\lambda\eta}$  :

$$\Delta V_{\alpha\pi\lambda\eta} = 2V_{\alpha\rho\chi} \sin\left(\frac{\theta}{2}\right) \quad (7-48)$$

Όπου

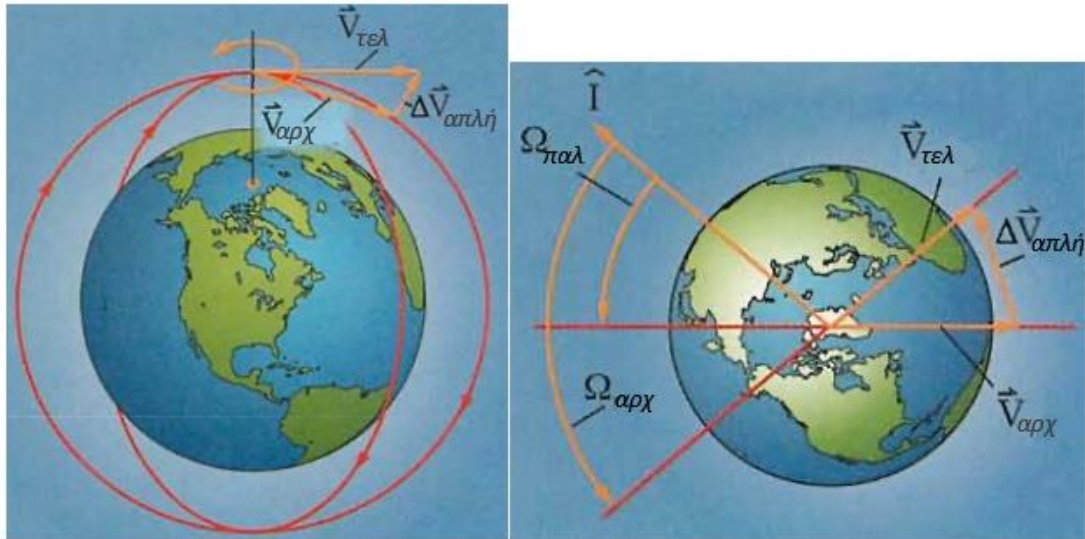
$\Delta V_{\alpha\pi\lambda\eta}$ : μεταβολή ταχύτητας για απλή αλλαγή επιπέδου (km/s)

$V_{\alpha\rho\chi} = V_{\tau\epsilon\lambda}$ : ταχύτητα στην αρχική και τελική τροχιά (km/s)

$\theta$ : γωνία μεταξύ επιπέδων (μοίρες ή ακτίνια)

Αν θέλουμε να αλλάξουμε μόνο την κλίση της τροχιάς, πρέπει να αλλάξουμε την ταχύτητα είτε στον ανερχόμενο κόμβο είτε στον φθίνοντα κόμβο. Όταν η μεταβολή  $\Delta V$  ξεκινά σε έναν από αυτούς τους κόμβους, η τροχιά περιστρέφεται γύρω από τη γραμμή που συνδέει τους δύο κόμβους, μεταβάλλοντας έτσι μόνο την κλίση.

Μπορούμε επίσης να χρησιμοποιήσουμε μια αλλαγή επιπέδου για να αλλάξουμε την ορθή άνοδο του ανοδικού κόμβου,  $\Omega$ . Αυτό μπορεί να είναι χρήσιμο αν θέλουμε ένας δορυφόρος τηλεπισκόπησης να περάσει πάνω από ένα συγκεκριμένο σημείο της Γης σε μια συγκεκριμένη ώρα της ημέρας. Όταν εξετάζουμε μια πολική τροχιά ( $i = 90^\circ$ ), βλέπουμε ότι μια  $\Delta V_{\alpha\pi\lambda\eta}$  στο βόρειο ή νότιο πόλο αλλάζει μόνο τον ανερχόμενο κόμβο, όπως απεικονίζεται στο Σχήμα 126. Μπορούμε επίσης να αλλάξουμε το  $\Omega$  για κλίσεις διαφορετικές από  $90^\circ$ . Το τέχνασμα είναι να εκτελέσουμε την  $\Delta V_{\alpha\pi\lambda\eta}$  στο σημείο που τέμνεται η αρχική με την τελική τροχιά. (Σκεφτείτε τον ελιγμό αυτό ως μια περιστροφή γύρω από μια γραμμή που συνδέει το σημείο εκκίνησης της  $\Delta V$  με το κέντρο της Γης.) Δεν θα εξετάσουμε με περισσότερες λεπτομέρειες αυτές τις περιπτώσεις γιατί η σφαιρική τριγωνομετρία είναι λίγο περίπλοκη για τη συζήτησή μας εδώ.



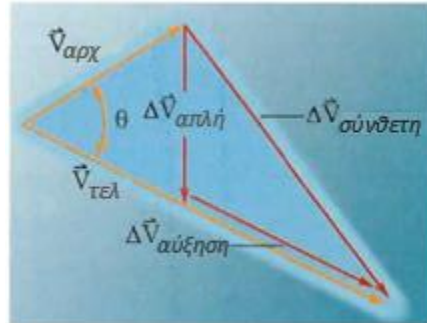
Σχήμα 126: Αλλαγή Ορθής Ανόδου του Ανοδικού Κόμβου

Το μέγεθος της ταχύτητας που χρειάζεται ένα διαστημικό σκάφος για να αλλάξει το τροχιακό του επίπεδο εξαρτάται από δύο πράγματα - τη γωνία  $\theta$  και την αρχική του ταχύτητα. Καθώς αυξάνεται η γωνία που περιστρέφεται, τόσο αυξάνεται και η απαιτούμενη  $\Delta V_{\alpha\pi\lambda\eta}$ . Για παράδειγμα, όταν η γωνία αυτή είναι  $60^\circ$ , το τρίγωνο των διανυσμάτων γίνεται ισόπλευρο (όλες οι πλευρές είναι ίσες). Σε αυτή την περίπτωση, το  $\Delta V_{\alpha\pi\lambda\eta}$  ισούται με την αρχική ταχύτητα, η οποία είναι η ποσότητα της ταχύτητας που χρειάζεται για να μπει αρχικά το διαστημικό σκάφος στην τροχιά! Αυτός είναι ο λόγος για τον οποίο θα θέλαμε η αρχική τροχιά στάθμευσης να έχει κλίση όσο το δυνατόν πιο κοντά στην τελική τροχιά της αποστολής.

Επίσης, παρατηρήστε ότι η  $\Delta V_{\alpha\pi\lambda\eta}$  αυξάνεται καθώς η αρχική ταχύτητα αυξάνεται. Επομένως, μπορούμε να μειώσουμε το  $\Delta V_{\alpha\pi\lambda\eta}$  μειώνοντας την αρχική ταχύτητα. Για μια κυκλική τροχιά η ταχύτητα είναι σταθερή σε όλη την τροχιά, αλλά γνωρίζουμε ότι ένα διαστημικό σκάφος σε μια ελλειπτική τροχιά επιβραδύνεται καθώς πλησιάζει το απόγειο. Έτσι, αν μπορούμε να επιλέξουμε που να κάνουμε μια απλή αλλαγή επιπέδου σε μια ελλειπτική τροχιά, θα επιλέξουμε να την κάνουμε στο απόγειο, όπου η ταχύτητα του διαστημικού σκάφους είναι πιο αργή. Θυμηθείτε την προηγούμενη αναλογία μας σχετικά με την αλλαγή ταχύτητας και τις κατευθύνσεις σε έναν δρόμο. Είναι πιο εύκολο να αλλάξουμε την κατεύθυνση μας όταν πηγαίνουμε πιο αργά. Το παράδειγμα 6-2 δείχνει μια απλή αλλαγή επιπέδου.

### Σύνθετη αλλαγή επιπέδου τροχιάς

Ας υποθέσουμε ότι το διαστημικό σκάφος βρίσκεται σε τροχιά στάθμευσης χαμηλού υψόμετρου με  $i = 28,5^\circ$  και πρέπει να μεταφερθεί σε μια γεωστατική τροχιά ( $R = 42,160\text{km}$ ,  $i = 0^\circ$ ). Αυτή η μεταφορά θέτει δύο προβλήματα: αλλαγή του μεγέθους της τροχιάς και αλλαγή του προσανατολισμού του τροχιακού επιπέδου. Ίσως μπόουμε στον πειρασμό να αντιμετωπίσουμε αυτό το πρόβλημα σε δύο μέρη - μια μεταφορά Hohmann ακολουθούμενη από μια απλή αλλαγή αεροπλάνου. Αυτή η προσέγγιση χρειάζεται τρεις μεταβολές  $\Delta V$ . Θα μπορούσαμε να πετύχουμε το ίδιο αποτέλεσμα με δύο μεταβολές  $\Delta V$  και να εξοικονομήσουμε καύσιμα. Πως; Συνδυάζοντας τη  $\Delta V$  της αλλαγής επιπέδου με τη  $\Delta V$  της μεταφοράς Hohmann για να πάρουμε έναν ελιγμό. Αυτή την κίνηση την ονομάζουμε σύνθετη αλλαγή επιπέδου.



Σχήμα 127: Σύνθετη αλλαγή επιπέδου τροχιάς

Εάν σχεδιάζουμε ένα διάγραμμα αυτού του προβλήματος, όπως στο Σχήμα 127, μπορούμε να δούμε ότι το  $\Delta V_{\text{σύνθετη}}$  είναι το αθροιστικό των διανυσμάτων  $\Delta V_{\text{απλή}}$  και  $\Delta V_{\text{αύξηση}}$  (από τη μεταφορά Hohmann). Αυτά τα τρία  $\Delta V$  αποτελούν ένα τρίγωνο με την  $\Delta V_{\text{σύνθετη}}$  ως υποτεινούσα. Μπορείτε να ανακαλέσετε από τη γεωμετρία ότι το άθροισμα οποιωνδήποτε δύο πλευρών ενός τριγώνου είναι μεγαλύτερο από την τρίτη πλευρά. Αυτό σημαίνει:

$$|\Delta \vec{V}_{\text{σύνθετη}}| < |\Delta \vec{V}_{\text{απλή}}| + |\Delta \vec{V}_{\text{αύξηση}}| \quad (7-49)$$

Αυτό σημαίνει ότι είναι πάντοτε πιο οικονομικό (από την άποψη του  $\Delta V$ ) να πραγματοποιηθεί μια σύνθετη αλλαγή επιπέδου απ' ό,τι να γίνει μια απλή αλλαγή που ακολουθείται από μεταφορά Hohmann. Για να βρούμε την αναγκαία αλλαγή ταχύτητας:

$$\Delta \vec{V}_{\text{σύνθετη}} = \sqrt{|\vec{V}_{\alpha\rho\chi}|^2 + |\vec{V}_{\tau\epsilon\lambda}|^2 - 2|\vec{V}_{\alpha\rho\chi}||\vec{V}_{\tau\epsilon\lambda}|\cos \theta} \quad (7-50)$$

Χρησιμοποιώντας αυτή την εξίσωση, διαπιστώνουμε ότι είναι πιο οικονομικό να κάνουμε μια σύνθετη αλλαγή επιπέδου με μικρότερες ταχύτητες όπως βρήκαμε για την απλή αλλαγή επιπέδου. Άρα, ποιος είναι ο πιο οικονομικός τρόπος για να κάνουμε μια μεταφορά Hohmann με αλλαγή επιπέδου; Για την περίπτωση που πηγαίνουμε από μικρότερη σε μεγαλύτερη τροχιά, θα πρέπει να ξεκινήσουμε τη μεταφορά Hohmann ( $\Delta V_{\text{αύξηση}}$ ) στο χαμηλότερο υψόμετρο διατηρώντας παράλληλα την ίδια κλίση. Στη συνέχεια, θα πρέπει να εκτελέσουμε τη σύνθετη αλλαγή επιπέδου στο απόγειο της τροχιάς μεταφοράς, ολοκληρώνοντας τη μεταφορά Hohmann και την αλλαγή του επιπέδου σε μια κίνηση  $\Delta V$ .

Ο Πίνακας 5 συνοψίζει τις τέσσερις επιλογές για μεταφορά από χαμηλή τροχιά κλίσης  $28^\circ$  σε γεωστατική τροχιά. Δείχνει ότι η εκκίνηση της μεταφοράς Hohmann αρχίζει όταν το διαστημικό σκάφος βρίσκεται πλησιέστερα στη Γη και τελειώνει με τη σύνθετη αλλαγή επιπέδου στο απόγειο (περίπτωση 4) τότε έχουμε την πιο οικονομική από άποψη  $\Delta V$  αλλαγή. Τα δεδομένα του πίνακα 5 βασίζονται στο εξής παράδειγμα:

- $R_{\text{τροχιά}_1} = 6570\text{km}$
- $R_{\text{τροχιά}_2} = 42160\text{km}$
- $i_{\text{τροχιά}_1} = 28^\circ$
- $i_{\text{τροχιά}_2} = 0^\circ$
- Υπολογίστε :  $\Delta V_{\text{ολική}}$
-

Περίπτωση 1	Περίπτωση 2	Περίπτωση 3	Περίπτωση 4
Αλλαγή επιπέδου τροχιάς 28°. Μετά, μεταφορά Hohmann, $\Delta V_1$ και $\Delta V_2$	Μεταφορά Hohmann, $\Delta V_1$ και $\Delta V_2$ . Μετά, αλλαγή επιπέδου τροχιάς 28°	Σύνθετη αλλαγή επιπέδου τροχιάς στο περίγειο στην τροχιά μεταφοράς. Μετά $\Delta V_2$ Hohmann	Μεταφορά Hohmann, $\Delta V_1$ . Σύνθετη αλλαγή επιπέδου τροχιάς στο απόγειο στην τροχιά μεταφοράς
$\Delta V_{απλή}=3.77$ km/s (τροχιά 1)	$\Delta V_{Hohmann}=3.94$ km/s	$\Delta V_{σύνθετη}=4.98$ km/s (περίγειο)	$\Delta V_1=2.46$ km/s
$\Delta V_{Hohmann}=3.94$ km/s	$\Delta V_{απλή}=1.49$ km/s (τροχιά 2)	$\Delta V_2=1.47$ km/s	$\Delta V_{σύνθετη}=1.82$ km/s (απόγειο)
$\Delta V_{ολική}=7.7$ km/s	$\Delta V_{ολική}=5.43$ km/s	$\Delta V_{ολική}=6.46$ km/s	$\Delta V_{ολική}=4.29$ km/s

**Πίνακας 5: Περιπτώσεις Διαφορετικών ελιγμών για μεταφορά από χαμηλή τροχιά κλίσης 28° σε γεωστατική τροχιά**

### Παράδειγμα 7-8

Υπολογίστε την  $\Delta V_{απλή}$  για έναν δορυφόρο με τα δεδομένα:  $υψόμετρο = 250km$ ,  $i_{αρχ} = 28^\circ$ ,  $i_{τελ} = 57^\circ$

Λύση

Λύνουμε ως προς την ενέργεια και την ταχύτητα:

$$\varepsilon = -\frac{\mu}{2a} = -\frac{\mu}{2R} = -30.069 km^2/s^2$$

$$\varepsilon = \frac{V_{αρχ}^2}{2} - \frac{\mu}{R}$$

$$V_{αρχ} = \sqrt{\frac{2\mu}{R} + \varepsilon} = 7.755 km/s$$

Υπολογίζουμε τη γωνία  $\theta$ :

$$\theta = |i_{τελ} - i_{αρχ}| = |57^\circ - 28^\circ| = 29^\circ$$

Υπολογίζουμε τη μεταβολή της ταχύτητας για την απλή αλλαγή επιπέδου:

$$\Delta V_{απλή} = 2V_{αρχ} \sin\left(\frac{\theta}{2}\right) = 3.88 km/s$$

### 7.12 Τροχιακά Ραντεβού

Σε αυτή την ενότητα θα μάθετε να:

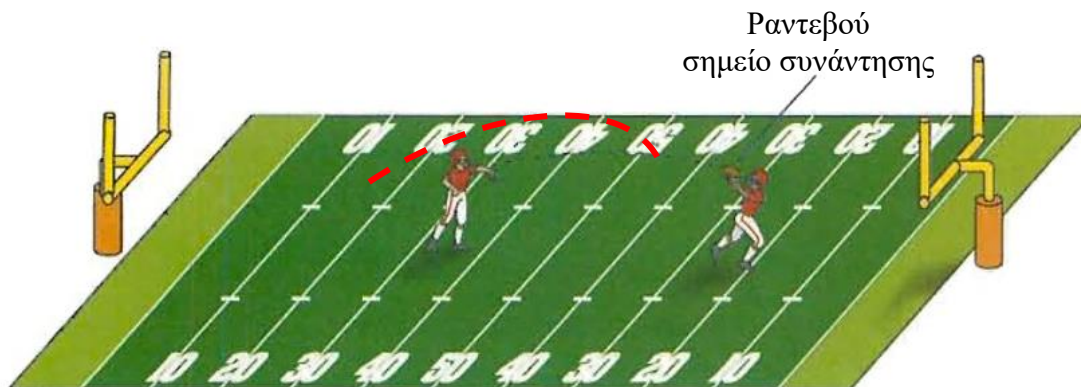
- Περιγράφετε το τροχιακό ραντεβού
- Καθορίζετε το  $\Delta V$  και τον χρόνο αναμονής για να εκτελέσετε ένα ραντεβού

Για τη μεταφορά Hohmann και τις αλλαγές επιπέδου που περιγράψαμε προηγουμένως σε αυτό το κεφάλαιο, εστιάσαμε στο πώς να μετακινήσουμε ένα διαστημικό σκάφος χωρίς να εξετάσουμε το πού βρίσκεται σε σχέση με άλλα διαστημικά οχήματα. Ωστόσο, αρκετοί τύποι αποστολών απαιτούν ένα

διαστημικό σκάφος να συναντηθεί με ένα άλλο, πράγμα που σημαίνει ότι ένα διαστημικό σκάφος πρέπει να φτάσει στον ίδιο χώρο ταυτόχρονα με ένα δεύτερο. Το πρόγραμμα Gemini τελειοποίησε αυτόν τον ελιγμό στη δεκαετία του 1960, σαν ένα προοίμιο για τις αποστολές Apollo στη Σελήνη, που προϋπέθεταν την ανάγκη σύνδεσης-ραντεβού διαστημικών οχημάτων σε τροχιά. Δύο αστροναύτες που επέστρεφαν από την επιφάνεια της Σελήνης έπρεπε να συναντηθούν με άλλο διαστημικό σκάφος που ήταν ήδη σε τροχιά ώστε να επιστρέψουν στη Γη. Ως ένα άλλο παράδειγμα, το διαστημικό λεωφορείο έπρεπε να συναντηθεί με τον Διεθνή Διαστημικό Σταθμό για να μεταφέρει τους ανθρώπους και τον εξοπλισμό. Σε αυτή την ενότητα, θα εξετάσουμε δύο απλά σενάρια ραντεβού μεταξύ συν-επίπεδων και συν-τροχιακών διαστημικών οχημάτων.

### Συν-επίπεδα ραντεβού

Ο απλούστερος τύπος ραντεβού χρησιμοποιεί μια μεταφορά Hohmann μεταξύ των συν-επίπεδων τροχιών. Το κλειδί είναι η χρονική στιγμή. Για να αποφασίσουμε πότε πρέπει να πυροδοτήσουμε τους κινητήρες, πρέπει να υπολογίσουμε πόσο μετακινείται το διαστημικό σκάφος που θέλουμε να συναντήσουμε, ακριβώς όπως ένας αμυντικός παίκτη υπολογίζει τη θέση του επιθετικού παίκτη σε παιχνίδι ποδοσφαίρου όταν του πετά τη μπάλα. Με το σφύριγμα ο επιθετικός αρχίζει να τρέχει κατ' ευθείαν προς τη γραμμή του τέρματος, όπως φαίνεται στο Σχήμα 128. Ο αμυντικός υπολογίζει διανοητικά πόσο γρήγορα ο επιθετικός τρέχει και πόσο χρόνο χρειάζεται η μπάλα για να φτάσει σε ένα συγκεκριμένο σημείο στο γήπεδο. Όταν ο αμυντικός απελευθερώσει την μπάλα, θα χρειαστεί λίγος χρόνος για να φτάσει σε αυτό το σημείο. Κατά την ίδια χρονική περίοδο, ο επιθετικός μετακινείται από το σημείο που βρισκόταν όταν η μπάλα απελευθερώθηκε από τα χέρια του αμυντικού στο σημείο "ραντεβού" με την μπάλα.



Σχήμα 128: Σημείο συνάντησης επιθετικού-μπάλας (ραντεβού)

Ας δούμε πιο αναλυτικά το παράδειγμα του ποδοσφαίρου για να δούμε πως ο αμυντικός αποφασίζει πότε να ρίξει την μπάλα έτσι ώστε να "συναντηθεί" με τον επιθετικό. Ας υποθέσουμε ότι έχουμε έναν αμυντικό που πετάει τη μπάλα στα 20yd (όπου yd είναι η γυάρδα που είναι ίση με 0.914m) με ταχύτητα 10yd/s και έναν επιθετικό που τρέχει με ταχύτητα 4yd/s. (χρησιμοποιούμε τις αγγλικές μονάδες για να περιγράψουμε το αμερικανικό ποδόσφαιρο (!) ) Πόσο χρόνο πρέπει ο αμυντικός να περιμένει από το σφύριγμα πριν πετάξει την μπάλα (υποθέτοντας ότι ο επιθετικός αρχίζει να τρέχει αμέσως); Για να αναλύσουμε αυτό το πρόβλημα, ας ορίσουμε τα ακόλουθα:

$$V_{\text{επιθ}} = 4\text{yd/s}$$

$$V_{\text{μπάλας}} = 10\text{yd/s}$$

Γνωρίζουμε ότι ο επιθετικός προηγείται του αμυντικού. Αυτό σημαίνει ότι ο επιθετικός θα καλύψει κάποια απόσταση καθώς η μπάλα βρίσκεται στον αέρα. Πόσο χρόνο θα χρειαστεί η μπάλα για να μετακινηθεί 20yd από τον αμυντικό στον επιθετικό; Ας ορίσουμε:

$$TOF_{\mu\beta\alpha\lambda\alpha\varsigma} = \text{χρόνος πτήσης (time of flight)} = \frac{\text{απόσταση}_{\mu\beta\alpha\lambda\alpha\varsigma}}{V_{\mu\beta\alpha\lambda\alpha\varsigma}} = 2s$$

Η απόσταση προπόρευσης ισούται με την ταχύτητα του επιθετικού επί τον χρόνο που παραμένει η μπάλα στον αέρα:

$$a = V_{\text{επιθ}} \cdot TOF_{\mu\beta\alpha\lambda\alpha\varsigma} = 8yd$$

Αυτό σημαίνει ότι ο επιθετικός τρέχει επιπλέον 8yd ενώ η μπάλα είναι στον αέρα. Έτσι, μπορούμε να υπολογίσουμε πόσο νωρίτερα χρειάζεται να ξεκινήσει ο επιθετικός πριν ο αμυντικός ρίξει την μπάλα. Εάν ο δέκτης τρέχει 8yd ενώ η μπάλα είναι στον αέρα, και η μπάλα ρίχνεται με 20yd/s, τότε ο επιθετικός χρειάζεται να έχει καλύψει:

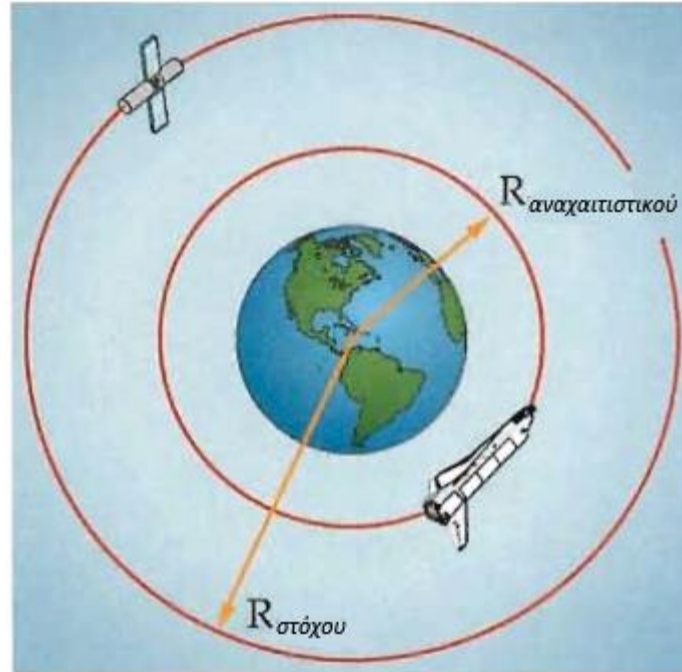
$$\varphi_{\text{εκκίνησης}} = 20yd - a = 12yd$$

Άρα, προτού ο αμυντικός ρίξει τη μπάλα, ο επιθετικός πρέπει να καλύψει απόσταση 12yd. Υπολογίζουμε έτσι τον χρόνο που χρειάζεται ο επιθετικός για να καλύψει αυτή την απόσταση από:

$$W.T = \text{χρόνος αναμονής (wait time)} = \frac{\varphi_{\text{εκκίνησης}}}{V_{\text{επιθ}}} = 3s$$

Αυτή είναι ο χρόνος που πρέπει να περιμένει ο αμυντικός πριν πετάξει την μπάλα για να εξασφαλίσει ότι ο επιθετικός θα βρίσκεται στο σημείο συνάντησης όταν φτάσει η μπάλα.

Όλα αυτά ισχύουν για τους ποδοσφαιριστές, αλλά τι γίνεται με το διαστημικό σκάφος που προσπαθεί να συναντήσει (ή να αναχαιτίσει) ένα άλλο στο διάστημα; Αποδεικνύεται ότι η προσέγγιση είναι η ίδια όπως στο ποδοσφαιρικό πρόβλημα. Ας δούμε τη γεωμετρία του προβλήματος «ραντεβού» που φαίνεται στο σχήμα 129. Έχουμε το διαστημικό σκάφος στο οποίο θέλουμε να φτάσουμε (ας υποθέσουμε ένα δορυφόρο επικοινωνίας με βλάβη που πρέπει να επιδιορθώσουμε) και το διαστημικό λεωφορείο στο οποίο βρισκόμαστε. Σε αυτό το παράδειγμα, το διαστημικό σκάφος «στόχος» βρίσκεται σε υψηλότερη τροχιά από το διαστημικό λεωφορείο, αλλά θα ακολουθούσαμε παρόμοια προσέγγιση αν ήταν σε χαμηλότερη τροχιά. Για το ραντεβού, το πλήρωμα του διαστημικού λεωφορείου πρέπει να προκαλέσει ένα ΔV για να μεταφερθεί στο σημείο συνάντησης. Αλλά αυτό πρέπει να γίνει την κατάλληλη στιγμή για να εξασφαλιστεί ότι το διαστημικό σκάφος «στόχος» φτάνει στο ίδιο σημείο την ίδια στιγμή.



**Σχήμα 129: Πρόβλημα συνάντησης/ραντεβού. Το διαστημικό λεωφορείο πρέπει να ‘αναχαιτίσει’ τον στόχο, που είναι ένας τηλεπικοινωνιακός δορυφόρος**

Για να δείτε πώς να λύσετε αυτό το πρόβλημα, θυμηθείτε ότι ο αμυντικός έπρεπε πρώτα να γνωρίζει την ταχύτητα του επιθετικού και της μπάλας. Επειδή οι μπάλες ποδοσφαίρου κινούνται σε σχεδόν σε ευθεία γραμμή, οι ταχύτητές τους είναι εύκολο να υπολογιστούν. Ωστόσο, για τα διαστημικά σκάφη σε τροχιές, οι ταχύτητες δεν είναι τόσο απλές. Αντί να χρησιμοποιούμε μια γραμμική ταχύτητα (σε μέτρα ανά δευτερόλεπτο), χρησιμοποιούμε περιστροφική ταχύτητα που μετράτε σε ακτίνια ανά δευτερόλεπτο ή σε μοίρες ανά ώρα. Ονομάζουμε αυτή την ταχύτητα περιστροφής "γωνιακή ταχύτητα" και χρησιμοποιούμε το  $\omega$  για το συμβολισμό. Επειδή τα διαστημικά σκάφη κινούνται  $360^\circ$  (ή  $2\pi$  rad) σε μια τροχιακή περίοδο, βρίσκουμε τη γωνιακή ταχύτητά τους από:

$$\omega = \frac{2\pi}{2\pi \sqrt{\frac{\alpha^3}{\mu}}}$$

$$\omega = \sqrt{\frac{\mu}{\alpha^3}} \quad (7-51)$$

Όπου

$\omega$ : γωνιακή ταχύτητα διαστημικού σκάφους (rad/s)

$\mu$ : βαρυτική παράμετρος ( $\text{km}^3/\text{s}^3$ )= $3.98 \times 10^5 \text{ km}^3/\text{s}^2$  για τη Γη

$\alpha$ : μεγάλος ημιάξονας (km)

Για κυκλικές τροχιές,  $\alpha=R$  οπότε η γωνιακή ταχύτητα παραμένει σταθερή. Για να λύσουμε το ποδοσφαιρικό πρόβλημα, έπρεπε να βρούμε τον χρόνο πτήσης της μπάλας. Για τα τροχιακά ραντεβού, ο χρόνος της πτήσης είναι ο ίδιος με τον χρόνο πτήσης της μεταφοράς Hohmann που βρήκαμε νωρίτερα:

$$TOF = \frac{P}{2} = \pi \sqrt{\frac{\alpha^3_{\text{μεταφ}}}{\mu}} \quad (7-53)$$

Όπου

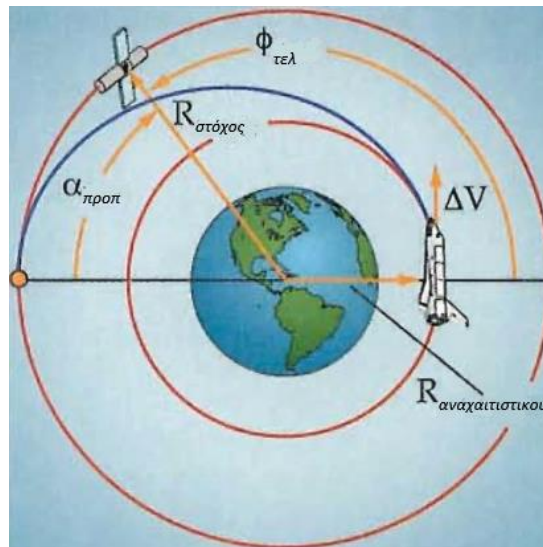
$TOF$ : χρόνος πτήσης/μεταφοράς (s)

$P$ : περίοδος τροχιάς (s)

$\mu$ : βαρυτική παράμετρος ( $\text{km}^3/\text{s}^3$ )= $3.98 \times 10^5 \text{ km}^3/\text{s}^2$  για τη Γη

$\alpha$ : μεγάλος ημιάξονας (km)

Τέλος, πρέπει να επιτύχουμε το σωστό χρόνο. Στο ποδόσφαιρο, ο αμυντικός πρέπει να περιμένει τον επιθετικό για κάποιο χρόνο πριν πετάξει τη μπάλα. Στο τροχιακό ραντεβού, το διαστημικό λεωφορείο πρέπει να σχηματίζει μια συγκεκριμένη γωνία με το διαστημικό σκάφος «στόχος» που ονομάζεται γωνία προπόρευσης  $\alpha_{\text{προπ}}$  τη στιγμή που θα ξεκινήσει τη μεταφορά Hohmann. Αυτή η γωνία που φαίνεται στο σχήμα 130, αντιπροσωπεύει τη γωνιακή απόσταση που καλύπτεται από το «στόχο» κατά τη διάρκεια της πτήσης του διαστημικού λεωφορείου.



Σχήμα 130: Υπολογισμός  $\Delta V$  στον σωστό χρόνο

Τη βρίσκουμε πολλαπλασιάζοντας τη γωνιακή ταχύτητα του «στόχου» με το χρόνο πτήσης του διαστημικού λεωφορείου:

$$\alpha_{\text{προπ}} = \omega_{\text{στόχος}} TOF \quad (7-54)$$

Όπου

$\alpha_{\text{προπ}}$ : γωνία προπόρευσης (rad)

$\omega_{\text{στόχος}}$ : ταχύτητα στόχου (rad/s)

$TOF$ : χρόνος πτήσης (s)

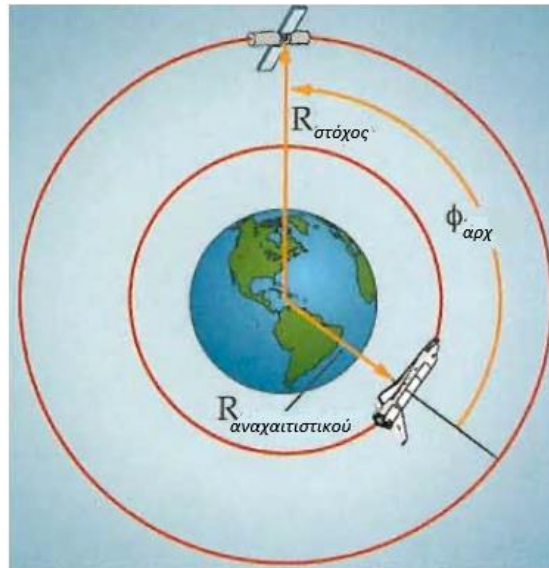
Μπορούμε τώρα να καθορίσουμε πόσο πρέπει να προηγείται ο «στόχος». Για τα διαστημικά σκάφη ορίζουμε τη γωνία φάσης  $\varphi$  που μετράτε από το ακτινικό διάνυσμα του διαστημικού λεωφορείου έως το ακτινικό διάνυσμα του διαστημικού σκάφους «στόχος». Το διαστημικό λεωφορείο ταξιδεύει  $180^\circ$  (π



rad) κατά τη διάρκεια της μεταφοράς Hohmann. Έτσι μπορούμε εύκολα να υπολογίσουμε την απαιτούμενη γωνία φάσης,  $\varphi_{\tau\epsilon\lambda}$  αν γνωρίζουμε τη γωνία προπόρευσης:

$$\varphi_{\tau\epsilon\lambda} = \pi - \alpha_{\pi\rho\sigma\pi} \quad (7-55)$$

Οι πιθανότητες είναι, ότι όταν το διαστημικό λεωφορείο είναι έτοιμο να ξεκινήσει το ραντεβού, ο στόχος δεν θα είναι στη σωστή θέση, όπως φαίνεται στο Σχήμα 131. Οπότε τι κάνουμε; Ακριβώς όπως ένας αμυντικός πρέπει να περιμένει λίγα δευτερόλεπτα προτού απελευθερώσει τη μπάλα, το διαστημικό λεωφορείο πρέπει να περιμένει μέχρι να είναι σωστή η θέση σχετικά με το «στόχο», όπως στο Σχήμα 131.



Σχήμα 131: Αρχική Κατάσταση Ελιγμού Συνάντησης/Ραντεβού

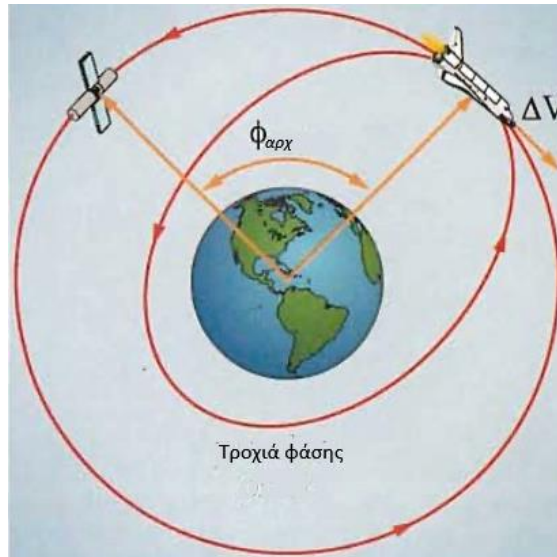
Αλλά πόσο χρόνο πρέπει να περιμένει; Για να απαντήσουμε σε αυτό, πρέπει να συσχετίσουμε που ο στόχος βρίσκεται αρχικά (σε σχέση με το διαστημικό λεωφορείο),  $\varphi_{\alpha\rho\chi}$ , με το σημείο που το διαστημικό λεωφορείο πρέπει να είναι όταν ξεκινήσει η ΔV,  $\varphi_{\tau\epsilon\lambda}$ . Επειδή τα διαστημικά σκάφη κινούνται σε κυκλικές τροχιές με σταθερές ταχύτητες:

$$\varphi_{\tau\epsilon\lambda} = \varphi_{\alpha\rho\chi} + (\omega_{\sigma\tau\acute{o}\chi\omicron\varsigma} - \omega_{\delta\iota\alpha\sigma\tau.\lambda\epsilon\omega\phi.})W.T \quad (7-56)$$

Αν κοιτάξουμε την εξίσωση χρόνου αναμονής, βλέπουμε ότι ο χρόνος αναμονής μπορεί να είναι μικρότερος από το μηδέν. Επειδή το διαστημικό λεωφορείο και ο «στόχος» κινούνται κυκλικά, η σωστή γωνιακή σχέση επαναλαμβάνεται περιοδικά. Όταν η διαφορά μεταξύ των  $\varphi_{\tau\epsilon\lambda}$  και  $\varphi_{\alpha\rho\chi}$  μεταβάλλεται κατά  $2\pi$  επαναλαμβάνονται οι σωστές αρχικές συνθήκες. Για να υπολογίσουμε την επόμενη διαθέσιμη ευκαιρία να ξεκινήσουμε ένα ραντεβού, είτε προσθέτουμε  $2\pi$  είτε αφαιρούμε  $2\pi$  από τον αριθμητή της προηγούμενης εξίσωσης (όποιο από τα δύο χρειάζεται για να κάνει τον χρόνο αναμονής θετικό). Στην πραγματικότητα, μπορούμε να προσδιορίσουμε τις μελλοντικές ευκαιρίες ραντεβού προσθέτοντας ή αφαιρώντας πολλαπλάσια του  $2\pi$ .

### Συν-τροχιακά Ραντεβού

Ένα ακόμα πρόβλημα ραντεβού εμφανίζεται όταν το διαστημικό σκάφη είναι συν-τροχιακά, που σημαίνει ότι ο «στόχος» και το διαστημικό λεωφορείο βρίσκονται στην ίδια τροχιά, με το ένα μπροστά από το άλλο. Όταν ο «στόχος» είναι μπροστά, όπως φαίνεται στο Σχήμα 132, και το διαστημικό λεωφορείο πρέπει να πιάσει με κάποιο τρόπο στο «στόχο». Για να γίνει αυτό, το διαστημικό λεωφορείο πρέπει να μετακινηθεί σε μια τροχιά αναμονής ή τροχιάς απόσυρσης, με την οποία θα επιστρέψει στην ίδια θέση μία τροχιά αργότερα. Παρατηρήστε ότι ο στόχος ταξιδεύει λιγότερο από  $360^\circ$ , ενώ το διαστημικό λεωφορείο ταξιδεύει ακριβώς  $360^\circ$ .



Σχήμα 132: Επιβράδυνση πριν την Αύξηση της ταχύτητας

Πώς μπορεί το ένα διαστημικό σκάφος να συναντήσει το άλλο που βρίσκεται μπροστά του στην ίδια τροχιά; Επιβραδύνοντας! Βγάζει νόημα; Ναι, από την ειδική μηχανική ενέργεια, γνωρίζουμε ότι εάν ένα διαστημικό σκάφος επιβραδύνει, μειώνει την ενέργεια και εισέρχεται σε μια μικρότερη τροχιά. Μια μικρότερη τροχιά έχει μικρότερη περίοδο, οπότε ολοκληρώνεται σε λιγότερο χρόνο. Εάν επιβραδύνει όπως πρέπει, θα επιστρέψει εκεί που ξεκίνησε ακριβώς όταν ο στόχος φτάσει εκεί.

Για να προσδιορίσουμε την επιβράδυνση του, πρέπει πρώτα να βρούμε πόσο πρέπει να ταξιδέψει ο στόχος για να φτάσει στην τρέχουσα θέση του διαστημικού λεωφορείου. Εάν ο στόχος είναι μπροστά από το διαστημικό λεωφορείο κατά  $\varphi_{αρχ}$  τότε πρέπει να διανύσει γωνία  $\varphi_{μετακ}$  ώστε να φτάσει στο σημείο του ραντεβού:

$$\varphi_{μετακ} = 2\pi - \varphi_{αρχ} \quad (7-57)$$

Όπου

$\varphi_{μετακ}$ : γωνία μετακίνησης ή η γωνία που διανύει ο στόχος για να φτάσει τη σημείο του τροχιακού ραντεβού (rad)

Αν γνωρίζουμε τη γωνιακή ταχύτητα του στόχου μπορούμε να υπολογίσουμε τον χρόνο που χρειάζεται για να διανύσει τη γωνία αυτή ως:

$$TOF = \frac{\varphi_{μετακ}}{\omega_{στόχος}} \quad (7-58)$$

Θυμηθείτε ότι :

$$\omega_{\text{στόχος}} = \sqrt{\mu / \alpha^3_{\text{στόχος}}}$$

Επειδή ο χρόνος πτήσης ισούται με τη περίοδο της τροχιάς αναμονής εξισώνουμε :

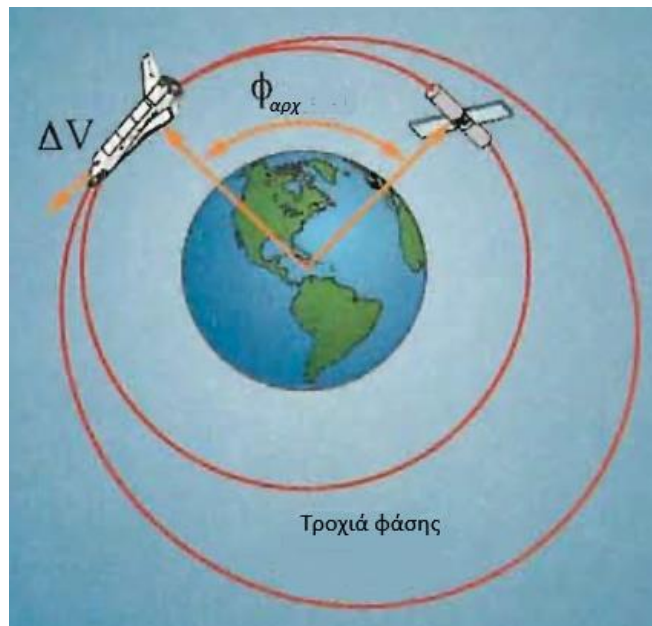
$$TOF = \frac{\varphi_{\text{μετακ}}}{\omega_{\text{στόχος}}} = 2\pi \sqrt{\frac{\alpha^3_{\text{αναμ}}}{\mu}} \quad (7-59)$$

Και λύνουμε ως προς τον μεγάλο ημιάξονα της τροχιάς αναμονής:

$$\alpha_{\text{αναμ}} = \sqrt[3]{\mu \left( \frac{\varphi_{\text{μετακ}}}{2\pi\omega_{\text{στόχος}}} \right)^2} \quad (7-60)$$

Γνωρίζοντας το μέγεθος της τροχιάς αναμονής, μπορούμε να υπολογίσουμε τα απαραίτητα  $\Delta V$  για το ραντεβού. Το πρώτο  $\Delta V$  επιβραδύνει το διαστημικό λεωφορείο και το τοποθετεί στην τροχιά αναμονής. Το δεύτερο  $\Delta V$  το επιστρέφει στην αρχική τροχιά, ακριβώς δίπλα στο στόχο. Αυτά τα  $\Delta V$  έχουν το ίδιο μέγεθος, οπότε δεν χρειάζεται να υπολογίσουμε το δεύτερο.

Πρέπει επίσης να γνωρίζουμε πώς να πραγματοποιούμε ένα ραντεβού όταν ο στόχος βρίσκεται πίσω από το διαστημικό λεωφορείο στην ίδια τροχιά. Σε αυτή την περίπτωση, η γωνιακή απόσταση που πρέπει να καλύψει ο στόχος για να φτάσει στο σημείο συνάντησης είναι μεγαλύτερο από  $360^\circ$ . Επομένως, η τροχιά αναμονής του διαστημικού λεωφορείου θα έχει περίοδο μεγαλύτερη από εκείνη της τρέχουσας κυκλικής τροχιάς του. Για να εισέλθει σε αυτή την τροχιά αναμονής, το διαστημικό λεωφορείο επιταχύνεται και εισέρχεται σε μια υψηλότερη, πιο αργή τροχιά, επιτρέποντας στο στόχο να καλύψει τη διαφορά, όπως απεικονίζεται στο Σχήμα 133.

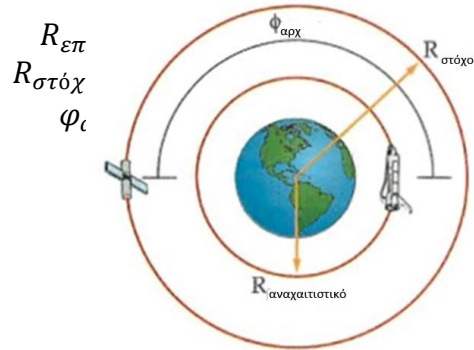


Σχήμα 133: Επιτάχυνση και μετά ελάττωση της ταχύτητας

**Παράδειγμα 7-9**

Φανταστείτε ότι ένα διαστημικό σκάφος επιδιόρθωσης (δείκτης «επιδ») σε χαμηλή τροχιά χρειάζεται να συναντήσει ένα διαστημικό σκάφος με κάποια βλάβη (δείκτης «στόχος») σε μια γεωσύγχρονη τροχιά. Εάν η αρχική γωνία μεταξύ των δύο διαστημικών σκαφών είναι  $180^\circ$ , πόσο χρονικό διάστημα πρέπει να περιμένει το σκάφος επιδιόρθωσης πριν ξεκινήσει το ραντεβού;

Δεδομένα:



Λύση

Υπολογίζουμε τον μεγάλο ημιάξονα της τροχιάς μεταφοράς:

$$\alpha_{\text{μεταφ}} = \frac{R_{\text{επιδ}} + R_{\text{στόχος}}}{2} = 24.365 \text{ km}$$

Υπολογίζουμε το χρόνο πτήσης TOF της τροχιάς μεταφοράς:

$$TOF = \pi \sqrt{\frac{\alpha_{\text{μεταφ}}^3}{\mu}} = 18.925 \text{ s}$$

Υπολογίζουμε τις γωνιακές ταχύτητες:

$$\omega_{\text{επιδ}} = \sqrt{\frac{\mu}{R_{\text{επιδ}}^3}} = 0.0012 \text{ rad/s}$$

$$\omega_{\text{στόχος}} = \sqrt{\frac{\mu}{R_{\text{στόχος}}^3}} = 0.000073 \text{ rad/s}$$

Υπολογίζουμε τη γωνία προπόρευσης:

$$\alpha_{\text{προπ}} = \omega_{\text{στόχος}} TOF = 1.38 \text{ rad}$$

Υπολογίζουμε τη γωνία  $\varphi_{\text{τελ}}$ :

$$\varphi_{\text{τελ}} = \pi - \alpha_{\text{προπ}} = 1.76 \text{ rad}$$

Υπολογίζουμε το χρόνο αναμονής:

$$W.T = \frac{\varphi_{\text{τελ}} - \varphi_{\text{αρχ}}}{\omega_{\text{στόχος}} - \omega_{\text{επιδ}}} = 1225.9 \text{ s}$$

Ο χρόνος αναμονής είναι 20.4 min πριν ξεκινήσει την μεταφορά Hohmann για τον ελιγμό ραντεβού/συνάντησης με τον στόχο.

## Κεφάλαιο 8

### Συστήματα Διαστημικής και Υποσυστήματα Δορυφόρων

Σε αυτό το κεφάλαιο θα μάθετε να:

- Περιγράψετε την διαδικασία της μηχανικής των διαστημικών συστημάτων και να την εφαρμόζετε στο σχεδιασμό διαστημικών αποστολών
- Περιγράψετε πως οι απαιτήσεις ενός φορτίου επηρεάζουν τον σχεδιασμό ενός διαστημικού σκάφους
- Αναγνωρίζετε τα κύρια υποσυστήματα ενός διαστημικού σκάφους

Όλοι χρησιμοποιούμε τα διαστημικά συστήματα. Καθώς ξαπλώνετε πίσω στην καρέκλα σας με το τηλεχειριστήριο στο χέρι, η καλωδιακή/δορυφορική τηλεόραση δείχνει προγράμματα από όλο τον κόσμο χρησιμοποιώντας δορυφόρους επικοινωνίας. Οι καιρικές προβλέψεις εξαρτώνται από τις τελευταίες εικόνες των δορυφόρων καιρού οι οποίοι παρακολουθούν την κίνηση των σύννεφων και των καταιγίδων σε όλο τον κόσμο. Στα τελευταία κεφάλαια, εστιάσαμε όλη μας την προσοχή στις τροχιές που ακολουθούν τα διαστημικά σκάφη. Έχετε μάθει πώς να επιλέγετε την κατάλληλη τροχιά για μια αποστολή.

Σε αυτό το κεφάλαιο, θα μελετήσουμε τον σχεδιασμό μιας διαστημικής αποστολής. Θα ανακαλύψουμε πώς οι σχεδιαστές χρησιμοποιούν δοκιμασμένες τεχνικές διαδικασίες για να μεταφράσουν τις ανάγκες των χρηστών σε πλήρως ολοκληρωμένες διαστημικές αποστολές. Θα μάθουμε πως αυτές οι ανάγκες αποτελούν τη βάση για τις απαιτήσεις μιας αποστολής και τους περιορισμούς κάτω από τους οποίους συνδυάζουμε όλα τα στοιχεία μιας αποστολής. Θα μάθουμε πώς να σχεδιάζουμε το ωφέλιμο φορτίο και τα επιμέρους υποσυστήματα που συνθέτουν το διαστημικό σκάφος (Σχήμα 134).



**Σχήμα 134: Υποσυστήματα Δορυφόρου**

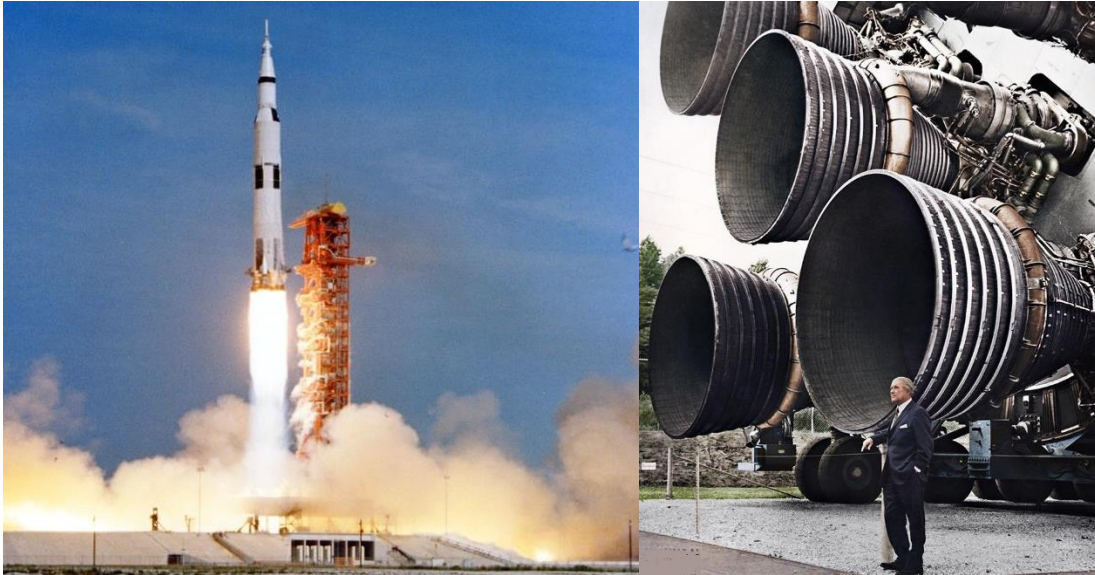
Όπως θα ανακαλύψουμε, το ωφέλιμο φορτίο είναι ένας από τους σημαντικότερους παράγοντες οποιασδήποτε αποστολής. Έχοντας αυτό υπόψιν, θα στραφούμε προς μια σημαντική κατηγορία ωφέλιμων φορτίων, αυτών της τηλεπισκόπησης, για να μάθουμε τις βασικές αρχές που διέπουν τους περιορισμούς και το σχεδιασμό τους. Αυτό το κεφάλαιο θέτει τις βάσεις για την καλύτερη κατανόηση των βασικών παραγόντων σχετικοί με τον σχεδιασμό υποσυστημάτων διαστημοπλοίων, οχημάτων εκτόξευσης και άλλων στοιχείων μιας διαστημικής αποστολής.

### 8.1 Σχεδιασμός διαστημικής αποστολής

Σε αυτή την ενότητα θα μάθετε να:

- Περιγράφετε τη διαδικασία σχεδιασμού συστημάτων
- Εφαρμόζετε τη διαδικασία σχεδιασμού συστημάτων για να σχεδιάζετε διαστημικές αποστολές
- Περιγράφετε πώς οι απαιτήσεις του ωφέλιμου φορτίου επηρεάζουν τον σχεδιασμό ενός διαστημικού σκάφους
- Προσδιορίζετε τα κύρια υποσυστήματα ενός διαστημικού σκάφους

Όλα τα προβλήματα σχεδιασμού ξεκινούν με μια ανάγκη. Οι αρχαίοι αστρονόμοι χρειαζόνταν ένα μέσο για να παρακολουθήσουν τα ουράνια γεγονότα, γι' αυτό σχεδίασαν το Stonehenge. Η NASA χρειάστηκε ένα όχημα για να μεταφέρει αστροναύτες στη Σελήνη και γι' αυτό σχεδίασε τον πύραυλο Κρόνο 5, που παρουσιάζεται στο Σχήμα 135.



**Σχήμα 135: Ο Διαστημικός Φορέας της NASA Κρόνος 5 (Saturn V). Δεξιά ο Βέρνερ Φον Μπράουν μπροστά από τα ακροφύσια των κινητήρων F-1 του Κρόνου 5 (Saturn V).**

Κατά τη διάρκεια των αιώνων, οι μηχανικοί έχουν αναπτύξει μια καλά δοκιμασμένη διαδικασία για τη μετάφραση των αναγκών από λέξεις σε πολύπλοκα συστήματα. Αυτή η διαδικασία ονομάζεται διαδικασία σχεδιασμού συστημάτων. Για να δούμε πώς λειτουργεί η διαδικασία σχεδιασμού συστημάτων, ας δούμε ένα απλό παράδειγμα. Φανταστείτε ότι θέλετε να ανακαινίσετε τον κήπο σας. Πριν βιαστείτε να τρέξετε στα μαγαζιά, η σωστή προσέγγιση είναι να σκεφτείτε τι υλικά χρειάζεστε. Επίσης χρειάζεται να θέσετε κάποιους περιορισμούς, για παράδειγμα οικονομικούς ή ποιότητας. Έχοντας καταγράψει τα παραπάνω θα χρειαστεί να κάνετε μια έρευνα αγοράς για το ποια πράγμα θα αγοράσετε έτοιμα ή θα τα φτιάξετε μόνοι σας και να ελέγξετε αν αυτά ικανοποιούν τους περιορισμούς σας. Στη συνέχεια θα χρειαστεί να δημιουργήσετε ένα σχέδιο για τον κήπο πριν τον φτιάξετε και να επαληθεύσετε ότι τα υλικά ταιριάζουν για την δουλειά που τα έχετε επιλέξει. Μετά από μικροδιορθώσεις, θα είστε έτοιμοι για την ανακαίνιση. Μπορούμε τώρα να εφαρμόσουμε αυτή την λογική στα διαστημικά συστήματα. Στις επόμενες ενότητες θα μελετήσουμε όλες τις διαδικασίες με περισσότερες λεπτομέρειες για να δούμε πως μας βοηθούν να σχεδιάσουμε σύνθετα διαστημικά σκάφη.

## 8.2 Καθορισμός απαιτήσεων και περιορισμών αποστολής

Ο Yogi Berra είχε κάποτε: "Όταν δεν ξέρεις πού πας, πιθανότατα θα βρεθείς κάπου αλλού". Ξεκινάμε τη διαδικασία σχεδιασμού συστημάτων, καθορίζοντας τις απαιτήσεις και τους περιορισμούς της αποστολής. Πριν ξεκινήσουμε να λύσουμε οποιοδήποτε πρόβλημα, θέλουμε να διασφαλίσουμε ότι επιλύουμε το σωστό πρόβλημα. Συνεπώς, πρέπει να δηλώσουμε σαφώς αυτό που πραγματικά θέλουμε - τις απαιτήσεις μας. Το πρώτο και σημαντικότερο βήμα στη διαδικασία σχεδιασμού συστημάτων είναι να καθορίσουμε τις απαιτήσεις της αποστολής.

- "Ποιο τελικό αποτέλεσμα θέλουμε να επιτύχουμε;"
- "Ποιος είναι ο απώτερος στόχος μας;"
- "Πως μεταφράζεται η αποστολή σε διαστημικούς όρους;"

Όσο πιο σαφείς και συγκεκριμένες είναι οι απαιτήσεις μας, τόσο πιο εύκολο είναι να τις επιτύχουμε. Οι σαφώς καθορισμένες απαιτήσεις μας δίνουν επίσης την ευκαιρία να εξαλείψουμε τους κινδύνους και να διαχωρίσουμε τι είναι πραγματικά σημαντικό. Επίσης, αποτελούν ένα μέσο αξιολόγησης (και μέτρησης)



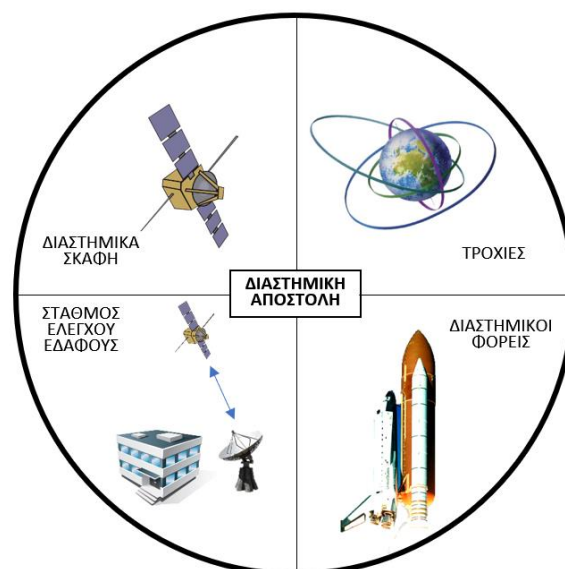
των επιδόσεών μας, συγκρίνοντας το πού είμαστε με το σημείο που θέλουμε να πάμε σαν μια πυξίδα που μπορούμε συνεχώς να κοιτάμε.

Υπάρχουν δύο σημαντικές ιδιότητες των απαιτήσεων που πρέπει να θυμόμαστε: πρέπει να είναι σαφής και απλές. Οι σαφείς απαιτήσεις μας λένε ακριβώς τι θέλουμε. Η ασάφεια μπορεί να οδηγήσει σε παρεξηγήσεις και καταστροφές. Οι απαιτήσεις θα πρέπει επίσης να είναι απλές. Όπως ο στρατηγός George S. Patton, ένας από τους μεγαλύτερους διοικητές αρμάτων μάχης (ΗΠΑ) του Β 'Παγκοσμίου Πολέμου, είπε: "Ποτέ μην πείτε στους ανθρώπους πώς να κάνουν πράγματα, πείτε τους τι πρέπει να κάνουν και θα σας εκπλήξουν με την εφευρετικότητά τους". Εφαρμόζοντας αυτό το πρώτο βήμα στις αποστολές του διαστήματος, βλέπουμε ότι όλες οι διαστημικές αποστολές ξεκινούν με μια συγκεκριμένη ανάγκη, όπως η ανάγκη για οικονομική μετάδοση τηλεοπτικών εκπομπών ή για παγκόσμια πλοήγηση. Με βάση αυτή την ανάγκη θα ξεκινήσουμε να αναπτύσσουμε διαστημικές αποστολές.

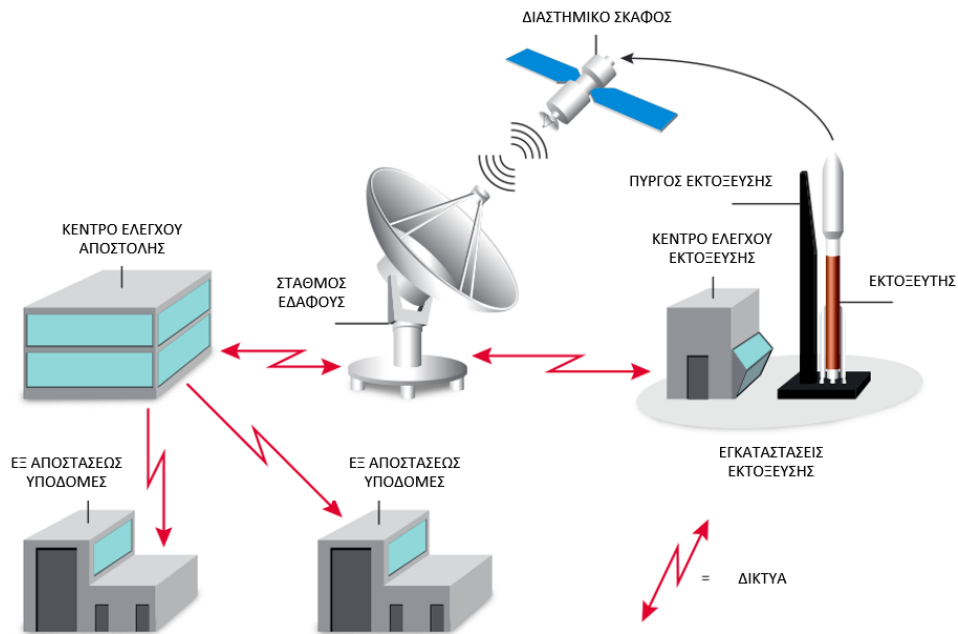
Για να καθορίσουμε τις απαιτήσεις μιας διαστημικής αποστολής, αρχίζουμε αναπτύσσοντας μια περιγραφή της αποστολής (mission statement). Η δήλωση αποστολής καθορίζει:

- Τον στόχο της αποστολής - γιατί κάνουμε την αποστολή
- Τους χρήστες της αποστολής – ποιοι θα επωφεληθούν και θα χρησιμοποιήσουν τις πληροφορίες
- Τη λειτουργία- πως συνδέονται όλα τα στοιχεία της αποστολής

Ο στόχος της αποστολής ορίζει τον σκοπό της αποστολής και ποιες υπηρεσίες ή πληροφορίες θα παραδώσει στους χρήστες. Οι χρήστες είναι οι πελάτες που μας δίνουν τον λόγο (και συνήθως τα χρήματα!) για την αποστολή. Μόλις ξέρουμε γιατί και ποιος, το επόμενο ερώτημα είναι το «πώς», που μας οδηγεί στην έννοια των λειτουργιών. Μια λειτουργία περιγράφει πώς οι άνθρωποι, τα συστήματα και όλα τα στοιχεία της αρχιτεκτονικής της αποστολής αλληλοεπιδρούν για να ικανοποιήσουν τις απαιτήσεις της αποστολής. Πιο πριν, παρουσιάσαμε την αρχιτεκτονική μιας διαστημικής αποστολής όπως παρουσιάζεται στο Σχήμα 136 και 137. Η αρχιτεκτονική δείχνει τα βασικά στοιχεία οποιασδήποτε διαστημικής αποστολής και τον τρόπο με τον οποίο συνδέονται μεταξύ τους. Στα κεφάλαια 4 έως 10, εστίασαμε σε ένα μόνο σημαντικό στοιχείο – τις τροχιές. Τώρα στρέφουμε την προσοχή μας στον ορισμό των υπόλοιπων στοιχείων. Εστιάζουμε στη μορφή που θα λάβει η αποστολή μας και πώς θα αλληλοεπιδρούν τα διάφορα στοιχεία. Η αρχιτεκτονική που ορίζουμε και τα διάφορα συστήματα και υποσυστήματα που την στηρίζουν πρέπει τελικά να ικανοποιούν την ανάγκη της αποστολής μας (Εικόνα 8-3).



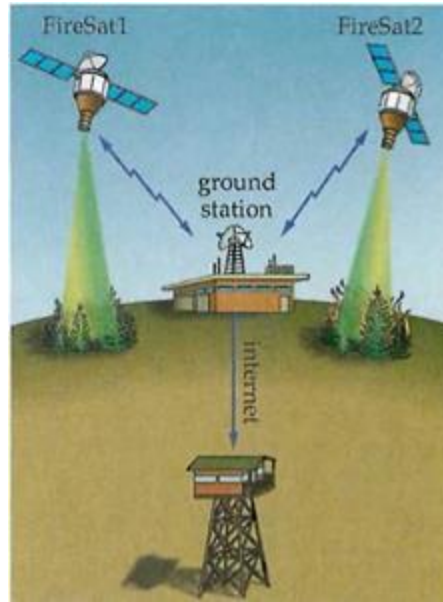
Σχήμα 136: Τα Μέρη (Συστήματα) μιας Διαστημικής Αποστολής



**Σχήμα 137: Αρχιτεκτονική Διαστημικής Αποστολής**

Για να δούμε τη διαδικασία σχεδιασμού συστημάτων, ας ξεκινήσουμε περιγράφοντας μια αποστολή που θα ικανοποιεί μια ανάγκη με παγκόσμιο αντίκτυπο: την ανίχνευση δασικών πυρκαγιών. Κάθε χρόνο, οι δασικές πυρκαγιές καταστρέφουν δεκάδες χιλιάδες εκτάρια (στρέμματα) πολύτιμων πόρων ξυλείας και άγριας πανίδας. Οι δορυφόροι μας βοηθούν να παρακολουθούμε και θέτουμε σε έλεγχο πιο γρήγορα τις πυρκαγιές. Στην προτεινόμενη αυτή αποστολή, πρέπει να ενημερώνουμε τις δασικές υπηρεσίες σε παγκόσμιο επίπεδο εγκαίρως προτού οι πυρκαγιές εξαπλωθούν. Θα ονομάσουμε αυτή την αποστολή FireSat. Για παράδειγμα, η περιγραφή της αποστολής (mission statement) FireSat θα μπορούσε να είναι:

- Στόχος της αποστολής-ανίχνευση και εντοπισμός πυρκαγιών σε όλο τον κόσμο και παροχή έγκαιρης ειδοποίησης στους χρήστες
- Χρήστες – εθνικές δασικές υπηρεσίες και άλλοι εθνικοί και διεθνείς οργανισμοί υπεύθυνοι για την καταπολέμηση των δασικών πυρκαγιών
- Λειτουργίες - υπάρχουν διάφορες πιθανές λειτουργίες για αυτόν τον τύπο αποστολής. Για αυτό το παράδειγμα, ας επιλέξουμε έναν αριθμό διαστημικών σκαφών σε χαμηλή γήινη τροχιά που ανιχνεύουν και να εντοπίζουν τις πυρκαγιές. Το σύστημα θα κοινοποιεί αυτές τις πληροφορίες στους χρήστες μέσω του διαδικτύου. Θεωρούμε ότι ελέγχουμε ολόκληρη την αποστολή μέσω ενός μοναδικού επίγειου σταθμού (Σχήμα 138).



**Σχήμα 138: Σχέδιο Λειτουργίας Αποστολής FireSat**

Ενώ η συζήτησή μας μέχρι τώρα έχει επικεντρωθεί κυρίως στις απαιτήσεις (τι θέλουμε), ίσως και μερικές φορές μεγαλύτερης σημασίας αποτελούν οι περιορισμοί της αποστολής. Παρόλο που το διαστημικό σκάφος θα λειτουργήσει στο διάστημα, ο σχεδιασμός της αποστολής θα γίνει στη Γη. Επειδή σχεδιάζουμε τις αποστολές στον "πραγματικό κόσμο", πρέπει να συμμορφώνονται με μια ποικιλία οικονομικών, τεχνικών και πολιτικών περιορισμών. Οι περιορισμοί των μηχανικών συστημάτων συνήθως εμπίπτουν σε τρεις γενικές κατηγορίες: το κόστος, το χρονοδιάγραμμα και τις επιδόσεις.

Μετά τον ψυχρό πόλεμο, οι περιορισμοί στον κόστος έχουν καταστεί ένας από τους μεγαλύτερους σχεδιαστικούς παράγοντες των σύγχρονων διαστημικών αποστολών. Όλο και συχνότερα, οι υπεύθυνοι σχεδιασμού αποστολών χρησιμοποιούν μια εξειδικευμένη προσέγγιση γνωστή ως σχεδιασμός ανά κόστος (design-to-cost), ειδικά προσανατολισμένη στην ανάπτυξη αποτελεσματικών λύσεων μέσα σε περιβάλλον περιορισμένων χρημάτων. Μαζί με το κόστος, το χρονοδιάγραμμα μπορεί επίσης να αποτελέσει σημαντικό σχεδιαστικό παράγοντα. Συχνά, οι αποστολές πρέπει να συμμορφώνονται με ένα συγκεκριμένο χρονοδιάγραμμα ώστε η εκτόξευση του διαστημικού σκάφους να πραγματοποιηθεί μέσα σε ένα συγκεκριμένο χρονικό περιθώριο εκκίνησης ή απλώς να εξασφαλιστεί ότι το διαστημικό σκάφος βρίσκεται στο σταθμό εγκαίρως. Φυσικά, το κόστος και το χρονοδιάγραμμα πηγαίνουν χέρι-χέρι. "Ο χρόνος είναι χρήμα" είναι μια πολύ γνωστή οικονομική αρχή. Συνήθως, όσο περισσότερο χρειάζεται μια αποστολή για να πραγματοποιηθεί, τόσο πιο ακριβή είναι. Η ισορροπία μεταξύ κόστους και χρονοδιαγράμματος είναι η απόδοση. Η φθηνότερη και ταχύτερη λύση μπορεί να μην είναι πάντα η καλύτερη τεχνική προσέγγιση. Οι μηχανικοί πρέπει να σχεδιάσουν ένα διαστημικό σκάφος που αποτελείται από διάφορα υποσυστήματα που συνεργάζονται αξιόπιστα προς ολοκλήρωση της αποστολής. Μπορούν να χρησιμοποιήσουν υπάρχοντα εξαρτήματα ή να σχεδιάσουν εξαρτήματα νέας τεχνολογίας για κάθε ένα από τα υποσυστήματα. Η συνδυασμένη απόδοση αυτών των υποσυστημάτων καθορίζει την επιτυχία της συνολικής αποστολής. Από την άλλη πλευρά, η "βέλτιστη" λύση που προσφέρει τη μεγαλύτερη απόδοση μπορεί να είναι δαπανηρή και χρονοβόρα για την υλοποίησή της.

Το κόστος, το χρονοδιάγραμμα και οι επιδόσεις αντιπροσωπεύουν τον τρισδιάστατο "εμπορικό χώρο" στον οποίο περιορίζονται όλες οι διαστημικές αποστολές και οποιαδήποτε άλλα προβλήματα σχετικά με αυτές. Είτε αποφασίζουμε τι θα φάμε για δείπνο (γρήγορο φαγητό, φθηνό φαγητό ή υγιεινό φαγητό) ή

σχεδιάζοντας ένα παγκόσμιο δίκτυο επικοινωνιών, πρέπει να λαμβάνουμε υπόψη συνεχώς αυτούς τους τρεις περιορισμούς. Αργότερα θα δούμε πώς πραγματοποιείται αυτή η εναλλαγή μεταξύ των απαιτήσεων μιας αποστολής και των απαιτήσεων του συστήματος.

### 8.2.1 Απαιτήσεις συστήματος και περιορισμοί

Ενώ οι απαιτήσεις της αποστολής επικεντρώνονται στην μεγάλη «εικόνα» (οι λόγοι και τα αποτελέσματα του έργου), οι απαιτήσεις των συστημάτων επικεντρώνονται στα μεμονωμένα στοιχεία της αρχιτεκτονικής του συστήματος με σκοπό τη λεπτομερέστερη περιγραφή όσων περιμένουμε από το κάθε ένα. Φυσικά, τα στοιχεία είναι στενά αλληλένδετα. Το όχημα εκτόξευσης εξαρτάται από το μέγεθος του διαστημικού σκάφους και την τροχιά της αποστολής. Το δίκτυο λειτουργιών εξαρτάται από τον αριθμό και τον τύπο των διαστημικών σκαφών και από το ποσό των δεδομένων που μεταδίδονται στους χρήστες. Η τροχιά της αποστολής εξαρτάται από το υψόμετρο και την κλίση ώστε να ικανοποιεί τις απαιτήσεις της αποστολής. Στον «πραγματικό κόσμο», λίγες διαστημικές αποστολές ξεκινούν από το μηδέν. Συνήθως, τουλάχιστον ένα από τα στοιχεία της αποστολής είναι καθορισμένο ή αυστηρά περιορισμένο από οικονομικούς, πολιτικούς ή άλλους παράγοντες εξαρχής. Για παράδειγμα, μπορούμε να σχεδιάσουμε μια αποστολή για να επωφεληθούμε μιας συγκεκριμένης εκτόξευσης. Σε αυτή την περίπτωση το όχημα εκτόξευσης, το εύρος των εφικτών τροχιών και τα όρια στη μάζα των διαστημικών σκαφών καθορίζονται πριν ακόμα αρχίζουμε το σχεδιασμό του συστήματος, όπως φαίνεται στην Εικόνα 139.



**Σχήμα 139: Δορυφόροι προς εκτόξευση με τον φορέα Soyuz 2.1 (Ρωσία) το 2017. Μικροδορυφόροι είναι τοποθετημένοι κάτω από το πρωτεύον φορτίο (δορυφόρος τηλεπαρατήρησης Kanopus) ως δευτερεύοντα φορτία με χαμηλότερο κόστος εκτόξευσης. Το δευτερεύων φορτίο θα πάει υποχρεωτικά στην ίδια τροχιά με το πρωτεύον φορτίο.**

Ακόμη και αν δεν υπάρχουν συγκεκριμένα όρια στο όχημα εκτόξευσης, υπάρχουν πρακτικά όρια εφόσον υπάρχει μόνο ένας σχετικά μικρός αριθμός επιλογών από διαθέσιμα τέτοια οχήματα ενώ λίγες αποστολές μπορούν να αντέξουν οικονομικά να κατασκευάσουν το δικό τους όχημα εκτόξευσης από την αρχή. Συνήθως, οι λειτουργίες της αποστολής περιορίζονται επίσης στην αρχή του σχεδιασμού της αποστολής με κάποιο τρόπο. Ενώ πολύ μεγάλα προγράμματα, όπως το παγκόσμιο τηλεφωνικό δίκτυο Iridium, μπορούν να δικαιολογήσουν το σχεδιασμό και την κατασκευή ενός αποκλειστικού δικτύου λειτουργίας από το μηδέν, οι περισσότερες αποστολές, όπως οι στρατιωτικές αποστολές της NASA ή των ΗΠΑ, πρέπει να χρησιμοποιούν υπάρχουσες εγκαταστάσεις. Γενικά, το λιγότερο περιορισμένο στοιχείο

μιας διαστημικής αποστολής είναι το διαστημικό σκάφος. Για το λόγο αυτό, θα επικεντρωθούμε στη διαδικασία του σχεδιασμού των διαστημικών συστημάτων σε αυτό. Έχουμε αναφέρει ότι χωρίζουμε εννοιολογικά το διαστημικό σκάφος σε δύο διαφορετικά μέρη - το ωφέλιμο φορτίο και η διαστημική πλατφόρμα (ή διαυλος). Το ωφέλιμο φορτίο αποτελείται από τους αισθητήρες ή άλλα όργανα που εκτελούν την αποστολή. Η διαστημική πλατφόρμα είναι μια συλλογή υποσυστημάτων σχεδιασμένων να υποστηρίζουν το ωφέλιμο φορτίο. Οι απαιτήσεις του ωφέλιμου φορτίου είναι συνήθως αυτές που οδηγούν τη διαμόρφωση του διαστημικού σκάφους. Για το λόγο αυτό, το ωφέλιμο φορτίο είναι το πρώτο σύστημα, για το οποίο πρέπει να οριστούν οι απαιτήσεις.

Αρχίζουμε να εξάγουμε απαιτήσεις του ωφέλιμου φορτίου από τη δήλωση αποστολής. Κάπου στην περιγραφή των στόχων, οι χρήστες και οι λειτουργίες πρέπει να αποτελούν ένδειξη του θέματος της αποστολής. Ορίζουμε ως θέμα της αποστολής ένα φυσικό ή τεχνητό αντικείμενο ή φαινόμενο με το οποίο το ωφέλιμο φορτίο θα αλληλοεπιδράσει. Το θέμα χαρακτηρίζεται συνήθως με πράγματα όπως το χρώμα, το μέγεθος, το σχήμα, τη θερμοκρασία, τη χημική σύνθεση ή τη συχνότητα. Μόνο αφού γνωρίζουμε με τι είδους θέμα έχουμε να κάνουμε, μπορούμε να θέσουμε σαφείς και απλές απαιτήσεις για ωφέλιμο φορτίου.

Επιστρέφοντας στο παράδειγμα της αποστολής FireSat, το προφανές θέμα αυτής της αποστολής είναι οι δασικές πυρκαγιές. Εξάλλου, είναι ό, τι αναφέρει ο στόχος της αποστολής που πρέπει να εντοπίσουμε. Τι είδους όμως δασικές πυρκαγιές; Πόσο μεγάλες ή πόσο ζεστές; Ποια συγκεκριμένα χαρακτηριστικά των δασικών πυρκαγιών θα πρέπει να ανιχνεύσει το ωφέλιμο φορτίο; Αυτές οι ερωτήσεις μπορεί να ακούγονται τετριμμένες, αλλά στον σχεδιαστή του ωφέλιμου φορτίου, μπορεί να είναι πολύ σημαντικές. Δεν θέλουμε να στέλνουμε ειδοποίηση για πυρκαγιά κάθε φορά που κάποιος ξεκινά μια μικρή φωτιά στον κήπο του. Από την άλλη πλευρά, δεν θέλουμε να αγνοήσουμε μια πυρκαγιά πολλών στρεμμάτων που μπορεί να είναι εκτός ελέγχου. Πρέπει να σχεδιάσουμε το FireSat να ανταποκρίνεται στο σωστό τύπο πυρκαγιάς.

Με περαιτέρω ανάλυση, θα μπορούσαμε να καθορίσουμε και άλλα χαρακτηριστικά μιας τέτοιας πυρκαγιάς, συμπεριλαμβανομένης της ποσότητας θερμότητας και του καπνού που εκπέμπει. Όλα αυτά είναι σημαντικά για το σχεδιασμό του τύπου του αισθητήρα ή αισθητήρων που το ωφέλιμο φορτίο θα χρησιμοποιήσει για την ανίχνευση και τον εντοπισμό των πυρκαγιών. Από τη στιγμή που γνωρίζουμε αυτές τις απαιτήσεις του ωφέλιμου φορτίου, τα υπόλοιπα στοιχεία της αποστολής θα τεθούν σε ισχύ. Ο τύπος του ωφέλιμου φορτίου καθορίζει σε μεγάλο βαθμό την τροχιά της αποστολής. Η μάζα του φορτίου, ο όγκος, η ισχύς όπως και άλλες απαιτήσεις καθορίζουν το βασικό μέγεθος και τη μάζα του διαστημικού οχήματος. Εάν δεν έχουν ήδη περιοριστεί, αυτές οι απαιτήσεις συστήματος καθορίζουν, ή τουλάχιστον περιορίζουν τις επιλογές, στο σύστημα εκτόξευσης και τα συστήματα χειρισμού. Ο πίνακας 8-1 συνοψίζει τα βήματα κατά τη διάρκεια αυτής της δεύτερης φάσης της διαδικασίας του σχεδιασμού διαστημικών συστημάτων. Στην επόμενη ενότητα, επανεξετάζουμε τις αποφάσεις που ελήφθησαν κατά την προηγούμενη φάση υπό το πρίσμα αυτών των αποτελεσμάτων, προκειμένου να διαπιστωθεί εάν υπάρχει περιθώριο για συμβιβασμούς.

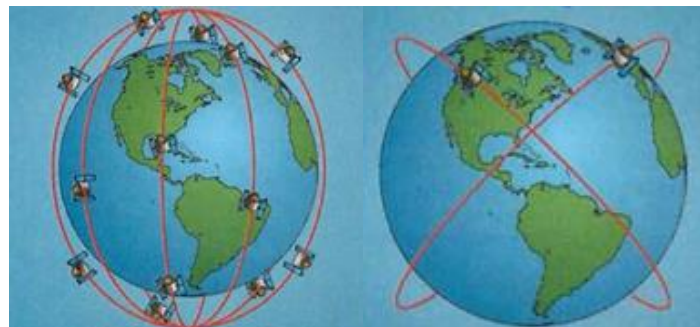
<b>Απαιτήσεις/προδιαγραφές του Συστήματος</b>
Έλεγχος και αναθεώρηση περιορισμών αρχιτεκτονικής της αποστολής
Εξακρίβωση και χαρακτηρισμός τους στόχους της αποστολής
Καθορισμός προδιαγραφών του ωφέλιμου φορτίου
Καθορισμός προδιαγραφών τροχιάς

Υπολογισμός του μεγέθους και της μάζας του διαστημικού σκάφους
Εξακρίβωση πιθανών διαστημικών φορέων/εκτοξευτών
Καθορισμός προδιαγραφών λειτουργιών του συστήματος

**Πίνακας 6: Απαιτήσεις/προδιαγραφές για τον σχεδιασμό Διαστημικών Συστημάτων**

### 8.2.2 Εμπορικές απαιτήσεις

Ενώ η μικρότερη απόσταση μεταξύ δύο σημείων σε ένα χάρτη είναι μια ευθεία γραμμή, αυτό συμβαίνει σπάνια στο σχεδιασμό συστημάτων. Λίγα επιτυχημένα έργα ακολουθούν μια γραμμική πορεία προς τον τελικό σχεδιασμό τους. Αντ' αυτού, γράφουμε απαιτήσεις αποστολής και περιορισμούς γνωρίζοντας ότι μπορεί να αλλάξουν. Συχνά, τα αποτελέσματα από τη λεπτομερή ανάλυση των απαιτήσεων του συστήματος μπορεί να μας κάνουν να ξανασκεφτούμε ορισμένα απαιτήσεις και περιορισμούς. Πολύ συχνά, οι χορηγοί των προγραμμάτων δυσκολεύουν τους σχεδιαστές της αποστολής με αμφίσημες ή υπερβολικά περίπλοκες απαιτήσεις. Έτσι, χρησιμοποιούμε τον "βρόχο απαιτήσεων", μια απαραίτητη και συνεχή "διαδικασία μέσα σε διαδικασία", για να επαναξιολογήσουμε τις απαιτήσεις, με βάση νέες πληροφορίες. Για παράδειγμα, οι στόχοι της αποστολής FireSat απαιτούν από εμάς να «ανιχνεύσουμε και να εντοπίσουμε πυρκαγιές δασών παγκοσμίως και να παρέχουμε έγκαιρη ειδοποίηση στους χρήστες». Πόσο γρήγορα είναι το "έγκαιρη;" Μια προκαταρκτική ανάλυση του αριθμού των διαστημικών σκαφών που απαιτούνται για την παροχή παγκόσμιας κάλυψης μπορεί να δείξει ότι για την παροχή πραγματικά άμεσης ειδοποίησης τα έξοδα κατασκευής, εκτόξευσης και λειτουργίας είναι απαγορευτικά. Αντίθετα, ένα μόνο διαστημικό σκάφος μπορεί να εντοπίσει και να ειδοποιήσει εντός τριών ημερών – πολύ μεγάλος χρόνος που καθιστά την αποστολή μη χρήσιμη. Μια τέτοια ανάλυση σημαίνει ότι οι σχεδιαστές αποστολών και οι χορηγοί πρέπει να συνεργαστούν για να καθορίσουν σαφέστερα την απαίτηση για "έγκαιρη" κάλυψη. Διευκρινίζοντας αυτή την απαίτηση, καθορίζοντας ότι "έγκαιρα" σημαίνει "μέσα σε 24 ώρες", μια αποστολή που είναι υπερβολικά δαπανηρή ή αδύνατη μπορεί να επιτευχθεί και να γίνει προσιτή και εφικτή, όπως απεικονίζεται στο Σχήμα 140.



Σμήνος δορυφόρων για  
στιγμιαία ανίχνευση  
Ανεφικτό

Σμήνος δορυφόρων για  
24ωρη ανίχνευση  
Εφικτό

**Σχήμα 140: Συμβιβασμός απαιτήσεων/προδιαγραφών. Ο συμβιβασμός των προδιαγραφών της αποστολής σε σχέση με τις προδιαγραφές του συστήματος μπορεί να κάνει μία αποστολή αδύνατη ή μη πρακτική ή με απαγορευτικό κόστος υλοποιήσιμη και οικονομικά εφικτή**

### 8.2.3 Σχεδιασμός ωφέλιμου φορτίου και υποσυστημάτων

Αφού ορίσουμε πλήρως τις απαιτήσεις του συστήματος και, επαναπροσδιορίσουμε τις απαιτήσεις της αποστολής μπορούμε τελικά να προχωρήσουμε στην τελευταία φάση της διαδικασίας του σχεδιασμού διαστημικών συστημάτων - το ωφέλιμο φορτίο και το σχεδιασμό των υποσυστημάτων. Σε αυτό το στάδιο

σχεδιάζουμε λεπτομερείς προδιαγραφές για το ωφέλιμο φορτίο και τα υποστηρικτικά υποσυστήματα του, συμπεριλαμβανομένων των σχεδίων, των μηχανικών και ηλεκτρικών διεπαφών, ακόμη και των παξιμαδιών και των βιδών. Ας ξεκινήσουμε κοιτάζοντας εν συντομία τις απαιτήσεις του ωφέλιμου φορτίου και στη συνέχεια ας εξετάσουμε τα υποσυστήματα που συνθέτουν το διαστημικό δίαυλο.

### Το ωφέλιμο φορτίο

Στην προηγούμενη φάση της διαδικασίας μηχανικής διαστημικών συστημάτων, ελήφθησαν οι συνολικές απαιτήσεις ωφέλιμου φορτίου σε σχέση με το θέμα με το οποίο πρέπει να αλληλεπιδράσει. Κατά τη διάρκεια αυτής της τελικής φάσης της διαδικασίας, λαμβάνουμε μια πιο λεπτομερή ματιά στο ωφέλιμο φορτίο για να σχεδιάσουμε τα συστατικά που καθιστούν δυνατή αυτή την αλληλεπίδραση. Η αποστολή GPS, που παρουσιάζεται στο σχήμα 141, είναι μόνο ένα παράδειγμα του τρόπου με τον οποίο το ωφέλιμο φορτίο οδηγεί τις υπόλοιπες απαιτήσεις του υποσυστήματος.



**Σχήμα 141: Δορυφόρος GPS (ΗΠΑ). Οι απαιτήσεις και προδιαγραφές ισχύος, θερμικής προστασίας, τηλεπικοινωνίες/ζεύξεις όπως και η ανάγκη για πτυσσόμενες κεραιές επηρέασαν την συνολική σχεδίαση του διαστημικού σκάφους**

Συνεχίζοντας με το σενάριο αποστολής FireSat, γνωρίζουμε τώρα ότι το θέμα είναι οι δασικές πυρκαγιές. Πώς ανιχνεύουμε μια τέτοια πυρκαγιά; Γνωρίζουμε ότι οι φωτιές παράγουν θερμότητα, φως και καπνό. Ευτυχώς, μπορούμε να κατασκευάσουμε ηλεκτρονικές συσκευές ή αισθητήρες που να ανιχνεύουν καθένα από αυτά τα χαρακτηριστικά του αντικειμένου μας. Φανταστείτε ότι κάθεστε γύρω από μια φωτιά μια δροσερή νύχτα. Μπορείτε να αισθανθείτε τη θερμότητα από τη φωτιά, να δείτε το φως της και να μυρίσετε τον καπνό. Εάν βάλουμε αυτά τα είδη αισθητήρων σε ένα διαστημικό σκάφος τότε αυτό γίνεται το ωφέλιμο φορτίο του.

Το ωφέλιμο φορτίο θα μπορούσε να αποτελείται από μια απλή κάμερα που να ανιχνεύει το φως από τη φωτιά ή να περιλαμβάνει μια συλλογή από διάφορους αισθητήρες, ο καθένας για να ανιχνεύει ένα συγκεκριμένο χαρακτηριστικό όπως το φως, τη θερμότητα ή τον καπνό. Προς το παρόν, απλά πρέπει να καταλάβουμε ότι ο αριθμός και ο τύπος των αισθητήρων που επιλέγονται καθώς και ο τρόπος με τον οποίο συνεργάζονται για να σχηματίσουν το ωφέλιμο φορτίο καθορίζουν τον τρόπο με τον οποίο σχεδιάζουμε το υπόλοιπο διαστημικό σκάφος. Καθώς σχεδιάζουμε το ωφέλιμο φορτίο, δημιουργούμε μια σειρά από απαιτήσεις για την πλατφόρμα που υπαγορεύουν:

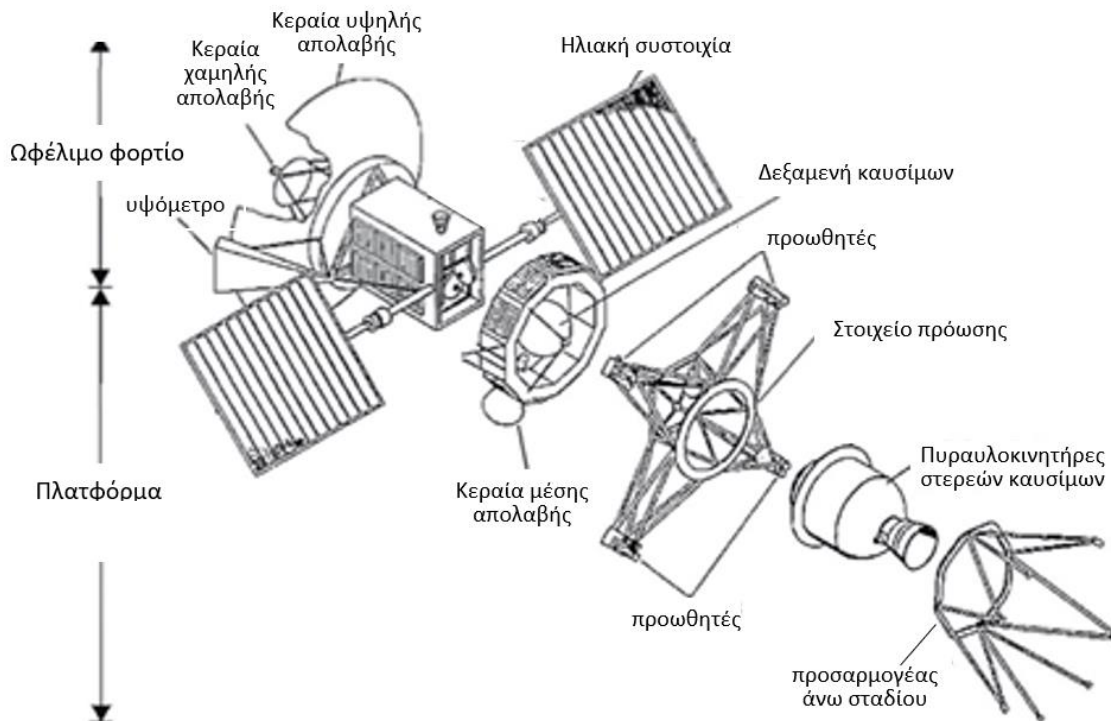
- Πού και πως ακριβώς πρέπει να είναι τοποθετημένο το διαστημικό σκάφος.
- Το μέγεθος των δεδομένων που πρέπει να επεξεργαστεί και να μεταδώσει ο δορυφόρος
- Πόση ηλεκτρική ενέργεια χρειάζεται.

- Το αποδεκτό εύρος θερμοκρασιών λειτουργίας.
- Τον όγκο και τη μάζα του ωφέλιμου φορτίου.

Τα υποσυστήματα που αποτελούν την πλατφόρμα του διαστημικού σκάφους πρέπει να ικανοποιούν όλες αυτές τις απαιτήσεις του ωφέλιμου φορτίου. Τυπικά, οι σχεδιαστές αποστολής καθορίζουν αυτές τις απαιτήσεις όσον αφορά τους προϋπολογισμούς απόδοσης. Στο υπόλοιπο μέρος αυτής της ενότητας θα εξετάσουμε λεπτομερέστερα τα υποσυστήματα των διαστημικών σκαφών και τους προϋπολογισμούς απόδοσης.

### 8.2.4 Δορυφορική Πλατφόρμα

Η πλατφόρμα του διαστημικού σκάφους υπάρχει αποκλειστικά για να υποστηρίξει το ωφέλιμο φορτίο, να το κρατήσει υγιές και ασφαλές. Το σχήμα 142 δείχνει τα μέρη του διαστημικού οχήματος Magellan με το ωφέλιμο φορτίο του και πολλά από τα υποσυστήματα του. Στην τελική φάση της διαδικασίας σχεδιασμού διαστημικών συστημάτων, θέλουμε να κατανοήσουμε τις κρίσιμες απαιτήσεις που καθοδηγούν το σχεδιασμό των υποσυστημάτων.



Σχήμα 142: Υποσυστήματα Διαστημικού Σκάφους

#### 8.2.4.1 Υποσύστημα ελέγχου θέσης και προσανατολισμού

Σε κάθε ένα διαστημικό σκάφος, υπάρχει ένα υποσύστημα που "κατευθύνει" το όχημα ελέγχοντας τον προσανατολισμό του και την τροχιά του. Ένα διαστημικό σκάφος πρέπει να έχει το σωστό προσανατολισμό ώστε οι κάμερες και οι κεραίες να ευθυγραμμίζονται με συγκεκριμένα σημεία στη Γη. Για τον έλεγχο προσανατολισμού, οι πύραυλοι ή άλλες συσκευές περιστρέφονται γύρω από το κέντρο μάζας τους. Επίσης, ένα διαστημικό σκάφος πρέπει να είναι σε θέση να φτάσει και να διατηρήσει την τροχιά της αποστολής. Για τον τροχιακό έλεγχο χρησιμοποιεί πυραύλους/κινητήρες που εκτελούν τους ελιγμούς που περιγράφονται στο Κεφάλαιο 7. Το υποσύστημα που ελέγχει τον προσανατολισμό και την τροχιά του διαστημικού σκάφους, φυσικά ονομάζεται υποσύστημα ελέγχου θέσης και προσανατολισμού (attitude and orbit control subsystem-AOCS). Αποκομίζουμε τους κρίσιμο κόστος απόδοσης για το AOCS



από το ωφέλιμο φορτίο και τις υπόλοιπες απαιτήσεις του συστήματος. Μπορούμε να χωρίσουμε το συνολικό προϋπολογισμό σε προϋπολογισμό ελέγχου προσανατολισμού και σε προϋπολογισμό ελέγχου τροχιάς. Ο προϋπολογισμός ελέγχου προσανατολισμού είναι η συνολική γωνιακή ορμή που μπορεί να χρησιμοποιήσει το διαστημικό σκάφος κατά τη διάρκεια της ζωής του. Ο προϋπολογισμός ελέγχου τροχιάς είναι η συνολική μεταβολή  $\Delta V$  που απαιτείται για την επίτευξη και τη διατήρηση της τροχιάς της αποστολής. Εκτός από τους αριθμούς στους προϋπολογισμούς απόδοσης, οι σχεδιαστές ενός AOCS πρέπει να γνωρίζουν πως το διαστημικό σκάφος θα καθορίσει τον προσανατολισμό του και την τροχιά του και ποιοι μηχανισμοί θα χρησιμοποιηθούν για τον έλεγχο αυτών. Στο Κεφάλαιο 9 θα περιγράψουμε με περισσότερες λεπτομέρειες πως τα συστήματα ελέγχου χρησιμοποιούν αισθητήρες, πυραύλους και άλλα εργαλεία για να στρέψουν ένα διαστημικό σκάφος προς τη σωστή κατεύθυνση και να το θέσουν στη σωστή τροχιά.



**Σχήμα 143:** Το υποσύστημα ελέγχου θέσης και προσανατολισμού, όπως αυτό στον Hellasat-4 είναι απαραίτητο για τον έλεγχο της θέσης, κατεύθυνσης αλλά και της ‘συμπεριφοράς’ του δορυφόρου ως προς τους άξονες περιστροφής του.

Το υποσύστημα που ελέγχει τον προσανατολισμό και την τροχιά του διαστημικού σκάφους, φυσικά ονομάζεται υποσύστημα ελέγχου θέσης και προσανατολισμού (attitude and orbit control subsystem-AOCS). Αποκομίζουμε τους κρίσιμο κόστος απόδοσης για το AOCS από το ωφέλιμο φορτίο και τις υπόλοιπες απαιτήσεις του συστήματος. Μπορούμε να χωρίσουμε το συνολικό προϋπολογισμό σε προϋπολογισμό ελέγχου προσανατολισμού και σε προϋπολογισμό ελέγχου τροχιάς. Ο προϋπολογισμός ελέγχου προσανατολισμού είναι η συνολική γωνιακή ορμή που μπορεί να χρησιμοποιήσει το διαστημικό σκάφος κατά τη διάρκεια της ζωής του. Ο προϋπολογισμός ελέγχου τροχιάς είναι η συνολική μεταβολή  $\Delta V$  που απαιτείται για την επίτευξη και τη διατήρηση της τροχιάς της αποστολής. Εκτός από τους αριθμούς στους προϋπολογισμούς απόδοσης, οι σχεδιαστές ενός AOCS πρέπει να γνωρίζουν πως το διαστημικό σκάφος θα καθορίσει τον προσανατολισμό του και την τροχιά του και ποιοι μηχανισμοί θα χρησιμοποιηθούν για τον έλεγχο αυτών. Σε επόμενες ενότητες θα περιγράψουμε με περισσότερες λεπτομέρειες πως τα συστήματα ελέγχου χρησιμοποιούν αισθητήρες, πυραύλους και άλλα εργαλεία για να στρέψουν ένα διαστημικό σκάφος προς τη σωστή κατεύθυνση και να το θέσουν στη σωστή τροχιά.

#### **8.2.4.2 Υποσύστημα επικοινωνιών και διαχείρισης δεδομένων**

Το υποσύστημα επικοινωνιών και διαχείρισης δεδομένων είναι υπεύθυνο για τον χειρισμό των δεδομένων μεταξύ των υποσυστημάτων του διαστημικού διαύλου καθώς και για την επικοινωνία του διαστημικού σκάφους προς τη Γη. Περιλαμβάνει τα στοιχεία για τη μεταβίβαση, την υποδοχή και τη δρομολόγηση δεδομένων και σημάτων αποστολής εκ μέρους του διαστημικού σκάφους. Αποτελείται από πομπούς και δέκτες πάνω στο δορυφόρο για την εξασφάλιση της επικοινωνίας με το έδαφος, ώστε

συγκεκριμένου τύπου δεδομένα να καταλήξουν σε συγκεκριμένους σταθμούς εδάφους. Επίσης, περιλαμβάνει τις απαραίτητες κεραίες, τους κατάλληλες πολυπλέκτες σημάτων και τυχόν φίλτρα ή και ενισχυτές σήματος. Η ανάλυση των απαιτήσεων επικοινωνίας παράγει έναν προϋπολογισμό που καθορίζει τις παραμέτρους για τον τύπο του εξοπλισμού και τον όγκο των δεδομένων που χρειάζεται να μεταδίδονται. Οι μηχανικοί χρησιμοποιούν τον προϋπολογισμό δεδομένων και τους προϋπολογισμό επικοινωνίας, μαζί με άλλες απαιτήσεις της αποστολής για το σχεδιασμό του υποσυστήματος επικοινωνιών και διαχείρισης δεδομένων.

#### **8.2.4.3 Υποσύστημα ηλεκτρικής ενέργειας**

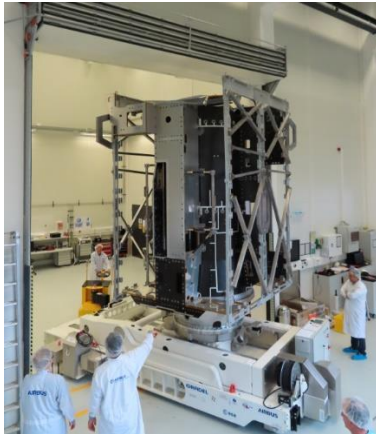
Το υποσύστημα ηλεκτρικής ενέργειας παρέχει την απαιτούμενη ενέργεια/ισχύ σε όλο το δορυφόρο και τα υποσυστήματά του. Η ηλεκτρική ισχύς σε ένα διαστημόπλοιο δεν διαφέρει από την ηλεκτρική ενέργεια που χρησιμοποιείται για τη λειτουργία της τηλεόρασής σας. Ένα διαστημικό σκάφος πρέπει να παράγει τη δική του ηλεκτρική ενέργεια από κάποια ενεργειακή πηγή. Στο Κεφάλαιο 11 θα δούμε πώς το υποσύστημα ηλεκτρικής ενέργειας μετατρέπει κάποια ενέργεια, όπως την ηλιακή ενέργεια, σε χρήσιμη ηλεκτρική ενέργεια και την αποθηκεύει για να λειτουργία ολόκληρου του διαστημικού σκάφους. Προσθέτουμε τις απαιτήσεις ηλεκτρικής ισχύος για κάθε ένα από τα υποσυστήματα του διαστημικού διαύλου ώστε να καθορίσουμε τον συνολικό προϋπολογισμό ηλεκτρικής ισχύος. Αυτός είναι και ο μεγαλύτερος σχεδιαστικός οδηγός του σχεδίου υποσυστήματος ηλεκτρικής ενέργειας.

#### **8.2.4.4 Υποσύστημα ελέγχου περιβάλλοντος και υποστήριξης ζωής**

Ένα διαστημικό σκάφος πρέπει να ρυθμίζει τη θερμοκρασία των εξαρτημάτων του ώστε να τα προστατέψει από πολύ χαμηλές και πολύ υψηλές θερμοκρασίες. Επιπλέον, στο διαστημικό λεωφορείο και το Διεθνή Διαστημικό Σταθμό, οι αστροναύτες πρέπει να προστατεύονται από το περιβάλλον του διαστήματος. Χρειάζονται μια ατμόσφαιρα στην οποία μπορούν να αναπνέουν, μια άνετη θερμοκρασία, σωστή υγρασία και πίεση, μαζί με νερό και τρόφιμα ώστε να διατηρούνται στη ζωή. Τα μη επανδρωμένα διαστημόπλοια δεν έχουν αυτές τις αυστηρές απαιτήσεις, ωστόσο, ο προσεκτικός έλεγχος της θερμοκρασίας παραμένει κρίσιμος για τη σωστή λειτουργία του ωφέλιμου φορτίου. Ο ρόλος του υποσυστήματος ελέγχου περιβάλλοντος και υποστήριξης ζωής είναι να παρέχει την απαιτούμενη θερμοκρασία, ατμόσφαιρα και όλες τις απαραίτητες συνθήκες ώστε να διατηρείται το ωφέλιμο φορτίο (συμπεριλαμβανομένων των αστροναυτών!) σε σωστές για τη λειτουργία του συνθήκες. Αντί να καθορίζουμε τον προϋπολογισμό του συγκεκριμένου υποσυστήματος, δηλώνουμε τις απαιτήσεις σχεδίασης του αναφερόμενοι σε κάποια αποδεκτά όρια λειτουργίας. Για παράδειγμα, ένας αισθητήρας ωφέλιμου φορτίου μπορεί να αντέχει σε θερμοκρασία από 0° έως 50° C ή ένας αστροναύτης να χρειάζεται ατμοσφαιρική πίεση  $1 \pm 0.1$  bar. Αργότερα, θα μάθουμε πως ένα διαστημικό σκάφος μετράζει τις θερμοκρασίες καθώς και άλλες παραμέτρους για να διατηρήσει τα ζωτικά εξαρτήματα και τους επιβάτες σε λειτουργία.

#### **8.2.4.5 Δομές και Μηχανισμοί Δορυφόρων**

Όταν ένα διαστημικό σκάφος εκτοξεύεται σε τροχιά, δέχεται μια παρόμοια δύναμη με εκείνη που ασκείται από το όχημα εκτόξευσης όταν επιταχύνει προς το διάστημα. Η δομή του διαστημικού σκάφους πρέπει να είναι αρκετά ανθεκτική ώστε να χειρίζεται όλα αυτά τα υψηλά φορτία και να συγκρατεί όλα τα άλλα υποσυστήματα στη θέση τους. Εκτός από τις στατικές δομές, τα διαστημικά σκάφη έχουν επίσης πολλούς μηχανισμούς που περιστρέφονται, επεκτείνονται και λυγίζουν. Έτσι για παράδειγμα επεκτείνονται διάφορες κεραίες και ηλιακοί συλλέκτες. Στο Κεφάλαιο 10 θα δούμε τα είδη δομών που απαιτούνται σε ένα διαστημικό σκάφος και θα μάθουμε μερικές από τις βασικές αρχές της δομικής ανάλυσης ώστε να ανακαλύψουμε τους τύπους μηχανισμών που απαιτούνται για την ολοκλήρωση της αποστολής.



**Σχήμα 144:** Η δομή του διαστημοπλοίου JUICE<sup>6</sup> του Ευρωπαϊκού Οργανισμού Διαστήματος. Η δομή κρατά όλα τα υποσυστήματα μαζί και τα προστατεύει από εξωτερικές και εσωτερικές διαταραχές (π.χ. δονήσεις, καταπονήσεις εκτόξευσης)

#### 8.2.4.6 Υποσύστημα προώθησης

Στο διάστημα εκμεταλλευόμαστε τον τρίτο νόμο του Νεύτωνα χρησιμοποιώντας πυραύλους για να μετακινήσουμε μια μάζα προς μία κατεύθυνση ώστε το διαστημικό σκάφος να κινηθεί προς την αντίθετη. Μεγάλοι πύραυλοι σε οχήματα εκτόξευσης παράγουν την απαραίτητη ώθηση για να μεταφέρουν το διαστημικό σκάφος σε τροχιά (Σχήμα 144). Όταν το διαστημικό σκάφος μπει σε τροχιά, μικρότεροι πύραυλοι στο υποσύστημα προώθησης παράγουν ωθήσεις για ελιγμούς μεταξύ των τροχιών και έλεγχο προσανατολισμού. Ο σχεδιασμός του υποσυστήματος προώθησης εξαρτάται σε μεγάλο βαθμό από τους προϋπολογισμούς προσανατολισμού και ελέγχου τροχιάς που καθορίζονται από το AOCS. Πρέπει όμως να λάβουμε υπόψη και άλλους παράγοντες, όπως τον αριθμό και το μέγεθος των ελιγμών καθώς και τη ταχύτητα με την οποία πρέπει αυτοί να πραγματοποιηθούν. Από αυτές τις απαιτήσεις, μπορούμε να παράγουμε μια εξίσου σημαντική παράμετρο σχεδιασμού για το σύστημα προώθησης, τον προϋπολογισμό προώθησης. Κανείς δεν θα ξεκινούσε ένα μακρύ ταξίδι με άδειο ρεζερβουάρ. Ομοίως, οι σχεδιαστές πρέπει να καθορίσουν προσεκτικά πόσο "αέριο" ή προωθητικό υλικό πρέπει να έχει ένα διαστημικό σκάφος για να ικανοποιήσει τις απαιτήσεις της αποστολής του. Στο Κεφάλαιο 5 έχουμε διερευνήσει την επιστήμη των πυραύλων με μεγαλύτερη λεπτομέρεια για να μάθουμε πως μεταφέρουν τα διαστημικά σκάφη εκεί θέλουμε στο διάστημα και πόσο προωθητικό υλικό χρειάζονται ανάλογα την αποστολή.

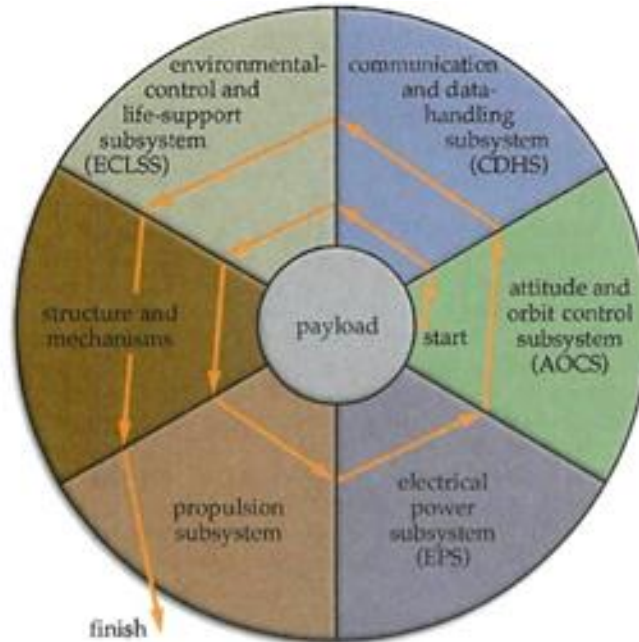
<sup>6</sup> <https://sci.esa.int/web/juice/-/50069-spacecraft>



**Σχήμα 145: Ο κινητήρας Vulcain του εκτοξευτή Ariane 5 ως κύριο μέρος του υποσυστήματος προώθησης**

### 8.2.5 Διαδικασία Σχεδιασμού Διαστημικών Συστημάτων

Η πρόκληση είναι να σχεδιάσουμε κάθε μηχανική και ηλεκτρική λεπτομέρεια του ωφέλιμου φορτίου, μαζί με κάθε υποσύστημα του διαύλου, και να ορίσουμε προσεκτικά τις διεπαφές μεταξύ τους. Για άλλη μια φορά, οι απαιτήσεις οδηγούν τη διαδικασία. Για παράδειγμα, η έννοια της αποστολής και το ωφέλιμο φορτίο καθορίζουν τους προϋπολογισμούς προσανατολισμού και ελέγχου τροχιάς. Αυτοί οι προϋπολογισμοί επηρεάζουν τις αποφάσεις σχεδιασμού σχετικά με το πώς το σύστημα ελέγχου μετράει και αλλάζει τον προσανατολισμό και τη θέση του διαστημικού οχήματος στο διάστημα. Αυτά τα αποτελέσματα καθορίζουν την αλλαγή της ταχύτητας  $\Delta V$  και των προωθητικών προϋπολογισμών που οδηγούν στο σχεδιασμό του συστήματος προώθησης. Το υποσύστημα επικοινωνίας και διαχείρισης δεδομένων πρέπει να λαμβάνει και να επεξεργάζεται εντολές για να μετακινεί το διαστημικό σκάφος και να τον προσανατολίσει. Το υποσύστημα προώθησης παρέχει το  $\Delta V$  για να αλλάξει η τροχιά του διαστημικού σκάφους, ενώ η δομή πρέπει να αντέχει τα φορτία που παράγονται κατά τους ελιγμούς. Το υποσύστημα ελέγχου περιβάλλοντος και υποστήριξης ζωής πρέπει να εξαλείψει την πρόσθετη θερμότητα που δημιουργεί το φως του ήλιου στο διαστημικό σκάφος. Τέλος, όλα τα υποσυστήματα χρειάζονται ηλεκτρική ενέργεια για να ικανοποιήσουν αυτές τις απαιτήσεις. Κατά τη διάρκεια του "βρόχου σχεδιασμού" της διαδικασίας σχεδίασης διαστημικών συστημάτων, αυτά τα λεπτομερή θέματα σχεδιασμού πρέπει να αποτελούν αντικείμενο συνεχούς διαπραγμάτευσης. Παρατηρήστε στο σχήμα 146 ότι όλα τα υποσυστήματα συνδέονται μεταξύ τους σε μια συνεχή αλυσίδα. Οι σχεδιαστές διαστημικών σκαφών πρέπει να γνωρίζουν πολύ καλά αυτήν την αλληλεξάρτηση μεταξύ του ωφέλιμου φορτίου και των υποσυστημάτων. Κατά τη διάρκεια του σχεδιασμού, οι φαινομενικά αθώες αλλαγές στο σχεδιασμό του υποσυστήματος ηλεκτρικής ενέργειας, για παράδειγμα, μπορεί να έχουν βαθιές επιπτώσεις στην απόδοση άλλων υποσυστημάτων. Έτσι, η διαδικασία σχεδιασμού είναι, από τη φύση της, επαναληπτική. Δηλαδή, αλλαγές σε ένα υποσύστημα οδηγούν σε αλλαγές σε ένα άλλο, το οποίο, με τη σειρά του, οδηγεί σε αλλαγές σε άλλο κοκ.



**Σχήμα 146:** Η διαδικασία σχεδίασης δορυφόρων/διαστημικών συστημάτων. Παρατηρούμε την αλληλεξάρτηση των υποσυστημάτων του δορυφόρου. Όταν αλλάζουμε την σχεδίαση ενός υποσυστήματος, είναι πιθανότερο να πρέπει κάνουμε αλλαγές σε άλλα (αν όχι όλα) υποσυστήματα (Sellers, Understanding Space)

Δεν μπορούμε ποτέ να επιτύχουμε έναν τέλειο σχεδιασμό. Μπορούμε να σχεδιάσουμε ένα εξαιρετικό σύστημα στη προσπάθειά μας να φτάσουμε το τέλειο. Ο χρόνος και το χρήμα όμως (δύο όψεις του ίδιου νομίσματος) είναι περιορισμένα. Κάποια στιγμή πρέπει να εγκαταλείψουμε το σχεδιασμό και να συνεχίσουμε με αυτά που έχουμε. Το καλύτερο που μπορούμε να ελπίζουμε είναι να φτάσουμε σε ένα σχέδιο που ικανοποιεί τις απαιτήσεις της απόδοσης της αποστολής έγκαιρα και εντός του προϋπολογισμού. Είναι επίσης σημαντικό να έχετε κατά νου ότι ο σχεδιασμός ενός υποσυστήματος είναι μόνο ένα μέρος του προβλήματος. Αφού έχουμε σχεδιάσει, πρέπει και να κατασκευάσουμε το διαστημικό σκάφος. Πολύ συχνά, τα αρχικά σχέδια ικανοποιούν τις απαιτήσεις της αποστολής, αλλά είναι δύσκολο ή αδύνατο να πραγματοποιηθούν! Κατά τη διάρκεια της διαδικασίας του σχεδιασμού, πρέπει να υπάρχει καλή επικοινωνία μεταξύ του μηχανικού που σχεδιάζει και του τεχνικού που υλοποιεί. Οι βασικές αρχές μας υποχρεώνουν να επικεντρωθούμε σε θέματα όπως οι τύποι των υλικών, ο αριθμός εξαρτημάτων, τα συνήθη εξαρτήματα και άλλες λεπτομέρειες που μπορούν να κάνουν τη διαφορά μεταξύ ενός χρήσιμου υποσυστήματος που μπορεί οικονομικά να κατασκευαστεί από αυτό που θα παραμείνει στα σχέδια.

### Εργαλεία σχεδιασμού και ανάλυσης

Με ίσως δισεκατομμύρια δολάρια ή ακόμα και ανθρώπινες ζωές που διακυβεύονται, οι προγραμματιστικές αποφάσεις και οι αποφάσεις σχεδιασμού είναι εξαιρετικά σημαντικές. Πρέπει να υποστηρίξουμε πολλές αποφάσεις, μεγάλες ή μικρές. Πώς ορίζουμε το θέμα της αποστολής; Τι ωφέλιμο φορτίο θα το ανιχνεύσει; Ποια είναι η μάζα του διαστημικού σκάφους; Το όχημα εκτόξευσης θα το μεταφέρει στη σωστή τροχιά; Για τη λήψη αυτών των αποφάσεων, οι σχεδιαστές αποστολής και οι μηχανικοί συστημάτων διαθέτουν μια μεγάλη ποικιλία εργαλείων σχεδίασης και ανάλυσης. Αυτά κυμαίνονται από απλούς υπολογισμούς στο χαρτί έως πολύπλοκες προσομοιώσεις υπολογιστών που

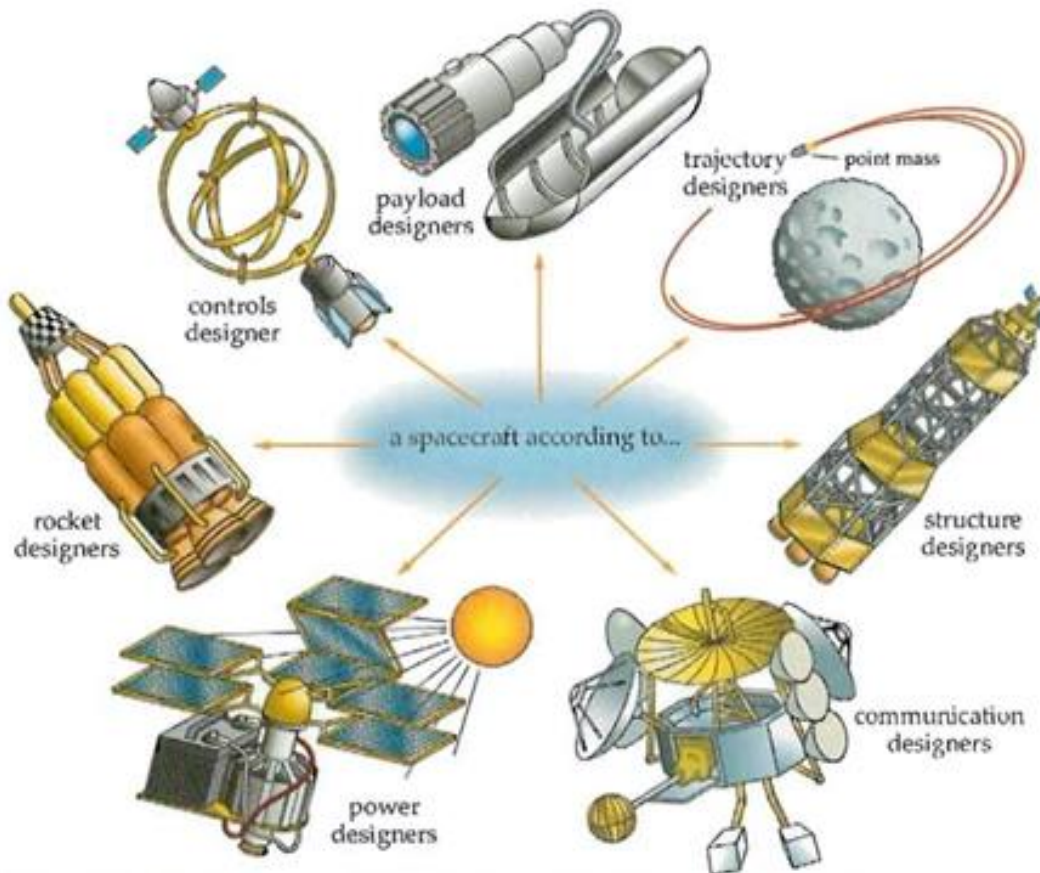
απαιτούν ώρες εκτέλεσης. Τα εργαλεία που βασίζονται σε ηλεκτρονικούς υπολογιστές καθίστανται ολοένα και περισσότερο απαραίτητα για τη σύγχρονη τεχνολογία των διαστημικών συστημάτων. Από τον αρχικό ορισμό της αποστολής μέχρι τις απαιτούμενες επαναλήψεις σχεδιασμού των υποσυστημάτων, τα εργαλεία επιτρέπουν στους σχεδιαστές να εκτιμήσουν με ακρίβεια την επίδραση μιας απόφασης σε ολόκληρη την αρχιτεκτονική της αποστολής. Τα πακέτα τα οποία υποστηρίζουν ανάλυση ρουτίνας και σχεδιασμού είναι πλέον ευρέως διαθέσιμα για την ταχεία εκτέλεση σύνθετης τροχιακής ανάλυσης (Εικόνα 8-14) ή για λεπτομερή τεχνικά σχέδια. Καθώς αυτά τα εργαλεία σχεδίασης και ανάλυσης γίνονται πιο εξελιγμένα και χρησιμοποιούνται ευρέως, καθίσταται ακόμη πιο σημαντικό οι σχεδιαστές της αποστολής να κατανοήσουν τις βασικές αρχές στις οποίες βασίζονται. Επειδή η τελική ευθύνη για την επιτυχία (ή αποτυχία) της αποστολής ανήκει στους σχεδιαστές αποστολής, πρέπει να ενεργούν προσεκτικά σε όλα τα αποτελέσματα της ανάλυσης. Οι σχεδιαστές πρέπει να κατανοούν τις παραδοχές/υποθέσεις μιας ανάλυσης προκειμένου να εκτιμήσουν το εύλογο των αποτελεσμάτων. Αν ένα διαστημικό σκάφος σπάσει, δεν μπορούμε να κατηγορήσουμε την προσομοίωση του υπολογιστή!



**Σχήμα 147: Ανάλυση Αποστολής (Mission Analysis): Υπολογιστικά συστήματα ανάλυσης διαστημικών αποστολών επιτρέπουν μηχανικούς/επιστήμονες διαστημικών συστημάτων να μοντελοποιήσουν πιθανά σενάρια της αποστολής και να συγκρίνουν/σταθμίζουν τις προδιαγραφές του συστήματος**

### Επικύρωση του σχεδίου

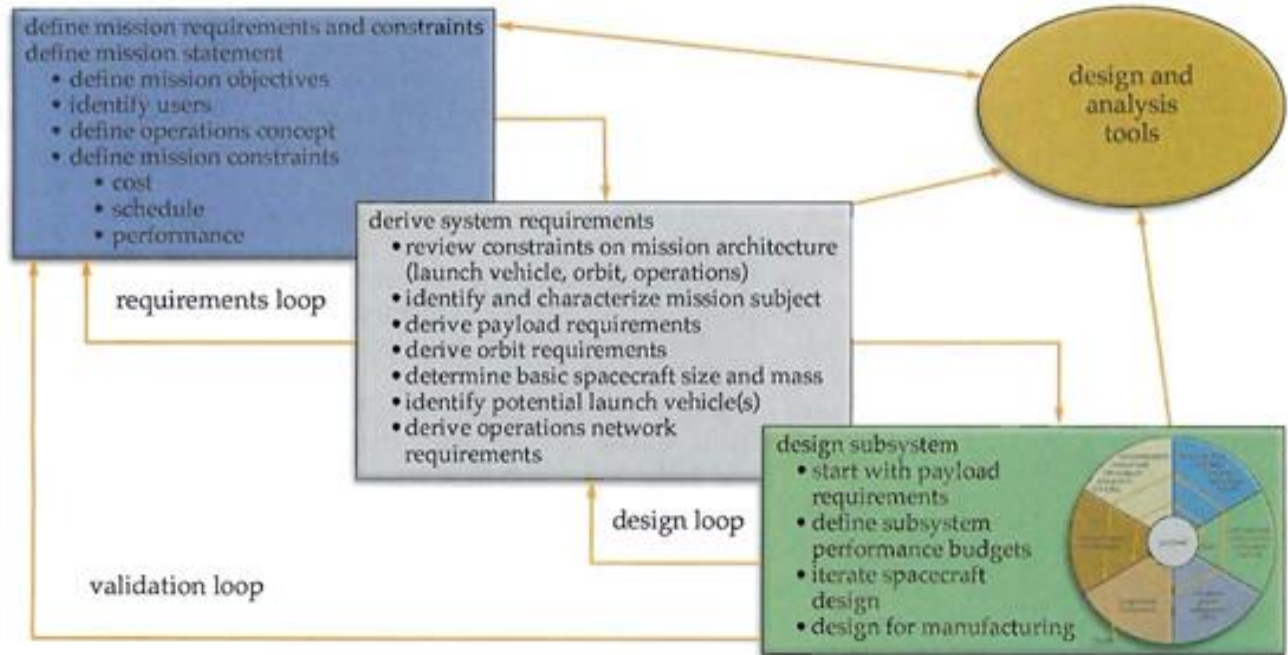
Μία από τις μεγαλύτερες προκλήσεις κατά τη φάση του σχεδιασμού είναι η διατήρηση ολόκληρης της αποστολής σαν ενιαίος στόχος. Πολύ συχνά, οι άνθρωποι που είναι υπεύθυνοι για συγκεκριμένα υποσυστήματα συμμετέχουν τόσο πολύ στο σχεδιασμό του δικού τους κομματιού που ξεχνούν ότι οι αποφάσεις τους επηρεάζουν άλλα υποσυστήματα και τη συνολική απόδοση της αποστολής. Το σχήμα 148 προσφέρει μια χιουμοριστική απεικόνιση στο πως οι διαφορετικοί σχεδιαστές υποσυστημάτων βλέπουν συχνά το διαστημικό σκάφος.



**Σχήμα 148: Σχεδίαση Διαστημοπλοίου/δορυφόρου με την οπτική της υπερβολικής εξειδίκευσης ανά υποσύστημα. Η υπερβολικά εις βάθος σχεδίαση ενός δορυφόρου δεν πρέπει να μας αποσπάσει από την 'μεγάλη εικόνα' της συνολικής διαστημικής αποστολής (Sellers, Understanding Space)**

Φυσικά, ο καθένας που συμμετέχει σε ένα τέτοιο έργο πρέπει να μη ξεχνά τη συνολική αποστολή. Γι' αυτό το λόγο, χτίζουμε το "βρόχο επικύρωσης". Αυτός ο βρόχος μας αναγκάζει να συγκρίνουμε συνεχώς τις αποφάσεις σχεδιασμού ενός υποσυστήματος με τις αρχικές απαιτήσεις αποστολής. Ακόμα και το πιο έξυπνα σχεδιασμένο υποσύστημα είναι άχρηστο αν δεν υποστηρίζει το ωφέλιμο φορτίο. Ακόμα και το πιο εξελιγμένο διαστημικό είναι άχρηστο αν δεν ικανοποιεί τις ανάγκες του χρήστη.

Το σχήμα 149 συνοψίζει ολόκληρη τη διαδικασία σχεδιασμού διαστημικών συστημάτων που εξετάσαμε σε αυτό το κεφάλαιο. Όπως μάθαμε, το ωφέλιμο φορτίο είναι αυτό που καθοδηγεί κυρίως τη διαδικασία σχεδιασμού.



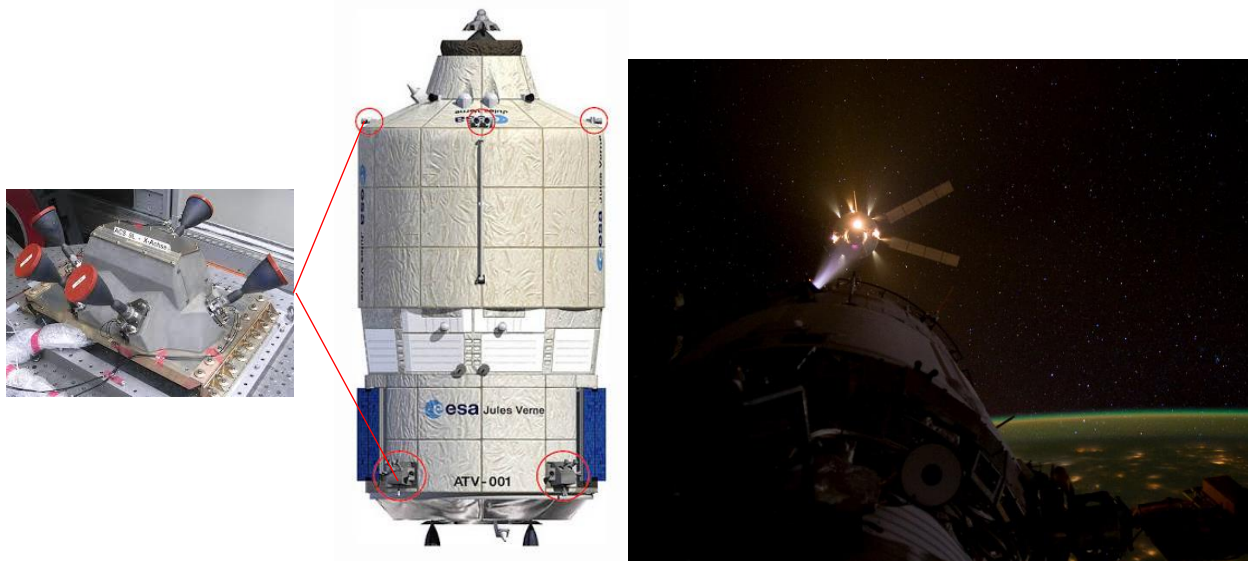
Σχήμα 149: Διαδικασία Σχεδιασμού Διαστημικών Συστημάτων. Ακολουθώντας την διαδικασία, οι μηχανικοί/επιστήμονες συστημάτων βρίσκουν τις σωστές σχεδιαστικές λύσεις παραμένοντας εντός του προϋπολογισμού και χρονικού προγράμματος (Sellers, Understanding Space)



## Κεφάλαιο 9

### Υποσύστημα προσδιορισμού και ελέγχου προσανατολισμού Δορυφόρων -ΥΠΕΠ (Attitude Determination and Control Subsystem – ADCS)

Σε κάθε ένα διαστημικό σκάφος, υπάρχει ένα υποσύστημα που "κατευθύνει" το όχημα ελέγχοντας τον προσανατολισμό του και την τροχιά του. Ένα διαστημικό σκάφος πρέπει να έχει το σωστό προσανατολισμό ώστε τα επιστημονικά του όργανα - οι κάμερες και οι κεραιές - να ευθυγραμμίζονται με συγκεκριμένα σημεία στη Γη. Για τον έλεγχο προσανατολισμού, οι πύραυλοι ή άλλες συσκευές περιστρέφονται γύρω από το κέντρο μάζας τους. Επίσης, ένα διαστημικό σκάφος πρέπει να είναι σε θέση να φτάσει και να διατηρήσει την τροχιά της αποστολής. Όπως έχουμε δει, για τον τροχιακό έλεγχο χρησιμοποιεί εξειδικευμένους προωθητές/πυραυλοκινητήρες κινητήρες που εκτελούν τους ελιγμούς.



Σχήμα 150:Το Διαστημικό σκάφος του ΕΟΔ ATV με τους προωθητές/κινητήρες του. Εικόνα από την διαδικασία προσέγγισης/ελιγμών του ATV στον ISS για την πρόσδεσή του. Το Υποσύστημα προσδιορισμού και ελέγχου προσανατολισμού (ΥΠΕΠ) κατευθύνει το διαστημικό σκάφος, ελέγχοντας την τροχιά (ύψος), προσανατολισμό (γωνία περιστροφής) χρησιμοποιώντας αισθητήρες/ενεργοποιητές

Το υποσύστημα που ελέγχει τον προσανατολισμό και την τροχιά του διαστημικού σκάφους, φυσικά ονομάζεται υποσύστημα ελέγχου θέσης, τροχιάς και προσανατολισμού (attitude and orbit control subsystem-AOCS). Αποκομίζουμε τις προδιαγραφές (ακρίβεια γωνίας κατεύθυνσης, ευστάθεια), για το AOCS από το ωφέλιμο φορτίο (π.χ. οπτικός αισθητήρας) και τις υπόλοιπες απαιτήσεις του συστήματος. Μπορούμε να χωρίσουμε το συνολικό προϋπολογισμό παραμέτρων του υποσυστήματος σε προϋπολογισμό ελέγχου προσανατολισμού και σε προϋπολογισμό ελέγχου τροχιάς. Ο προϋπολογισμός ελέγχου προσανατολισμού είναι η συνολική γωνιακή ορμή που μπορεί να χρησιμοποιήσει το διαστημικό σκάφος κατά τη διάρκεια της ζωής του. Ο προϋπολογισμός ελέγχου τροχιάς είναι η συνολική μεταβολή  $\Delta V$  που απαιτείται για την επίτευξη και τη διατήρηση της τροχιάς της αποστολής. Εκτός από το αριθμητικό εύρος στους προϋπολογισμούς απόδοσης, οι σχεδιαστές ενός υποσυστήματος AOCS πρέπει να γνωρίζουν πως το διαστημικό σκάφος θα καθορίσει τον προσανατολισμό του και την τροχιά του και ποιοι μηχανισμοί θα χρησιμοποιηθούν για τον έλεγχο αυτών. Στην συνέχεια, θα περιγράψουμε με περισσότερες λεπτομέρειες πως τα συστήματα ελέγχου χρησιμοποιούν αισθητήρες, πυραύλους και άλλα εργαλεία για να στρέψουν ένα διαστημικό σκάφος προς τη σωστή κατεύθυνση και να το θέσουν στη σωστή τροχιά.

Σε αυτή την ενότητα θα μάθετε να:

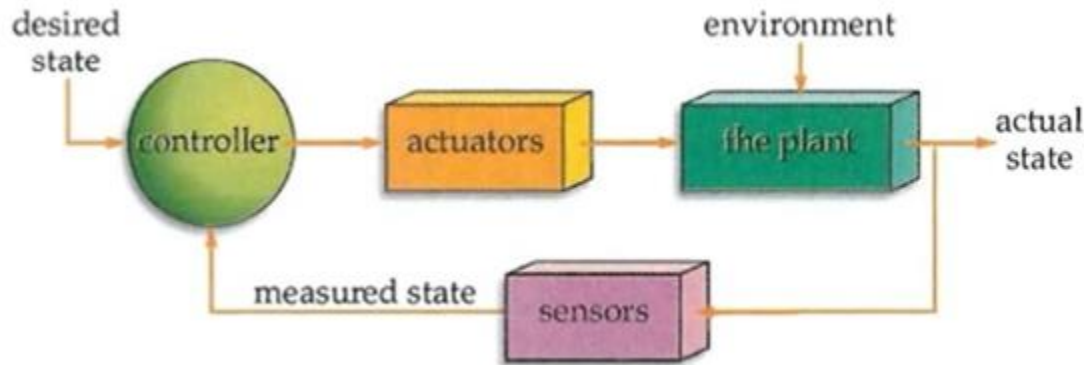
- Εξηγείτε και να εφαρμόζετε σημαντικές έννοιες της δυναμικής σε ένα πρόβλημα ελέγχου ενός διαστημικού οχήματος.
- Περιγράψετε τα βασικά στοιχεία και τις τεχνολογίες που χρησιμοποιούνται στα υποσυστήματα ελέγχου θέσης και να τα εξηγήσετε εύκολα σε σχηματικά διαγράμματα.

Θα αρχίσουμε τη συζήτησή μας για το υποσύστημα ελέγχου θέσης και προσανατολισμού (AOCS) εστιάζοντας στο τμήμα του προσανατολισμού. Για παράδειγμα, αν θέλουμε ένα διαστημικό σκάφος να τραβήξει φωτογραφίες ένα συγκεκριμένο σημείο στη Γη, πρέπει να ευθυγραμμίσουμε το ωφέλιμο φορτίο, ώστε να δείχνει στο σημείο αυτό. Θα πρέπει να ελέγξουμε τον προσανατολισμό του διαστημικού σκάφους ώστε να δείχνει προς τη Γη. Το "προς τη Γη" είναι η κατεύθυνση του ναδίρ σε διαστημικούς όρους. Η αντίθετη κατεύθυνση, μακριά από τη Γη προς το διάστημα, είναι η κατεύθυνση του ζενίθ. Ομοίως, τα οχήματα εκτόξευσης πρέπει να ελέγχουν τον προσανατολισμό τους για να μεταφερθούν στη σωστή τροχιά και να διατηρήσουν τις δυνάμεις που ασκούνται σε αυτά κατά μήκος του μακριού άξονα στον οποίο αντέχουν μεγαλύτερες καταπονήσεις.

Επειδή η λειτουργία του προσανατολισμού είναι τόσο σημαντική δίνεται ένα ξεχωριστό όνομα - υποσύστημα προσδιορισμού και ελέγχου προσανατολισμού (ADCS). Σε αυτή την ενότητα θα αναφερθούμε σε αυτό το υποσύστημα με αυτό το όνομα. Ανεξάρτητα από το όνομα που δίνεται στο υποσύστημα, η δουλειά του είναι να ρυθμίζει τον προσανατολισμό του διαστημικού σκάφους ώστε να δείχνει προς τη σωστή κατεύθυνση.

Ξέρουμε ότι όλα τα συστήματα ελέγχου κλειστού βρόχου έχουν τα ίδια βασικά συστατικά και λειτουργίες. Σε αυτή την ενότητα, η "επιθυμητή κατάσταση" είναι η συγκεκριμένος προσανατολισμός που πρέπει να έχει ένα όχημα. Ξεκινάμε καθορίζοντας αυτό τον προσανατολισμό. Στη συνέχεια, εξετάζουμε τη δυναμική συμπεριφορά του συστήματος για να

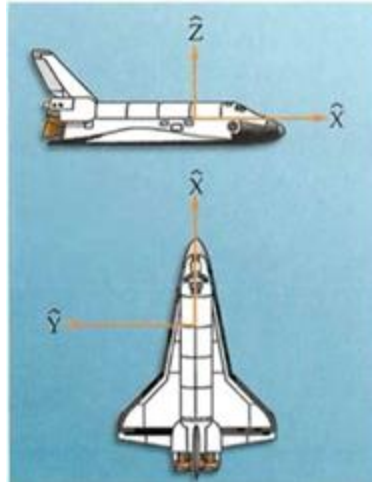
κατανοήσουμε τις βασικές αρχές που διέπουν τη γωνιακή του ορμή. Επίσης βλέπουμε πώς διάφορα φαινόμενα στο διαστημικό περιβάλλον επηρεάζουν τον προσανατολισμό του. Μετά από αυτή την εισαγωγή, θα στρέψουμε την προσοχή μας στους αισθητήρες και τα όργανα που χρησιμοποιούμε για να μάθουμε και να καθορίσουμε τον προσανατολισμό του διαστημικού σκάφους στο διάστημα. Πριν κοιτάξουμε τους ελεγκτές προσανατολισμού, θα εξετάσουμε πρώτα τους τύπους ενεργοποιητών θέσης που είναι διαθέσιμοι για τους σχεδιαστές. Έχοντας αυτά υπόψη, θα εξετάσουμε τελικά έναν ελεγκτή προσανατολισμού και θα δούμε πως όλα μαζί συνδυάζονται (Σχήμα 151).



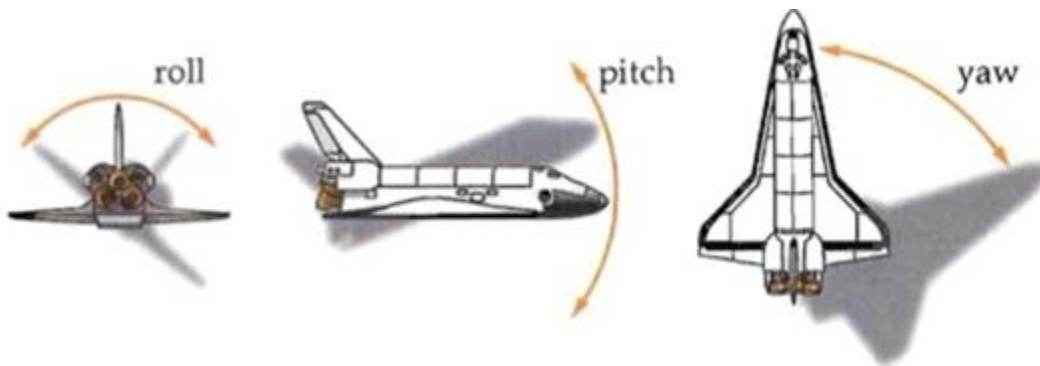
Σχήμα 151: Σύστημα ελέγχου κλειστού βρόχου, κύρια στοιχεία: Feedback - ανάδραση, ελεγκτής ή κατευθυντής (controller), επενεργητής ή ενεργοποιητής (actuator), plant = σύστημα, διαταραχή (disturbance), μέτρηση (measured state), επιθυμητή κατάσταση ή μεταβλητή (desired state), σφάλμα (error), ελεγχόμενη μεταβλητή/έξοδος (actual state)

### Σωστός προσανατολισμός

Υπενθυμίζουμε ότι για να περιγράψουμε την κίνηση ενός αντικείμενου χρειαζόμαστε κάποιο σύστημα συντεταγμένων. Για να περιγράψουμε τον προσανατολισμό όμως ενδιαφερόμαστε περισσότερο για τις περιστροφές από ότι για την μεταφορική κίνηση. Γι' αυτόν τον λόγο, ορίζουμε τον προσανατολισμό όσον αφορά γωνίες. Ο προσανατολισμός περιγράφεται ως η γωνιακή περιστροφή σε σχέση με ένα σύστημα συντεταγμένων με κέντρο το σώμα, που ονομάζεται σύστημα αναφοράς σώματος, όπου το X δείχνει τη μύτη, το Y το αριστερό πτερό και το Z την οροφή, όπως φαίνεται στο σχήμα 152. Οι γωνίες περιστροφής γύρω από τους άξονες X, Y, Z ονομάζονται αντίστοιχα roll (κλίση), pitch (πρόνευση) και yaw (εκτροπή), όπως φαίνεται στο Σχήμα 153.

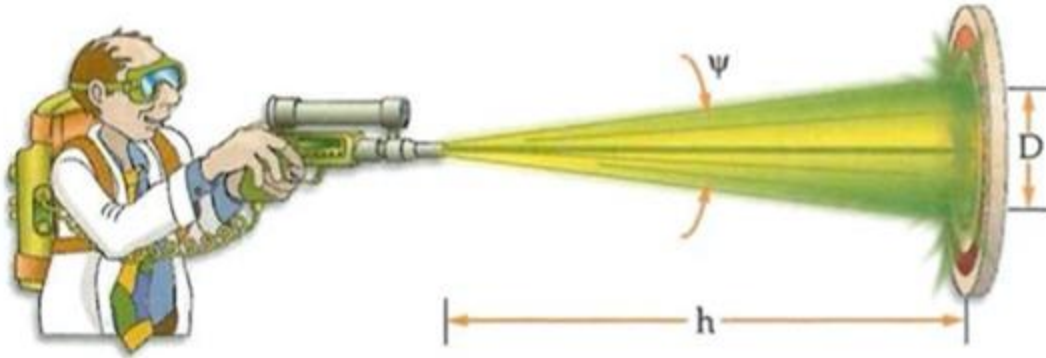


Σχήμα 152: σύστημα αναφοράς σώματος/ Σωματόδετοι άξονες



Σχήμα 153: Γωνίες Euler ή περιστροφής ενός διαστημικού σκάφους, που περιγράφουν την κατεύθυνση/κατάσταση του σκάφους roll (κλίση), pitch (πρόνευση) και yaw (εκτροπή)

Προφανώς, ένα διαστημικό σκάφος σε σχήμα ορθογωνίου δεν έχει μύτη ή φτερά. Αντ' αυτού, οι σχεδιαστές καθορίζουν τις προτιμώμενες κατευθύνσεις μέσω του κέντρου μάζας σε ένα σύστημα με κέντρο το σώμα και στη συνέχεια καθορίζουν τις γωνίες roll, pitch και yaw σε σχέση με αυτό. Τώρα που δείξαμε πως περιγράφεται ο προσανατολισμός ενός διαστημικού σκάφους, πως θα διαπιστώσουμε εάν αυτό έχει το σωστό προσανατολισμό; Συνήθως, περιγράφουμε τις απαιτήσεις ελέγχου προσανατολισμού όσον αφορά την ακρίβεια και το ρυθμό μεταβολής του. Για να καταλάβουμε τι εννοούμε με τον προσανατολισμό ή την ακρίβεια, υποθέστε ότι προσπαθούμε να «ρίξουμε» μια ακτίνα λέιζερ σε έναν στόχο, όπως φαίνεται στο Σχήμα 154.



**Σχήμα 154: Ακρίβεια θέσης/κατεύθυνσης (attitude accuracy/pointing)**

Η ικανότητά μας να κρατήσουμε τη δέσμη στο στόχο εξαρτάται από το μέγεθος του στόχου και την σταθερότητα του χεριού μας. Όσο μικρότερος είναι ο στόχος, τόσο πιο σταθερό θα πρέπει να είναι το χέρι μας για να διατηρήσουμε το λέιζερ στο στόχο. Ας ελπίσουμε ότι, ακόμη και όταν το χέρι μας τρέμει, η δέσμη θα τείνει να παραμείνει μέσα σε έναν κώνο κοντά στο στόχο. Το γωνιακό μέγεθος αυτού του κώνου καθορίζει την ακρίβεια,  $\psi$ . Για ένα διαστημικό σκάφος που προσπαθεί να στρέψει μια κεραία σε ένα σταθμό εδάφους στη Γη, για παράδειγμα, το σύστημα ελέγχου πρέπει να είναι αρκετά ακριβές ώστε να κρατά τη ραδιοσυχνότητα εστιασμένη πάνω στην κεραία του δέκτη. Ας υποθέσουμε ότι προσπαθούμε να διατηρήσουμε τη δέσμη του λέιζερ επικεντρωμένη σε έναν στόχο περίπου στο μέγεθος ενός πιάτου διαμέτρου 25, όπως φαίνεται στο σχήμα 154. Γνωρίζουμε την ακρίβεια,  $\psi$  και την απόσταση από τον στόχο,  $h$ . Για να βρούμε τη διάμετρο του στόχου,  $D$ , που μπορούμε να «χτυπήσουμε», χρησιμοποιούμε:

$$D = h\psi$$

Όπου

$D$ : διάμετρος στόχου που μπορούμε να «χτυπήσουμε» (m)

$h$ : απόσταση από στόχο (m)

$\psi$ : ακρίβεια (rad)

Ο Πίνακας 7 δείχνει την απαιτούμενη ακρίβεια για να παραμείνει η δέσμη εστιασμένη στο πιάτο για διάφορες αποστάσεις. Αντίστοιχα, ένα διαστημικό σκάφος τηλεπισκόπησης που διέρχεται από πάνω μας σε υψόμετρο 500 χιλιομέτρων θα χρειαζόταν ακρίβεια περίπου  $0,003^\circ$  για να στρέψει μια δέσμη λέιζερ απευθείας σε ένα σπίτι ( $D = 26\text{m}$ ). Ο έλεγχος μιας ακτίνας λέιζερ είναι ένα δύσκολο σενάριο επειδή η δέσμη έχει μια πολύ στενή ακτίνα εκπομπής. Οι αποστολές τηλεπισκόπησης που χρησιμοποιούν οπτικές ή υπέρυθρες κάμερες έχουν συνήθως φακούς με οπτικά πεδία αρκετών μοιρών, ανάλογα βέβαια με την εφαρμογή. Για την ευρύτερη δυνατή κάλυψη, οι αποστολές επικοινωνίας συχνά σχεδιάζουν κεραίες με πολύ ευρεία οπτική γωνία. Οι απαιτήσεις για τον προσανατολισμό διαστημικών σκαφών, επομένως, εξαρτάται από το θέμα, το οπτικό πεδίο του αισθητήρα και άλλους παράγοντες, όπως το χρόνος και οι γωνία θέασης.

Για να στοχεύσουμε ένα πιάτο με διάμετρο 25 cm	Ακρίβεια Κατεύθυνσης
1.4m	10°
14m	1°
140m	0.1°
1400m	0.01°

**Πίνακας 7: Ακρίβεια κατεύθυνσης**

Ο ρυθμός αλλαγής του προσανατολισμού είναι επίσης σημαντικό να ληφθεί υπόψη κατά τον καθορισμό των απαιτήσεων ελέγχου. Για παράδειγμα, ένα διαστημικό σκάφος τηλεπισκόπησης μπορεί να χρειαστεί να μετατοπίσει έναν αισθητήρα του μεταξύ διαφόρων στόχων στο έδαφος. Ο ρυθμός περιστροφής είναι η γωνιακή ταχύτητα που πόσο γρήγορα ένα διαστημικό σκάφος μπορεί να αλλάξει τον προσανατολισμό του.

Τώρα που καταλαβαίνουμε περισσότερα για τον προσανατολισμό, ας αρχίσουμε να βλέπουμε τη δυναμική συμπεριφορά ενός τέτοιου συστήματος. Θα στρέψουμε την προσοχή μας στους περιβαλλοντικούς παράγοντες που επηρεάζουν τον προσανατολισμό ενός διαστημικού σκάφους.

### Δυναμική συμπεριφορά

Όπως γνωρίζουμε, όλα τα περιστρεφόμενα αντικείμενα ακολουθούν τους νόμους κίνησης του Νεύτωνα. Μια περιστρεφόμενη μάζα έχει γωνιακή ορμή, η οποία είναι συνάρτηση του σχήματος, της κατανομής της μάζας καθώς και του ρυθμού περιστροφής της. Για παράδειγμα, ένα συμπαγές αντικείμενο με όλη τη μάζα του συγκεντρωμένη κοντά στο κέντρο του περιστρέφεται πολύ πιο εύκολα από ένα αντικείμενο στο οποίο η μάζα του βρίσκεται μακριά από το κέντρο του.



**Σχήμα 155: Μεταβολή Μάζας/Ροπής Αδράνειας:** Οι αθλητές του πατινάζ αλλάζουν την ροπή αδράνειας με κινήσεις των χεριών τους για να ελέγξουν τον ρυθμό περιστροφής τους. Διατηρώντας σταθερή την συνολική στροφορμή, θα περιστραφούν πιο γρήγορα φέρνοντας τα χέρια προς τα μέσα (χαμηλότερη ροπή αδράνειας) και πιο αργά με τα χέρια σε έκταση (ψηλότερη στροφορμή).

Όπως δείχνει το Σχήμα 155, αυτός είναι ο λόγος για τον οποίο οι αθλητές του πατινάζ φέρνουν τα χέρια τους κοντά στο σώμα για να γυρίσουν πιο γρήγορα και ανοίγουν τα χέρια τους για να επιβραδύνουν. Η κατανομή της μάζας περιγράφει τη ροπή αδράνειας του αντικειμένου,  $I$ . Γνωρίζοντας τη ροπή αδράνειας, και τη γωνιακή ταχύτητα του αντικειμένου  $\vec{\Omega}$ , μπορούμε να βρούμε τη γωνιακή ορμή του,  $\vec{H}$  :

$$\vec{H} = I\vec{\Omega}$$

Όπου

$\vec{\Omega}$ :διάνυσμα γωνιακής ταχύτητας (rad/s)

$\vec{H}$ : διάνυσμα γωνιακής ορμής (kg ×m<sup>2</sup>/s)

$I$ :ροπή αδράνειας (kg ×m<sup>2</sup>)

Γνωρίζουμε ότι για να μεταβάλλουμε την γραμμική ορμή ενός αντικειμένου πρέπει να ασκηθεί σε αυτό κάποια δύναμη. Από τον δεύτερο νόμο του Νεύτωνα έχουμε:

$$\vec{F} = \frac{d\vec{p}}{dt} = \dot{\vec{p}}$$

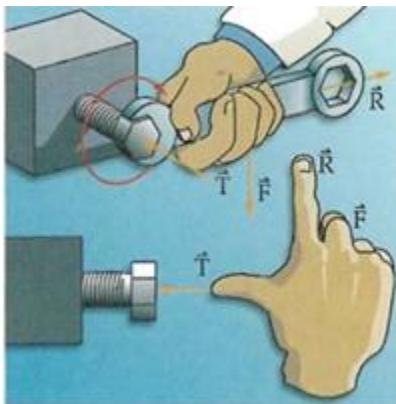
Όπου

$\vec{F}$ :διάνυσμα δύναμης (N)

$\vec{p}$ :διάνυσμα γραμμικής ορμής (kg×m/s)

$\dot{\vec{p}}$ : χρονική παράγωγος διανύσματος ορμής (kg·m/s<sup>2</sup>)

Καταλαβαίνουμε καθημερινά ότι η εφαρμογή δύναμης σε μια μάζα αλλάζει την ταχύτητά της. Πώς όμως εφαρμόζουμε δύναμη σε μια περιστρεφόμενη μάζα; Αν ασκήσουμε δύναμη σε έναν αθλητή του πατινάζ που περιστρέφεται, αυτός θα αρχίσει να κινείται σε ευθεία γραμμή κατά μήκος του πάγου ενώ θα συνεχίσει να γυρίζει. Τι γίνεται αν θέλουμε να αλλάξουμε μόνο το ρυθμό ή την κατεύθυνση της περιστροφής, χωρίς να τον μετακινήσουμε; Τότε πρέπει να εφαρμόσουμε ροπή. Μια ροπή στρέψης είναι μια δύναμη που προκύπτει όταν προσπαθούμε να περιστρέψουμε ένα αντικείμενο, όπως όταν χρησιμοποιούμε ένα κλειδί για να γυρίσουμε ένα μπουλόνι. Εφαρμόζουμε μια δύναμη σε κάποια απόσταση από το μπουλόνι, δημιουργώντας μια ροπή, όπως φαίνεται στην Εικόνα 156.



Σχήμα 156: Ροπή Στρέψης

Μια ροπή στρέψης σε μια κατεύθυνση σφίγγει το μπουλόνι. Μια ροπή προς την άλλη κατεύθυνση το χαλαρώνει. Μαθηματικά, ορίζουμε το διάνυσμα της ροπής ως το εξωτερικό γινόμενο του διανύσματος του φορέα θέσης της εφαρμοζόμενης δύναμης με το διάνυσμα της εφαρμοζόμενης δύναμης. Με άλλα λόγια, χρησιμοποιώντας τον κανόνα του δεξιού χεριού μπορούμε να υπολογίσουμε τη ροπή ως:

$$\vec{T} = \vec{R} \times \vec{F}$$

Όπου

$\vec{T}$ :διάνυσμα ροπής (Nm)

$\vec{R}$ : απόσταση από κέντρο μάζας έως το σημείο που εφαρμόζεται η δύναμη(m)

$\vec{F}$ :διάνυσμα εφαρμοζόμενης δύναμης (N)

Σύμφωνα με αυτή τη σχέση, μπορούμε να πάρουμε περισσότερη ροπή με την ίδια δύναμη απλά εφαρμόζοντας τη δύναμη μακρύτερα από το κέντρο περιστροφής. Για παράδειγμα, αν πιέσουμε την άκρη της πόρτας, μακριά από τους μεντεσέδες, η πόρτα κουνιέται εύκολα. Αν πιέσουμε την πόρτα ακριβώς δίπλα στους μεντεσέδες, είναι πολύ πιο δύσκολο να την περιστρέψουμε. Επιστρέφοντας στον Δεύτερο Νόμο του Νεύτωνα, μπορούμε τώρα να συνδέσουμε τη ροπή και τη γωνιακή ορμή. Ακριβώς όπως η δύναμη ισούται με το ρυθμό μεταβολής της γραμμικής ορμής, η ροπή είναι ο ρυθμός μεταβολής της γωνιακής ορμής. Με άλλα λόγια, αν εφαρμόσουμε μια ροπή σε ένα αντικείμενο, η γωνιακή του ορμή θα αλλάξει μέσω της σχέσης:

$$\vec{T} = \frac{d\vec{H}}{dt} = \dot{\vec{H}}$$

$\vec{T}$ :διάνυσμα ροπής (Nm)

$\vec{H}$ : διάνυσμα γωνιακής ορμής (kg ×m<sup>2</sup>/s)

$\dot{\vec{H}}$ : χρονική παράγωγος διανύσματος γωνιακής ορμής (kg×m/s<sup>2</sup>)

Συνεπώς, όταν η ροπή είναι μηδενική, η γωνιακή ορμή παραμένει σταθερή. Αργότερα, θα δούμε ότι μπορούμε να χρησιμοποιήσουμε αυτή τη βασική αρχή για να ελέγξουμε τον προσανατολισμό ενός διαστημικού σκάφους. Θυμηθείτε ότι αν εφαρμόσουμε μια δύναμη σε ένα αντικείμενο, θα επιταχυνθεί. Ομοίως, αν εφαρμόσουμε μια ροπή στρέψης σε ένα αντικείμενο, θα αρχίσει να γυρίζει γρηγορότερα και ταχύτερα. Δηλαδή, θα αποκτήσει γωνιακή επιτάχυνση,  $\vec{\alpha}$ . Συνεπώς:

$$\vec{T} = \dot{\vec{H}} = I\vec{\alpha}$$

Όπου

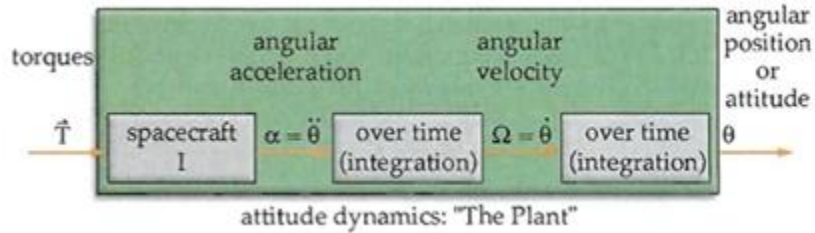
$I$ :ροπή αδράνειας (kg ×m<sup>2</sup>)

$\vec{\alpha}$ :διάνυσμα γωνιακής επιτάχυνσης (rad /s<sup>2</sup>)

Όπως γνωρίζουμε από τη γραμμική κίνηση, καθώς κάτι επιταχύνεται, η ταχύτητα του αυξάνεται. Εάν αφήσουμε μια μπάλα από κάποιο ύψος, αυτή επιταχύνει, κερδίζει ταχύτητα και πέφτει γρηγορότερα με το χρόνο. Ομοίως, όταν ένα αντικείμενο έχει γωνιακή επιτάχυνση με την

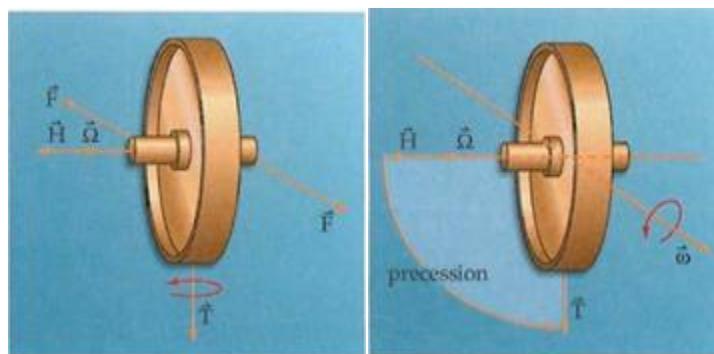


πάροδο του χρόνου, η γωνιακή ταχύτητα του,  $\vec{\Omega}$ , αυξάνεται. Έτσι, για να προσδιορίσουμε τον προσανατολισμό ενός διαστημοπλοίου, που περιγράφεται από μια γωνία  $\theta$  (γωνία κατά την οποία το διαστημικό σκάφος έχει περιστραφεί σε σχέση με τον προηγούμενο προσανατολισμό), πρέπει να βρούμε το χρονικό διάστημα που επιταχύνεται και το χρονικό διάστημα που κινείται με συγκεκριμένη ταχύτητα. Με άλλα λόγια, εφαρμόζοντας μια ροπή στρέψης σε ένα μη περιστρεφόμενο αντικείμενο (όπως ένα διαστημικό σκάφος), δημιουργούμε γωνιακή επιτάχυνση, οδηγώντας σε γωνιακή ταχύτητα και συνεπώς σε αλλαγή γωνιακής θέσης. Το μοντέλο που περιγράφει τη συμπεριφορά των διαστημικών σκαφών φαίνεται στο σχηματικό διάγραμμα του Σχήματος 157.



**Σχήμα 157: Δομικό Σχήμα υποσυστήματος δυναμικού προσανατολισμού.** Η ροπή που εφαρμόζεται στον δορυφόρο προκαλεί γωνιακή επιτάχυνση. Στον χρόνο η επιτάχυνση αυξάνει την γωνιακή ταχύτητα προκαλώντας μεταβολή του προσανατολισμού (στάση) του δορυφόρου (γωνίες περιστροφής)

Όταν εφαρμόζουμε μια ροπή σε ένα μη-περιστρεφόμενο διαστημικό σκάφος, συμβαίνουν πράγματα εύκολα προβλέψιμα. Για παράδειγμα, όταν γυρίζουμε μια βίδα με ένα κατσαβίδι, περιστρέφεται με τον τρόπο που περιμένουμε. Αν όμως το διαστημικό σκάφος γυρίζει όταν εφαρμόζουμε τη ροπή, η δυναμική γίνεται πιο περίπλοκη. Όπως γνωρίζουμε, ένα περιστρεφόμενο αντικείμενο έχει γωνιακή ορμή. Εάν εφαρμόσουμε μια ροπή παράλληλη προς την κατεύθυνση της γωνιακής ορμής, προκαλεί γωνιακή επιτάχυνση και αλλαγή στη γωνιακή ταχύτητα. Ωστόσο, αν εφαρμόσουμε τη ροπή σε κατεύθυνση μη παράλληλη προς το διάνυσμα της γωνιακής ορμής, συμβαίνει κάτι διαφορετικό. Στο σχήμα 158 (δεξιά), έχουμε ένα περιστρεφόμενο δίσκο με ένα ζεύγος δυνάμεων (ροπές στρέψης) που εφαρμόζεται σε αυτό. Θα περιμένατε η μάζα να περιστραφεί προς την ίδια κατεύθυνση που ασκείται η ροπή αλλά αυτό δεν συμβαίνει! Η μάζα αρχίζει να περιστρέφεται αριστερόστροφα γύρω από έναν άξονα που βγαίνει από τη σελίδα! Το φαινόμενο αυτό είναι γνωστό ως μετάπτωση.



**Σχήμα 158: (Δεξιά) Εφαρμογή ροπής σε περιστρεφόμενο δίσκο (Αριστερά) Μετάπτωση περιστρεφόμενου δίσκου**

Για τον δίσκο που φαίνεται στο σχήμα 158 (αριστερά), το διάνυσμα  $\vec{H}$  θα αρχίσει να μετακινείται προς το διάνυσμα  $\vec{T}$  (τα πράγματα θα ήταν διαφορετικά αν είχαμε αντικείμενο διαφορετικού σχήματος). Αυτή η μετακίνηση/μετάπτωση εμφανίζεται γύρω από ένα τρίτο διάνυσμα που ονομάζεται διάνυσμα μετάπτωσης,  $\vec{\omega}$ , και είναι κάθετο τόσο στο  $\vec{H}$  όσο και στο  $\vec{T}$ .

Για σταθερή ροπή στρέψης, ο ρυθμός μετάπτωσης είναι επίσης σταθερός. Δεν επιταχύνεται, όπως θα περίμενε κανείς! Όπως θα δούμε, το να γνωρίζουμε πώς ένα διαστημικό σκάφος κερδίζει γωνιακή ταχύτητα και τον τρόπο που πραγματοποιείται η μετάπτωση σε αυτό μας βοηθά να καθορίσουμε τις δυνάμεις για να προσαρμόσουμε τον προσανατολισμό του. Σημειώστε ότι η κατεύθυνση της μετάπτωσης εξαρτάται από το πως κατανέμεται η μάζα στο αντικείμενο - η ροπή αδράνειας της μάζας. Αναλύοντας τους λόγους για τους οποίους υπάρχει η μετάπτωση είναι πέρα από το πεδίο αυτού του βιβλίου.

Υπάρχει ένα ακόμη σημαντικό αποτέλεσμα της αλληλεπίδρασης μεταξύ ενός περιστρεφόμενου διαστημικού σκάφους και μιας εφαρμοζόμενης ροπής. Όλοι γνωρίζουμε αυτό μια μπάλα ή μια σφαίρα που περιστρέφεται φτάνει μακρύτερα από μία αντίστοιχη που δεν περιστρέφεται. Αυτό συμβαίνει επειδή η περιστροφή τις κάνει πιο σταθερές και ανθεκτικές σε εξωτερικές ροπές. Όσο πιο γρήγορα γυρίζουν, τόσο πιο σταθερές γίνονται. Αυτή η σταθερότητα αναφέρεται ως γυροσκοπική σταθεροποίηση ενός αντικειμένου. Η μαθηματική εξήγηση για το τι κάνει ένα περιστρεφόμενο αντικείμενο "πιο σταθερό" από ένα μη-περιστρεφόμενο αντικείμενο είναι πέρα από το πεδίο της συζήτησης μας. Ωστόσο, όπως θα δούμε, μπορούμε να εκμεταλλευτούμε αυτό το γεγονός για να κρατήσουμε το διαστημικό σκάφος στον προσανατολισμό που θέλουμε.

### Εξωτερικές ροπές – Διαταραχές

Γιατί λοιπόν δεν μπορούμε απλά να αφήσουμε τον δορυφόρο στο διάστημα με έναν συγκεκριμένο προσανατολισμό χωρίς να ασχοληθούμε ξανά μαζί του; Με την πάροδο του χρόνου, ακόμα και αν εμείς δεν κάνουμε τίποτα, οι περιβαλλοντικές επιπτώσεις που ονομάζονται διαταραχές θα οδηγήσουν ένα διαστημικό σκάφος μακριά από τον αρχικό προσανατολισμό του. Αυτές οι ροπές είναι εξαιρετικά μικρές (στις περισσότερες περιπτώσεις, κυριολεκτικά δεν μπορούσαν να σκοτώσουν μια μύγα) αλλά όπως οι μικροσκοπικές σταγόνες νερού μπορούν να διαβρώσουν τα βουνά με την πάροδο του χρόνου, έτσι και αυτές οι ροπές μπορούν τελικά να περιστρέψουν ακόμη και πολύ μεγάλα διαστημικά σκάφη. Μας απασχολούν τέσσερις κύριες πηγές εξωτερικών ροπών-διαταραχών:

- Βάθμωση βαρύτητας
- Η πίεση της ηλιακής ακτινοβολίας
- Το μαγνητικό πεδίο της Γης
- Ατμοσφαιρική οπισθέλκουσα/αεροδυναμική τριβή

### Ο ελεγκτής

Έως τώρα είδαμε τη δυναμική ενός περιστρεφόμενου συστήματος για να καταλάβουμε πως οι ροπές επηρεάζουν την γωνιακή ορμή ενός διαστημικού σκάφους συμπεριλαμβανομένων των διαταραχών. Τώρα μπορούμε να δούμε στον «εγκέφαλο» της υποσυστήματος προσδιορισμού και ελέγχου προσανατολισμού εξετάζοντας τον ελεγκτή.

Η δουλειά του ελεγκτή είναι να παράγει εντολές στους ενεργοποιητές ώστε το διαστημικό σκάφος να περιστραφεί στη σωστή διεύθυνση ανάλογα με τις απαιτήσεις της αποστολής, με συγκεκριμένη ακρίβεια και ρυθμό περιστροφής. Ο ελεγκτής πρέπει να γνωρίζει:

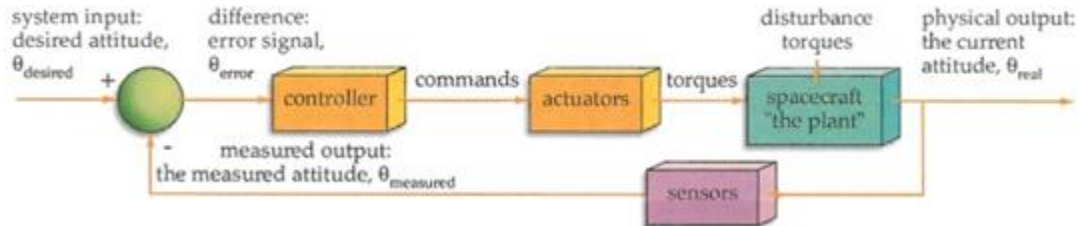
- Τι γίνεται τώρα
- Τι μπορεί να συμβεί στο μέλλον
- Τι έγινε στο παρελθόν

Το να γνωρίζει τι συμβαίνει τώρα είναι αρκετά εύκολο - ο ελεγκτής απλώς ζητά από τους αισθητήρες να υπολογίσουν τον τρέχοντα προσανατολισμό. Στη συνέχεια τον συγκρίνει με τον επιθυμητό προσανατολισμό. Η διαφορά αυτή είναι το σήμα σφάλματος. Με βάση αυτό το σήμα σφάλματος, ο ελεγκτής κατευθύνει το διαστημικό σκάφος στο σωστό προσανατολισμό. Δηλαδή, αν ο τρέχων προσανατολισμός είναι  $10^\circ$  λάθος (σφάλμα), ο ελεγκτής παράγει ένα σήμα για μια αλλαγή  $10^\circ$ . Αυτό είναι γνωστό ως αναλογικός έλεγχος και χρησιμοποιείται σχεδόν σε όλα τα συστήματα ελέγχου κλειστού βρόχου.

Ωστόσο, η πρόβλεψη του τι θα συμβεί και η μνήμη του τι συνέβη στο παρελθόν μπορεί να είναι εξίσου σημαντικά. Για παράδειγμα, αν χρειαστεί να σταματήσετε σε μια πινακίδα 'stop', πρέπει να ξέρετε όχι μόνο που βρίσκεστε, αλλά και πόσο γρήγορα κινείστε, ώστε να μπορέσετε να πατήσετε τα φρένα σας εγκαίρως. Ομοίως, για να αποκτήσει ένα διαστημικό σκάφος τον επιθυμητό προσανατολισμό, ο ελεγκτής του θα πρέπει να παρακολουθεί τον ρυθμό περιστροφής, καθώς και τον τρέχοντα προσανατολισμό του. Μπορείτε να σκέφτεστε αυτόν τον υπολογισμό του ρυθμού περιστροφής ως παράγωγο. Γνωρίζοντας τον ρυθμό περιστροφής ο χειριστής μπορεί να καθορίσει με μεγαλύτερη ακρίβεια τον τρόπο χειρισμού των ενεργοποιητών για να επιτύχει καλύτερη ακρίβεια. Αυτή η διαδικασία ονομάζεται διαφορικός έλεγχος.

Μερικές φορές μπορούμε να έχουμε καλύτερη ακρίβεια παρακολουθώντας πόσο κοντά είμαστε στην επίτευξη του επιθυμητού αποτελέσματος. Ένας τρόπος για να γίνει αυτό είναι ο ελεγκτής να παρακολουθεί τη γωνιακή διαφορά μεταξύ του μετρούμενου και του επιθυμητού προσανατολισμού,  $\Delta\theta$ . Όταν το διαστημικό σκάφος φτάσει στον επιθυμητό προσανατολισμό, αυτή η διαφορά,  $\Delta\theta$ , θα γίνει μηδέν. Εάν το σύστημα σταματήσει τους ενεργοποιητές του σε αυτό το σημείο, ο προσανατολισμός θα αρχίσει αμέσως να αλλάζει εξαιτίας των εξωτερικών ροπών-διαταραχών. Ένας έξυπνος ελεγκτής, ωστόσο, δεν θα κοιτάξει μόνο τη στιγμιαία  $\Delta\theta$ . Αντ' αυτού, θα διατηρούσε ένα ιστορικό, αθροίζοντας τα  $\Delta\theta$  με την πάροδο του χρόνου. Το αποτέλεσμα θα ήταν πάντα κάποια τιμή διαφορετική από το μηδέν που θα έλεγε στον ελεγκτή πόση ροπή να δημιουργήσει στη μόνιμη για να αντισταθμίσει τις διαταραχές. Αυτή η διαδικασία ονομάζεται ολοκλήρωση, γι' αυτό και ονομάζουμε αυτό το είδος ελέγχου ως ολοκληρωτικός έλεγχος. Οι σχεδιαστές τον χρησιμοποιούν για έλεγχο προσανατολισμό ώστε να πετύχουν υψηλή ακρίβεια.

Ανεξάρτητα από το σχήμα που χρησιμοποιείται, ο ελεγκτής συνδυάζει τις παρελθοντικές και τις τρέχουσες μετρήσεις του με την ικανότητα πρόβλεψης μιας μελλοντικής συμπεριφοράς για να αποφασίσει πως να χειριστεί τους ενεργοποιητές. Ένα σχηματικό διάγραμμα του υποσυστήματος ελέγχου προσανατολισμού ενός διαστημικού σκάφους δίνεται στο σχήμα 159.

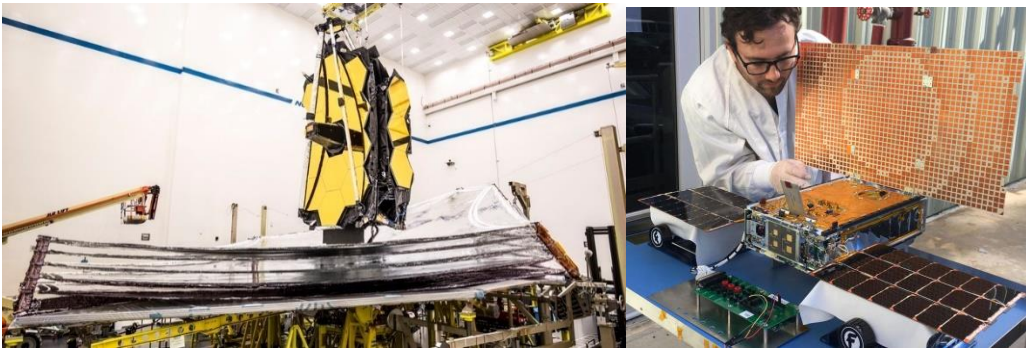


Σχήμα 159: Το Υποσύστημα προσδιορισμού και ελέγχου προσανατολισμού Δορυφόρων -ΥΠΕΠ (Attitude Determination and Control Subsystem – ADCS) περιλαμβάνει ως σύστημα ελέγχου κλειστού βρόχου τα εξής κύρια στοιχεία: ελεγκτής ή κατευθυντής (controller), επενεργητής ή ενεργοποιητής (actuator), Δορυφόρο (plant/σύστημα), αισθητήρες (sensors) που λειτουργούν ως ένα αυτόματο σύστημα που διατηρεί ή μεταβάλλει τον προσανατολισμό (attitude) του δορυφόρου ανάλογα με τις προδιαγραφές/ανάγκες της αποστολής

# Κεφάλαιο 10

## Υποσύστημα Δομών και Μηχανισμών

Όταν ένα διαστημικό σκάφος εκτοξεύεται σε τροχιά, δέχεται μια παρόμοια δύναμη με εκείνη που ασκείται από το όχημα εκτόξευσης όταν επιταχύνει προς το διάστημα. Η δομή του διαστημικού σκάφους πρέπει να είναι αρκετά ανθεκτική ώστε να χειρίζεται όλα αυτά τα υψηλά φορτία και να συγκρατεί όλα τα άλλα υποσυστήματα στη θέση τους. Εκτός από τις στατικές δομές, τα διαστημικά σκάφη έχουν επίσης πολλούς μηχανισμούς που περιστρέφονται, επεκτείνονται και λυγίζουν. Έτσι για παράδειγμα επεκτείνονται διάφορες κεραιές και ηλιακοί συλλέκτες. Σε αυτήν την ενότητα θα δούμε τα είδη δομών που απαιτούνται σε ένα διαστημικό σκάφος και θα μάθουμε μερικές από τις βασικές αρχές της δομικής ανάλυσης ώστε να ανακαλύψουμε τους τύπους δομών και μηχανισμών που απαιτούνται για την ολοκλήρωση μιας διαστημικής αποστολής.



**Σχήμα 160: (Αριστερά) Το Διαστημικό Τηλεσκόπιο James Webb (JWST) σε δοκιμές έκτασης του τηλεσκοπίου και θερμικής ασπίδας (Δεξιά) Ο ναυοδορυφόρος (cubesat 6U) Marco της NASA/JPL σε δοκιμές πιστοποίησης**

Οι προδιαγραφές σχεδίασης και κατασκευής του υποσυστήματος δομών και μηχανισμών (ΥΔΜ) μπορούν να διαφέρουν σημαντικά ανάλογα με:

- Την τροχιά/διαστημικό περιβάλλον
- Επιλογή διαστημικού φορέα/εκτοξευτή (φορτία, δυνάμεις, καταπόνηση, ροπές)
- Υποστήριξη και προστασία διαστημικών οργάνων/υποσυστημάτων (ευθυγράμμιση, ανοχής, θερμική υποστήριξη)

Το ΥΔΜ έχει ιδιαίτερα κρίσιμο ρόλο στις διαστημικές αποστολές καθότι όλη η αποστολή (και η επιτυχία της) μπορεί να βασίζεται ένα στοιχείο του υποσυστήματος όπως ένα μπουλόνι. Για παράδειγμα αν μια ηλιακή συστοιχία/πάνελ εκταθεί όταν ένας δορυφόρος μπει σε τροχιά αλλά αυτή αποκτήσει κάποιο πρόβλημα στην έκταση, στήριξη ή σταθεροποίηση, τότε ο δορυφόρος θα έχει λιγότερη η και καθόλου ισχύει με αποτέλεσμα την μερική ή και ολική απώλεια της αποστολής! Παράδειγμα προβληματικού υποσυστήματος αποτελεί η διπλή αντικατάσταση των ηλιακών συστοιχιών/πάνελ του διαστημικού

τηλεσκοπίου Hubble το 1993 λόγω παραμόρφωσης και ταλάντωσης (jitter) αστοχιών καλωδιώσεων το 2002<sup>7</sup>.

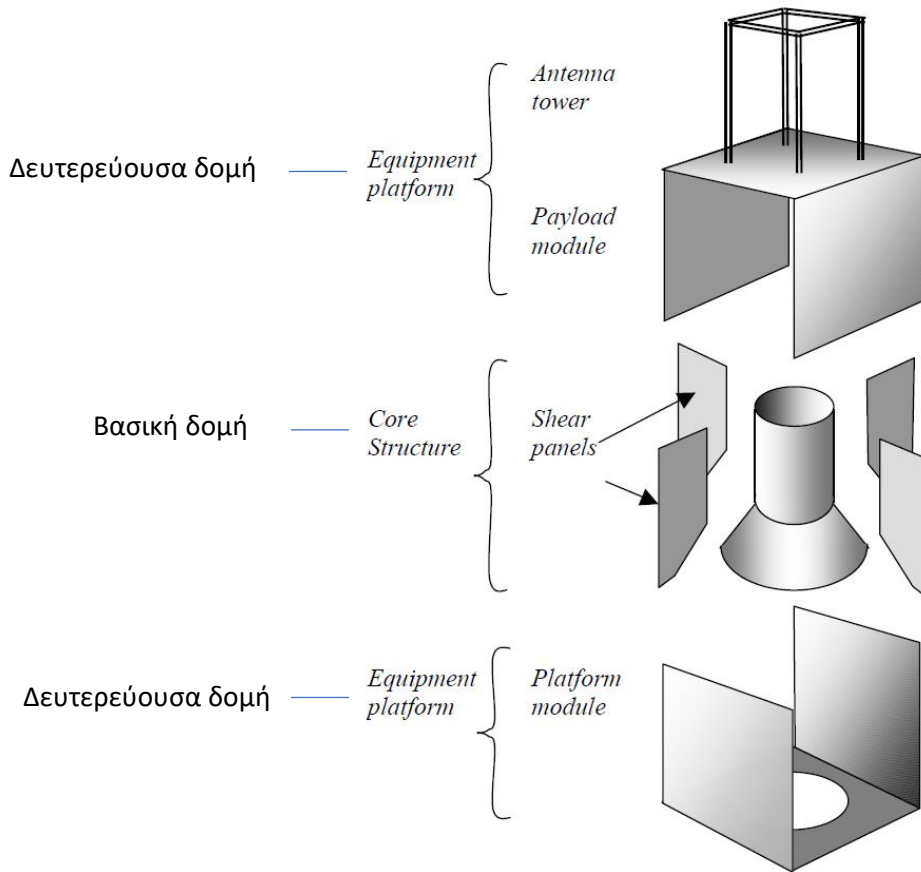


**Σχήμα 161: (Αριστερά) Το διαστημικό τηλεσκόπιο Hubble με παραμορφωμένες ηλιακές συστοιχίες (Δεξιά) Νέες στιβαρές ηλιακές συστοιχίες που εγκαταστάθηκαν σε αποστολή του Διαστημική Λεωφορείου το 1993 και το 2002<sup>1</sup>**

Στους περισσότερους δορυφόρους, το ΥΔΜ πιάνει το 10-20% της 'ξηρής μάζας' του, δηλαδή της μάζας άνευ καυσίμων. Η δομή ενός δορυφόρου αποτελείται από μέρη, την βασική δομή (primary) η οποία διατηρεί την φυσική ακεραιότητα του δορυφόρου. Μεταφέρει τα περισσότερα φορτία που ασκούνται στον δορυφόρο (πίεσης, ταλαντώσεων, έλξης). Η δευτερεύουσα δομή περιλαμβάνει τα διαστημικά όργανα, καλωδιώσεις, σωλήνες και υποστηρίγματα διαφόρων υποσυστημάτων του δορυφόρου.

---

<sup>7</sup> [http://www.esa.int/Enabling\\_Support/Space\\_Engineering\\_Technology/How\\_Hubble\\_got\\_its\\_wings](http://www.esa.int/Enabling_Support/Space_Engineering_Technology/How_Hubble_got_its_wings)

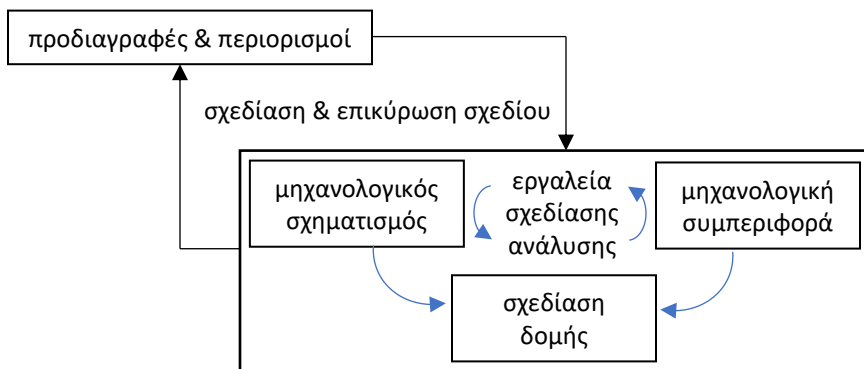


**Σχήμα 162: Η βασική δομή (primary) και δευτερεύουσα δομή (secondary) δορυφόρων**

Στο σχήμα 162 φαίνεται ο κύλινδρος, ο κώνος που μαζί με τα πάνελ διάτμησης συνθέτουν την βασική δομή. Ο κώνος περικλείει τον πυραυλοκινητήρα (apogee motor) και μέσα στο κύλινδρο βρίσκονται δύο δεξαμενές καυσίμων. Υπάρχουν δύο πρόσθετα διαμερίσματα/δομές που περικλείουν τα διαστημικά όργανα και τα υποσυστήματα της πλατφόρμας και αποτελούν και τα δύο δευτερεύουσες δομές.

Οι διάφοροι μηχανισμοί καταλαμβάνουν ένα μικρό ποσοστό της μάζας του δορυφόρου αλλά η επιτυχία ή αποτυχία τους καταλαμβάνει μεγάλο ποσοστό της συνολικής απόδοσης και λειτουργίας μια διαστημικής αποστολής. Μπορούμε να κατανείμουμε τους μηχανισμούς ανάλογα με τον αριθμό που αυτά χρειαστεί να λειτουργήσουν. Μηχανισμοί με χαμηλό κύκλο λειτουργίας είναι αυτοί που λειτουργούν μία ή δύο φορές όπως οι μηχανισμοί δοκού (booms), ο μηχανισμός διαχωρισμού του δορυφόρου από τον εκτοξευτή. Για τέτοιες λειτουργίες χρησιμοποιούνται πυροτεχνικοί επενεργητές που έχουν πολύ μικρές ποσότητες εκρηκτικών ώστε να κόψουν βίδες ή/και μπουλόνια ώστε να συγκρατήσουν κατασκευές μαζί χωρίς να είναι ανάγκη να συγκολληθούν και που θα πρέπει να κινούνται όταν μπει ο δορυφόρος σε τροχιά ή που πρέπει να εκταθούν/κινούνται. Μηχανισμοί με υψηλό κύκλο λειτουργίας (με επαναληψτικότητα) είναι ηλεκτροκινητήρες που περιστρέφουν κεραιές, ηλιακά πάνελ, βαλβίδες προωθητών αλλά και επενεργητών, γυροσκοπίων κλπ.

Για να κατανοήσουμε πώς το ΥΔΜ πρέπει να ανταποκριθούν στις προδιαγραφές μιας διαστημικής αποστολής θα πρέπει να κατανοήσουμε την διαδικασία μηχανικής συστημάτων (systems engineering) για την δομή δορυφόρων, όπως απεικονίζεται στο σχήμα 163.



Σχήμα 163: Μηχανική συστήματος και σχεδίαση δομής δορυφόρου

## 10.1 Βασικές Έννοιες Μηχανικής

Ανεξάρτητα αν φτιάχνουμε μία γέφυρα, αυτοκίνητο, δορυφόρο η μηχανική δομών είναι περίπου η ίδια. Μία δομή είναι οτιδήποτε μπορεί να μεταφέρει ένα φορτίο. Για τον άνθρωπο για παράδειγμα, ο σκελετός μας, μυς και ο ιστός μας αποτελούν την δομή του σώματός μας. Η δομή αυτή μας επιτρέπει με ενσωματωμένους παράγοντες ασφάλειας να κινούμαστε ακόμα και με ακραίες κινήσεις με μεγάλα φορτία εξαιτίας και της βαρύτητας με ασφαλή τρόπο.

Τα φορτία που ενεργούν και πρέπει να λάβουμε υπόψιν μας είναι

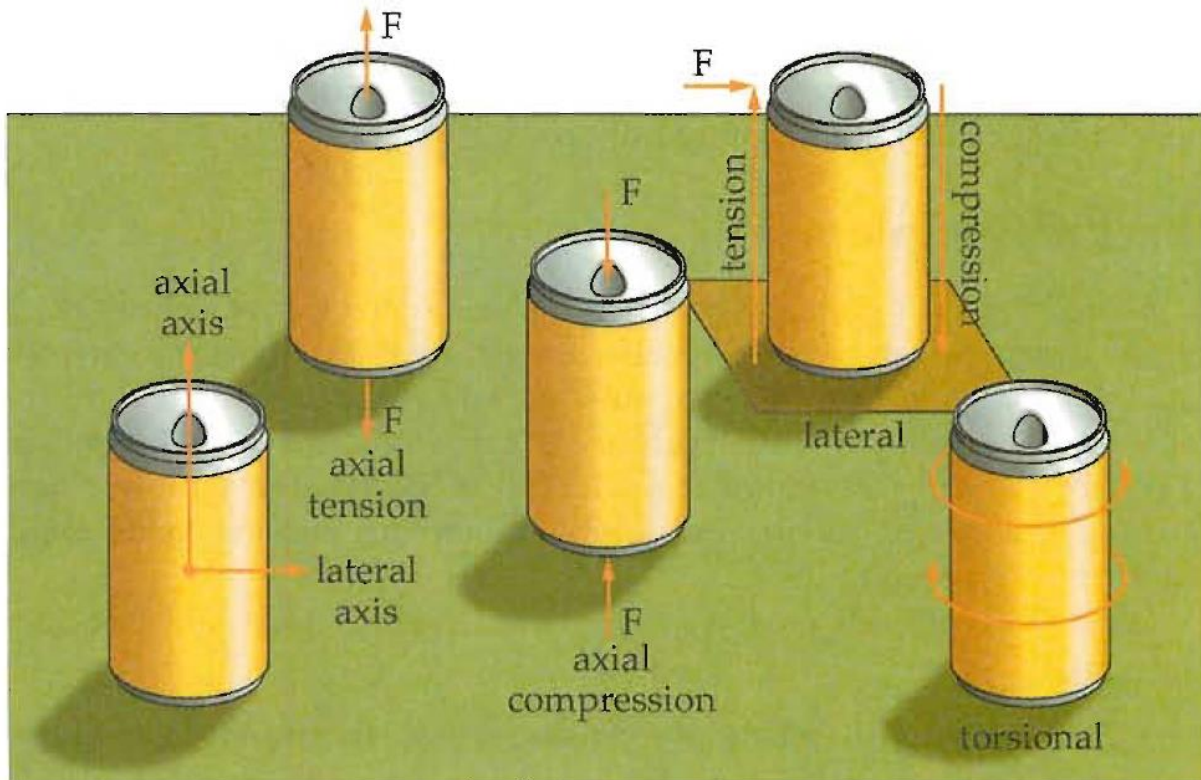
- Έλξη, ώθηση, συστροφή, κάμψη που δημιουργούν πίεση, τάση και διάτμηση
- Ταλάντωση
- Αλλαγή θερμοκρασίας – δημιουργία θερμικών τάσεων

### 10.1.1 Τύποι Φορτίων

Τα φορτία μπορεί να έχουν στατική και δυναμική μορφή σε σχέση με τον χρόνο. Μπορούμε επίσης να τα διακρίνουμε και ανάλογα με τον τρόπο με τον οποίο εφαρμόζονται στον άξονα περιστροφής μια κατασκευής. Οι τύποι Φορτίου (F) είναι:

- Στατικό (static) φορτίο – Φορτίο/Δυνάμεις που παραμένουν σταθερές
- Δυναμικό (dynamic) φορτίο - Φορτίο/Δυνάμεις που μεταβάλλονται
- Αξονικό (Axial) φορτίο – Φορτίο ευθυγραμμισμένο/παράλληλο με τον διαμήκη άξονα μιας κατασκευής/δομής
- Πλευρικό (Lateral) φορτίο - Φορτίο κάθετο στον διαμήκη άξονα μιας κατασκευής/δομής
- Φορτίο στρέψης (torsional) – Φορτίο που εφαρμόζει ροπή σε μια κατασκευή
- Θλιπτικό (compression) φορτίο – Φορτίο που έχει τη τάση να συμπιέζει/συνθλίβει
- Φορτίο (tension) εφελκυσμού - Φορτίο που έχει τη τάση να τεντώνει/εκτείνει





**Σχήμα 164: Τύποι Φορτίων**

Σε ένα σώμα που εφαρμόζονται αξονικά ή πλευρικά φορτία δημιουργούνται ροπές στρέψης. Θεωρούμε ότι μια δύναμη που εφαρμόζεται σε κάποια απόσταση μέσω ενός σημείου σύνδεσης δίνει ροπή κάμψης ίση με:

$$M = F d$$

Όπου,

$F =$  η δύναμη (N)

$D =$  η απόσταση του φορτίου από τα σημεία που εφαρμόζεται η δύναμη

Ένα από τα σημαντικότερα ερωτήματα στην ανάλυση δομών όταν αναλύουμε μία κατασκευή είναι αν θα 'σπάσει'. Για να απαντήσουμε στο ερώτημα αυτό θα δούμε 3 παραμέτρους που ποσοτικοποιούν τις αλλαγές σε μία δομή στην οποία εφαρμόζονται φορτία τάση (stress), καταπόνηση (strain), διάτμηση (shear stress). Αυτές είναι:

Τάση ( $\sigma$ ), δύναμη ανά μονάδα επιφάνειας.

$$\sigma = F / A \text{ (Nm}^2\text{)}$$

$F =$  Δύναμη (F)

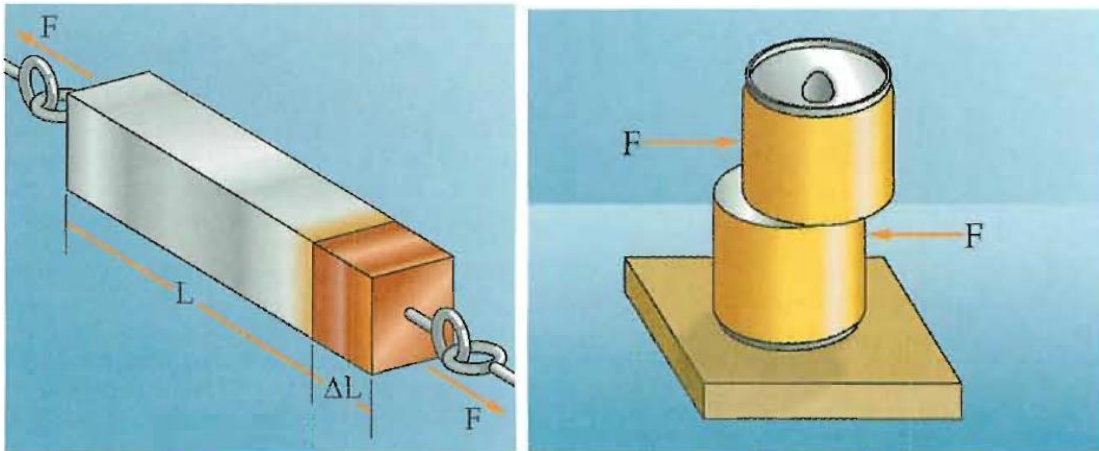
$A =$  επιφάνεια ( $\text{m}^2$ )

Καταπόνηση ( $\epsilon$ ) (strain), μεταβολή μήκους προς το αρχικό μήκος.

$$\varepsilon = \frac{\Delta L}{L}$$

$\varepsilon$  = καταπόνηση (m/m - αδιάστατο)  
 μεταβολή μήκους (m)  
 αρχικό μήκος (m)

Διάτμηση (shear stress) ονομάζεται η καταπόνηση που εμφανίζεται σε ένα σώμα όταν δύο ίσες και αντίθετες δυνάμεις ενεργούν κάθετα στον άξονα του.



**Σχήμα 165: Καταπόνηση ( $\varepsilon$ ) (strain) και Διάτμηση (shear stress)**

Όπως έχουμε δει, οι δορυφόροι υπόκεινται σε εξωτερικές διαταραχές από το διαστημικό περιβάλλον. Για παράδειγμα οι θερμικοί κύκλοι (σε τροχιά LEO φτάνουν τις 16 ανά ημέρα) είναι συχνοί και προκαλούν προβλήματα όπως στην περίπτωση του διαστημικού τηλεσκοπίου Hubble όπου η θερμική διαστολή και συστολή της δομής των ηλιακών συστοιχιών/πάνελ εξαιτίας των εκλείψεων σε κάθε τροχιά δημιούργησαν μικρές ταλαντώσεις σε όλη την δομή του δορυφόρου. Τα υλικά αντικείμενα έχουν την τάση να διαστέλλονται όταν θερμαίνονται και να συστέλλονται όταν ψύχονται. Το μέγεθος της διαστολής/συστολής εξαρτάται από τον συντελεστή θερμικής διαστολής του αντικειμένου  $\alpha$ , το αρχικό του μήκος  $L$  και τη μεταβολή της θερμοκρασίας  $\Delta T$ :

$$\delta = \alpha (\Delta T) L$$

$\delta$  = μεταβολή μήκους m

$\alpha$  = συντελεστή θερμικής διαστολής  $K^{-1}$

$\Delta T$  = μεταβολή θερμοκρασίας

$L$  = αρχικό μήκος

### 10.1.2 Ταλαντώσεις

Η διαδικασία της εκτόξευσης είναι μία ιδιαίτερα δυναμική διεργασία η οποία υποβάλει το φορτίο-δορυφόρο σε σημαντικές καταπονήσεις. Τα δυναμικά φορτία τα οποία μεταβάλλονται με ευρύ και τυχαίο τρόπο και λέγονται ταλαντώσεις (vibrations). Μας ενδιαφέρουν δύο τύποι επιπτώσεων των ταλαντώσεων. Η πρώτη επίπτωση είναι το σωρευτικό φορτίο που δημιουργείται από την εφαρμογή τυχαίων ταλαντώσεων στο χρόνο. Τέτοιες καταπονήσεις μπορούν να δημιουργήσουν κόπωση (fatigue) αλλά η σύντομη διάρκεια πτήσης σημαίνει ότι το πρόβλημα δεν είναι τόσο μεγάλο. Η δεύτερη επίπτωση είναι πολύ περισσότερη σημαντική και αφορά την απόκριση/αντίδραση της δομής σε ταλαντώσεις που

συμβαίνουν σε συγκεκριμένες συχνότητες. Όλα τα αντικείμενα δονούνται σε κάποια θεμελιώδη φυσική συχνότητα  $f$ , γνωστή ως συχνότητα συντονισμού:

$$f = \frac{1}{2\pi} \sqrt{\frac{k}{m}}$$

Όπου

$f$  = συχνότητα συντονισμού Hz

$k$  = σταθερά ελατηρίου  $Nm^{-1}$

$m$  = αδράνεια αντικειμένου kg

Δυσκαμψία Ελατηρίου – Σταθερά  $k$

Όταν μια εφελκυστική/θλιπτική δύναμη  $F$  εφαρμόζεται σε ένα ελατήριο δυσκαμψίας  $k$ , αυτό εκτείνεται ή συμπιέζεται κατά  $x$ :

$$k = F/x$$

Όπου

$k$  = σταθερά ελατηρίου  $Nm^{-1}$

$F$  = δύναμη N

$x$  = μεταβολή μήκους m

Η ενέργεια που αποθηκεύεται στο ελατήριο ισούται με

$$E = \frac{1}{2} kx^2$$

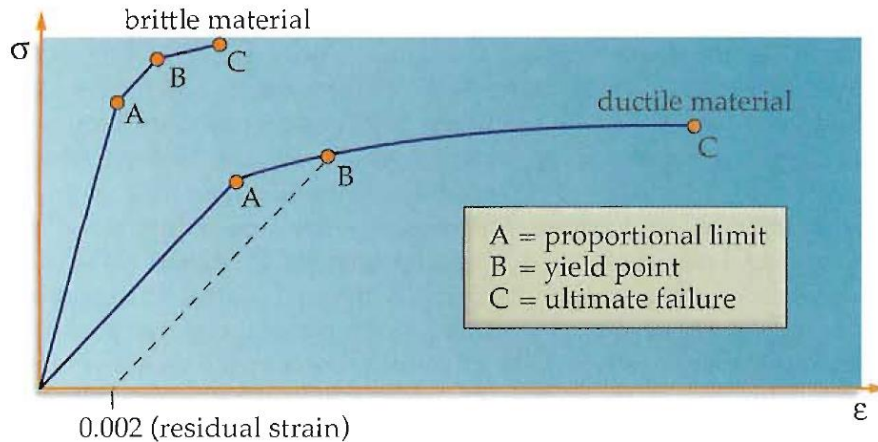
Μία δομή που έχει μεγάλη σταθερά ελατηρίου σημαίνει ότι είναι άκαμπτη και η σταθερά ελατηρίου είναι δείκτης ακαμψίας. Καθότι η συχνότητα συντονισμού είναι σημαντική και μπορεί να έχει καταστρεπτικές συνέπειες. Υπάρχουν δύο τρόποι να αποφευχθεί ο συντονισμός. Ο πρώτος είναι να εξασφαλιστεί ότι η θεμελιώδης συχνότητα της δομής είναι διαφορετική από την συχνότητα της ασκούμενης ταλάντωσης. Ο δεύτερος τρόπος είναι η χρήση αποσβεστήρων στην δομή. Η απόσβεση (damping) είναι ένας παθητικός ή ενεργητικός μηχανισμός να αποσβεστεί η ενέργεια των ταλαντώσεων.

### 10.1.3 Ιδιότητες Υλικών

Η επίδραση της τάση (stress), καταπόνηση (strain), διάτμηση (shear stress), ροπής στρέψης και θερμικών φορτίων εξαρτάται από τα υλικά που χρησιμοποιούμε στην δομή, δηλαδή τις ιδιότητες των υλικών. Χρησιμοποιούμε την ελαστικότητα για να μελετήσουμε τις ιδιότητες, όρια αντοχής και αντίδραση των υλικών, όπου:

Μέτρο ελαστικότητας = Τάση / Καταπόνηση

$$E = \frac{\sigma}{\epsilon} \text{ (Nm}^{-2}\text{)}$$



**Σχήμα 166: Καμπύλη Τάσης Παραμόρφωσης για όλκιμα (ductile) και ψαθυρά (brittle) υλικά**

Για να περιγράψουμε την αντοχή των υλικών χρησιμοποιούμε διαγράμματα τάσης (stress) και παραμόρφωσης (strain). Ολκιμότητα είναι ο δείκτης του βαθμού πλαστικής παραμόρφωσης που διατηρείται κατά την θραύση. Όλκιμα υλικά (ductile) υφίστανται πλαστική παραμόρφωση πριν από την θραύση. Ψαθυρά υλικά (brittle) ανέχονται μόνον πολύ μικρές πλαστικές παραμορφώσεις. Στην Καμπύλη Τάσης Παραμόρφωσης για όλκιμα (ductile) και ψαθυρά (brittle) υλικά (Σχήμα 166) υπάρχουν 3 κρίσιμα σημεία που χρησιμοποιούνται για την σύγκριση υλικών:

- Σημείο A: όριο αναλογίας, Μέχρι αυτό το επίπεδο τάσης, η σχέση τάσης παραμόρφωσης διέπτεται από τον νόμο του Hooke, οπότε και η γραφική παράσταση είναι γραμμική και η κλίση της αντιπροσωπεύει το μέτρο ελαστικότητας του υλικού
- Σημείο B: αντοχή διαρροής, Αυτό είναι το πιο χαρακτηριστικό σημείο χαρακτηρισμού της αντοχής των μετάλλων. Μερικά μέταλλα, όπως το μαλακό ατσάλι έχουν δύο όρια διαρροής, το άνω και το κάτω.
- Σημείο C: Αντοχή στην θραύση

#### 10.1.4 Άλλες Βασικές Αρχές Μηχανικής

Για την δομική σταθερότητα της δομής ενός δορυφόρου λαμβάνουμε υπόψιν και τους παρακάτω παράγοντες:

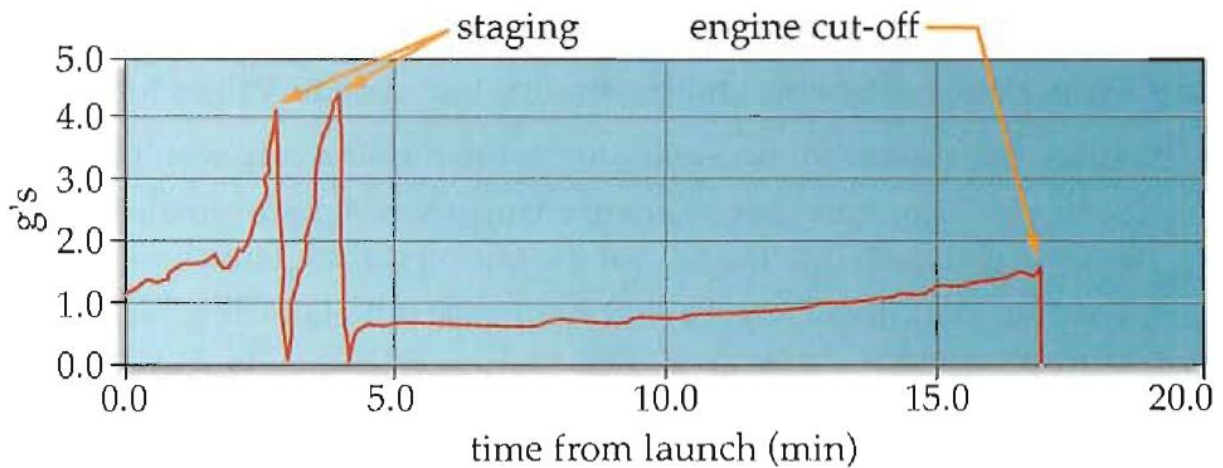
Παράγοντας ποιότητας: Ενίσχυση της ενέργειας ταλάντωσης κοντά στην συχνότητα συντονισμού μιας κατασκευής

Συντελεστής ασφάλειας: Περιθώριο σχεδίασης εφαρμόζεται στις κατασκευές ώστε να παραμένουν ασφαλείς υπό υπολογισμένα φορτία π.χ εάν το υπολογισμένο μέγιστο φορτίο μιας κατασκευής είναι  $F$ , η κατασκευή σχεδιάζεται με αντοχή σε φορτίο  $1.5F$  για λόγους ασφαλείας

#### 10.2 Το Περιβάλλον Εκτόξευσης

Κατά την διάρκεια της εκτόξευσης, ο δορυφόρος υποβάλλεται σε ένα σύνολο από βίαια φορτία και δυνάμεις αποτελούμενο από επιταχύνσεις, μηχανικών κρούσεων (shock), θόρυβο και ταλαντώσεις. Η πρώτη προτεραιότητα είναι να μην υπάρξει κάποιο καταστροφικό πρόβλημα με τον δορυφόρο, ειδικά από τις επιταχύνσεις 'g-load' που αναπτύσσουν θλιπτικές φορτίσεις στον διαμήκη άξονα (μακρύ άξονα) του εκτοξευτή. Στο σχήμα 167 αποτυπώνονται τα φορτία κατά την διάρκεια εκτόξευσης ενός πυραύλου. Φαίνεται ότι τα φορτία αυξάνονται στα 4g στα πρώτα λεπτά, μετά μειώνονται φτάνοντας στο μηδέν πριν αυξηθούν και πάλι. Χρησιμοποιώντας τα στάδια, με τους αντίστοιχους κινητήρες, δομή και δεξαμενές

και έχοντας καταναλώσει τα καύσιμά τους, το κάθε στάδιο αποδεσμεύεται, η επιτάχυνση πέφτει στο μηδέν πριν ξεκινήσει η καύση του επόμενου σταδίου και αρχίζει πάλι να αυξάνεται η επιτάχυνση του πυραύλου. Στο σχήμα απεικονίζεται ένας πύραυλος τριών σταδίων. Στο τέλος του τρίτου σταδίου, η επιτάχυνση πέφτει στο μηδέν και μένει εκεί γιατί ο εκτοξευτής έχει φτάσει στην τροχιά του. Όσο αυξομειώνεται η επιτάχυνση η δομή του πυραύλου λειτουργεί όπως ένα ελατήριο όταν αυτό έχει αποδεσμευτεί από μία θέση συμπίεσης. Οι μηχανικοί δομών μελετούν αυτά τα μεταβατικά φορτία χαμηλής συχνότητας με τα φορτία που προκαλούν οι επιταχύνσεις για να βρουν τα ημιαστικά (quasi-static) φορτία.



Σχήμα 167: Φορτία Εκτόξευσης

### 10.3 Μηχανική Διάρθρωση Δορυφόρων

Η σχεδίαση μιας δομής για να επιβιώσει το περιβάλλον εκτόξευσης είναι μια σχετικά βατή διαδικασία. Αλλά η σχεδίαση ενός δορυφόρου με συγκεκριμένη διάρθρωση και προδιαγραφές για τα επιστημονικά όργανα και υποσύστημα τα οποία πρέπει να φέρει και ταυτόχρονα να προστατεύει από το διαστημικό περιβάλλον, είναι περισσότερο περίπλοκη. Οι προϋπολογισμοί μάζας περιλαμβάνουν την μάζα και τον όγκο και καθορίζονται από την διαστημική αποστολή και την ανυψωτική ικανότητα του εκτοξευτή, όπως και από την διάμετρο του αεροδυναμικού κελύφους (fairing) του πυραύλου. Μία άλλη κρίσιμη προδιαγραφή είναι το κέντρο μάζας και οι ροπές αδράνειας που είναι σημαντικά στοιχεία για το υποσύστημα προσανατολισμού. Άλλες σημαντικές προδιαγραφές είναι ο σχεδιασμός των διεπαφών (interfaces) δορυφόρου των οπτικών πεδίων των οργάνων και αισθητήρων, των θερμικών ιδιοτήτων και της διαδικασίας συναρμολόγησης, ολοκλήρωσης και δοκιμών (assembly, integration and testing – AIT). Η σχεδιαστική διαδικασία του ΥΔΜ περιλαμβάνει τα παρακάτω στάδια:

- Λειτουργικές απαιτήσεις
- Κατασκευαστικές απαιτήσεις
- Δομές δειγμάτων
- Σχεδιασμός
- Ανάλυση
- Επαλήθευση

Οι λειτουργικές απαιτήσεις περιλαμβάνουν:

- Υποστήριξη οργάνων ζεύξης και ωφέλιμου φορτίου
- Διεπαφή για την εκτόξευση του οχήματος

- Ευθυγράμμιση μονάδων
- Θερμικός έλεγχος
- Περιβαλλοντική θωράκιση

Η κατασκευή περιλαμβάνει όλα τα μηχανικά στοιχεία. Περιέχει τις μονάδες ζεύξης και το ωφέλιμο φορτίο. Έχει σχεδιαστεί για να αντέχει σε όλα τα αναμενόμενα φορτία κατά τη διάρκεια της αποστολής. Η κατασκευή συνδέεται με το όχημα εκτόξευσης. Διαθέτει σύστημα σύνδεσης και διαχωρισμού και συμμορφώνεται με τους περιορισμούς του πυραύλου (μηχανικό περίβλημα). Η δομή παρέχει ευθυγράμμιση όλων των μονάδων, για σκοπούς αδράνειας, αξονικής περιστροφής, καθώς και προσανατολισμού κάμερας και κεραίας. Ο θερμικός έλεγχος των μονάδων του διαστημικού σκάφους παρέχεται με παθητικά και ενεργά μέσα. Η δομή προστατεύει τις μονάδες από περιβαλλοντικές επιδράσεις, όπως χειρισμός και μικρο-μετεωρίτες.

Οι κατασκευαστικές απαιτήσεις περιλαμβάνουν:

- Δομικά φορτία
- Συχνότητες συντονισμού
- Λόγος αδράνειας και άξονες
- Χειρισμός
- Ενσωμάτωση
- Προσβασιμότητα υποσυστήματος

Ο σχεδιασμός πρέπει να λαμβάνει υπόψη τα δομικά φορτία κατά τη διάρκεια της αποστολής, συμπεριλαμβανομένων των λειτουργιών εδάφους, αποστολής, δοκιμής, εκτόξευσης και τροχιάς. Υπάρχουν περιορισμοί για τον εκτοξευτή σχετικά με τις ελάχιστες συχνότητες συντονισμού, για να αποφευχθεί η σύζευξη κραδασμών μεταξύ του εκτοξευτή και του διαστημικού σκάφους. Ο λόγος αδράνειας και οι άξονες περιστροφής είναι σημαντικοί για το μέγεθος του συστήματος ελέγχου προσανατολισμού. Τα υποσυστήματα πρέπει να είναι προσβάσιμα για δοκιμή, αφαίρεση ή τροποποίηση όταν το διαστημικό σκάφος βρίσκεται στο εδάφος. Η δομή πρέπει να έχει ορισμένα σημεία στερέωσης για το χειρισμό του εδάφους, για παράδειγμα σημεία προσάρτησης γερανού. Η ενσωμάτωση του δορυφόρου στον εκτοξευτή πρέπει να ληφθεί υπόψη, έτσι ώστε να είναι δυνατή η πρόσβαση σε όλους τα συνδεδεμένα σημεία και τα σημεία του εξοπλισμού να μην εμποδίζουν κάποια άλλη μονάδα.

Ο μηχανολογικός σχεδιασμός ενός δορυφόρου είναι μία επαναληπτική διαδικασία και απαιτεί συνδυασμό λειτουργικών απαιτήσεων και περιβαλλοντικών περιορισμών. Ο σχεδιασμός είναι μια επαναληπτική διαδικασία, η οποία έχει ως είσοδο τις απαιτήσεις της αποστολής και τους περιορισμούς εκτοξευτή. Η κύρια δομή σχεδιάζεται, αναλύεται και βελτιστοποιείται ώστε να πληροί όλες τις προδιαγραφές. Η ανάλυση ενός σχεδίου δορυφόρου γίνεται ακολουθώντας τα παρακάτω βήματα:

- Ανάλυση με τη βοήθεια υπολογιστή
- Μηχανικά μοντέλα δοκιμών (mechanical/test models)
- Ανάλυση συζευγμένου φορτίου
- Ο σχεδιασμός αναλύεται χρησιμοποιώντας μοντέλα σε υπολογιστή.
- Αυτά τα μοντέλα έχουν μαθηματική περιγραφή της δομής και των τμημάτων του διαστημικού σκάφους.

Το μοντέλο υπόκειται σε καταπονήσεις και η απόκριση του συστήματος υπολογίζεται για τον προσδιορισμό της κατανομής της καταπόνησης στον δορυφόρο σε διάφορες συχνότητες. Όταν ολοκληρωθεί η διαδικασία σχεδιασμού και βελτιστοποίησης, προστίθεται ένα μαθηματικό μοντέλο του οχήματος εκτόξευσης και αναλύεται η συνδυασμένη απόδοση. Αυτή η ανάλυση καθορίζει τα δομικά

φορτία στη διεπαφή και προβλέπει τα επίπεδα δόνησης που θα δεχτεί το διαστημικό σκάφος κατά την εκτόξευση. Τα επίπεδα δόνησης στις δοκιμές καθορίζονται από αυτά τα αποτελέσματα.

Η δομή του διαστημικού σκάφους είναι ένας συμβιβασμός μεταξύ πολλών αντικρουόμενων απαιτήσεων. Απαιτείται πλήρης κατανόηση ολόκληρης της αποστολής για να εξασφαλιστεί το βέλτιστο αποτέλεσμα σχεδιασμού. Η δομή του διαστημικού σκάφους είναι ένα σύστημα που διασυνδέεται με όλες τις άλλες ενότητες με πολλούς τρόπους, έτσι ώστε όλες οι ενότητες και τυχόν τροποποιήσεις σε αυτές τις ενότητες να λαμβάνονται συνεχώς υπόψη.

Ένα σχέδιο δορυφόρου είναι απαραίτητο να επαληθευθεί ώστε να διασφαλισθεί η μηχανική ακεραιότητα της δομής αλλά και η συνολική επιτυχία της αποστολής. Αυτό γίνεται με:

- Μηχανική επιβεβαίωση της ανάλυσης σε υπολογιστή με δοκιμή του μηχανικού μοντέλου
- Επανάληψη ανάλυσης συζευγμένου φορτίου σε υπολογιστή μετά την ενημέρωση του μοντέλου με τα δεδομένα δοκιμής
- Δοκιμές στο μοντέλο πτήσης

Ένα αντιπροσωπευτικό μοντέλο του δορυφόρου κατασκευάζεται και δοκιμάζεται σε επίπεδα που είναι 1.5 έως 2 φορές υψηλότερα από τα αναμενόμενα φορτία πτήσης. Αυτό γίνεται για την επαλήθευση των περιθωρίων σχεδιασμού. Η απόκριση αυτής της μηχανικής δομής μετράτε και αναλύεται. Τα αποτελέσματα αυτής της ανάλυσης χρησιμοποιούνται για την ενημέρωση του μοντέλου δομής στον υπολογιστή. Η ανάλυση συζευγμένου φορτίου επαναλαμβάνεται χρησιμοποιώντας το ενημερωμένο μοντέλο. Το μοντέλο πτήσης του διαστημικού σκάφους δοκιμάζεται σε επίπεδα ίσα με την αναμενόμενη δόνηση της πτήσης. Δεν πρόκειται για έλεγχο του σχεδιασμού, αλλά για επαλήθευση της κατασκευής.

#### 10.4 Συμπεριφορά υλικών στο Διάστημα

Το διαστημικό περιβάλλον (κενό, ατομικό οξυγόνο, θερμοκρασίες, κοσμικές ακτίνες) δημιουργούν ένα ιδιαίτερο περιβάλλον για τους δορυφόρους άρα και τα υλικά που θα χρησιμοποιήσουμε για τα κατασκευάσουμε. Οι παράγοντες που επηρεάζουν τα υλικά είναι:

- Μαγνητισμός
- Εξαέρωση
- Αγωγιμότητα
- Αναλογία δύναμης / βάρους
- Διάβρωση
- Συμβατότητα

Όλα τα υλικά του διαστημικού σκάφους πρέπει να ελέγχονται για να διασφαλίζεται η συμβατότητα με την αποστολή. Τα μαγνητικά υλικά μπορούν να επηρεάσουν τα πειράματα στο διαστημικό σκάφος και τον έλεγχο προσανατολισμού όταν γίνεται με μαγνητικά μέσα. Στο κενό του διαστήματος τα πτητικά συστατικά των υλικών μπορούν να εξατμιστούν και να συμπυκνωθούν σε άλλες επιφάνειες. Αυτό θα μπορούσε να προκαλέσει την απώλεια ιδιοτήτων του υλικού και την υποβάθμιση των οπτικών ιδιοτήτων, για παράδειγμα ηλιακών κυψελών, φακών κάμερας και θερμικών επιφανειών ελέγχου. Άλλοι παράγοντες που πρέπει να ελεγχθούν είναι:

- Πρέπει να προσδιοριστεί η ηλεκτρική και θερμική αγωγιμότητα των υλικών.
- Ο λόγος αντοχής προς βάρος των υλικών πρέπει να βελτιστοποιηθεί.
- Πρέπει να προσδιοριστεί η σταθερότητα των υλικών έναντι της διάβρωσης και να ληφθούν μέτρα για να αποφευχθεί αυτό.

- Τα υλικά που έρχονται σε επαφή μεταξύ τους πρέπει να είναι συμβατά - θερμική διαστολή, γαλβανική διάβρωση και χρήση συγκολλητικών.
- Τοξικότητα
- Διαθεσιμότητα
- Μηχανική ικανότητα

Τα υλικά και τα σχέδια πρέπει να ελέγχονται για την αποφυγή προβλημάτων κατά το στάδιο της κατασκευής. Το βηρύλλιο, για παράδειγμα, είναι τοξικό, ορισμένα επικαλύμματα είναι καρκινογόνα - Πρέπει να λαμβάνονται ειδικές προφυλάξεις από τους χειριστές-μηχανικούς. Ορισμένα υλικά και εξαρτήματα έχουν μεγάλο χρόνο παράδοσης, δεκαοκτώ μήνες για κάποιο βύσμα τύπου D δεν είναι υπερβολικό. Πρέπει να είναι δυνατή η κατασκευή των αντικειμένων. Είναι πολύ εύκολο να προσδιοριστούν αδύνατες ανοχές και λειτουργίες. Όταν συναρμολογείτε ένας δορυφόρος η ετοιμάζεται για δοκιμές πρέπει να λάβουμε υπόψη:

- Βαρύτητα
- Καθαρισμός
- Δονήσεις και καταπονήσεις
- Μετακίνηση
- Πρόσβαση
- Σύνδεση και αποσύνδεση
- Σκόνη, υγρασία, θερμοκρασία

Το διαστημικό σκάφος υπόκειται σε ένα ευρύ φάσμα επιρροών. Οι προδιαγραφές σχεδιασμού και χειρισμού πρέπει να λάβουν όλα αυτά υπόψη, για να διασφαλιστεί ότι το προϊόν θα είναι σωστό. Η βαρύτητα της Γης αλλάζει τις καταπονήσεις στη δομή σε σύγκριση με το διάστημα. Όσο μεγαλύτερες είναι οι δομές τόσο πιο σημαντικές γίνονται. Τα εξαρτήματα και οι συνδεσμολογίες θα πρέπει να έχουν καθαριστεί. Αυτό μπορεί να γίνει υπερηχητικά, κάτι που μπορεί να οδηγήσει σε καταπονήσεις. Ο γενικός χειρισμός των εξαρτημάτων και των συνδεσμολογιών θα προκαλέσει δονήσεις και καταπονήσεις. Η μετακίνηση θα προκαλέσει δονήσεις, ειδικά όταν εμπλέκονται μεγάλα μέρη ή μεγάλες αποστάσεις ή όταν ο δορυφόρος απαιτεί κλίση Η πρόσβαση πρέπει να είναι δυνατή σε μέρη του δορυφόρου, μερικές φορές αυτό σημαίνει ανύψωση, κλίση ή αφαίρεση εξαρτημάτων. Η σύνδεση και η αποσύνδεση των μονάδων μπορεί να προκαλέσει σοκ και φθορά. Η ατμόσφαιρα στις περιοχές ολοκλήρωσης/ενσωμάτωσης πρέπει να ελέγχεται ώστε να ελαχιστοποιείται η επίδραση της σκόνης και των ακραίων θερμοκρασιών και υγρασίας.

Οι δοκιμές εδάφους που απαιτούνται για την πιστοποίηση ενός δορυφόρου είναι:

- Γενική μη μηχανική δοκιμή
- Δόνηση
- Σοκ/Κρούση
- Ανάπτυξη μονάδας
- Ιδιότητες μάζας

Οποιαδήποτε δοκιμή ή λειτουργία με τον δορυφόρο μπορεί να προκαλέσει καταπόνηση, σοκ και φθορά, π.χ. ηλεκτρική θέρμανση. Στον προσδιορισμό και την εκτέλεση των δοκιμών πρέπει να επιτευχθεί ισορροπία μεταξύ επαρκούς χαρακτηρισμού των συστημάτων και αποφυγής υπερβολικής πίεσης στα μέρη της πτήσης. Οι μονάδες και το ολοκληρωμένο διαστημικό σκάφος πρέπει να υποβληθούν σε δοκιμές δόνησης για να ελεγχθεί η κατασκευή και τα ελαττωματικά υλικά. Αυτό μπορεί να περιλαμβάνει τυχαίες, ακουστικές και ημιτονοειδείς δονήσεις. Το διαστημικό σκάφος θα υποβληθεί σε δοκιμές σοκ.



Αυτό μπορεί να γίνει χρησιμοποιώντας ένα μηχάνημα προσομοίωσης κραδασμών, ή ενεργοποιώντας πραγματικές πυροτεχνικές συσκευές για την προσομοίωση των σοκ κατά την πτήση. Τα πάνελ και οι κεραίες που αναπτύσσονται στο διάστημα πρέπει να δοκιμαστούν στο έδαφος και η βαρύτητα δημιουργεί μεγάλες καταπονήσεις στην κατασκευή. Μετρώνται: οι ιδιότητες της μάζας ως ολική μάζα, ροπές αδράνειας, κύριοι και δευτερεύοντες άξονες και κέντρο βάρους. Αυτές οι δοκιμές προκαλούν κίνηση και δόνηση στη δομή και απαιτούν πολλές εργασίες χειρισμού.

### **10.5 Συμπεράσματα**

Κάθε φάση ενός διαστημικού σκάφους έχει το δικό της συγκεκριμένο περιβάλλον. Η επιρροή όλων των περιβαλλοντικών παραγόντων σχετικές με την δομή του, όπως και αυτές που προκύπτουν από την εκτόξευση, πρέπει να λαμβάνεται υπόψη στο στάδιο σχεδιασμού και ανάπτυξης για να διασφαλιστεί ότι ο δορυφόρος μπορεί να εκπληρώσει την αποστολή του. Επειδή συχνά οι απαιτήσεις για τις διάφορες φάσεις της αποστολής είναι αντιφατικές, είναι επιτακτική ανάγκη να κατανοηθούν πλήρως όλες οι φάσεις πριν ξεκινήσει η λεπτομερής διαδικασία σχεδιασμού της δομής του δορυφόρου. Μόνο τότε θα είναι δυνατή η επίτευξη των σωστών συμβιβασμών που απαιτούνται για την επιτυχή σχεδίαση του δορυφόρου.

**Παράδειγμα 10.1**

Μια ομάδα πανεπιστημίου σχεδιάζει ρίσο-δορυφόρο 1 kg που πρέπει να αποδεσμευτεί με ταχύτητα 0.3m/s σε σχέση με το όχημα εκτόξευσης στο οποίο είναι συνδεδεμένο. Αυτή η ταχύτητα διαχωρισμού επιτυγχάνεται με ένα ελατήριο, το οποίο μπορεί να συμπιεστεί κατά 2.5 cm.

(i) Υποθέτοντας ότι όλη η ενέργεια στο συμπιεσμένο ελατήριο μετατρέπεται σε κινητική ενέργεια του δορυφόρου, υπολογίστε την «ακαμψία» του ελατηρίου (δηλαδή τη σταθερά ελατηρίου, k) που απαιτείται.

(ii) Εάν το ελατήριο δεν ευθυγραμμίζεται πλήρως έτσι ώστε η γραμμή δύναμης του να δρα μέσω ενός σημείου 1 mm που εκτοπίζεται από το κέντρο μάζας του διαστημικού σκάφους, υπολογίστε τη μέση δύναμη και την προκύπτουσα μέση ροπή που δρα στον δορυφόρο.

(iii) Δεδομένου ότι ο δορυφόρος έχει ροπή αδράνειας  $6 \times 10^{-4} \text{ kg m}^2$  για τον κατάλληλο άξονα, υπολογίστε τον ρυθμό ανατροπής του δορυφόρου κατά το διαχωρισμό (σε περιστροφές ανά λεπτό) και σχολιάστε την ανάγκη για ακριβή ευθυγράμμιση του ελατηρίου.

**Λύση**

(i) Η ΚΕ του διαχωρισμένου δορυφόρου =  $0.5 \text{ m}^2 = 0.5 \times 1 \times 0.32 = 0.045 \text{ J}$  Ενέργεια αποθηκευμένη στο ελατήριο =  $0,5 k x^2$

Έτσι, εξισώνοντας:  $k = 0.09/0.0252 = 144 \text{ Nm}^{-1}$

(ii) Δύναμη = Ενέργεια / απόσταση μετακίνησης =  $0.045 / 0.025 = 1.8 \text{ N}$  (όχι 3.6 N) (Ένα άλλο επιχείρημα είναι ότι  $F = 3.6 \text{ N}$  στην αρχή της ώθησης και μηδέν στο τέλος, οπότε η μέση ώθηση είναι 1.8N).

Ροπή = F επί μετατόπιση από κέντρο μάζας =  $1.8 \times 1 \times 10^{-3} = 1.8 \times 10^{-3} \text{ Nm}$

(iii)  $T = I d\omega/dt \Rightarrow d\omega/dt = T/I = 1.8 \times 10^{-3} / 6 \times 10^{-4} = 3 \text{ rad s}^{-2}$

Αυτή η γωνιακή επιτάχυνση διαρκεί για  $2s/v = 2 \times 0.025 / 0.3 = 0.167 \text{ s}$  αλλά το  $\Delta\omega = d\omega / dt \times \Delta t, \Rightarrow \omega = 3 \times 0.167 = 0.5 \text{ rad s}^{-1}$

=  $0.5 \times (180 / \pi) \times 60/360 = 4.77 \text{ rpm}$

Ένα μικρό σφάλμα ευθυγράμμισης μπορεί να δώσει μεγάλο ρυθμό εκτροπής!

**Παράδειγμα 10.2**

Ένας νανοδορυφόρος διαθέτει έξι σταθερά, ανεπτυγμένα ηλιακά πάνελ, το καθένα με μάζα 20 g.

(i) Υποθέτοντας ότι τα πάνελ έχουν σταθερά ακαμψίας,  $k = 1000 \text{ Nm}^{-1}$ , υπολογίστε τη συχνότητα συντονισμού τους και σχολιάστε, αιτιολογώντας, σχετικά με το εάν είναι πιθανό να υποστούν ζημιά από τις δονήσεις εκτόξευσης.

(ii) Τα πάνελ είναι κατασκευασμένα από αλουμίνιο και έχουν μήκος 8.5 cm. Δεδομένου ότι, όταν βρίσκεται σε τροχιά, η θερμοκρασία των πάνελ κυμαίνεται από  $-60 \text{ }^\circ\text{C}$  έως  $+30 \text{ }^\circ\text{C}$ , υπολογίστε την μεταβολή μήκους λόγω θερμικής διαστολής.

Δεδομένα: Συντελεστής θερμικής διαστολής αλουμινίου,  $\alpha = 2.3 \times 10^{-5} \text{ K}^{-1}$

(iii) Δεδομένου ότι το πάνελ αλουμινίου έχει πολύ υψηλότερο συντελεστή θερμικής διαστολής από ότι τα ηλιακά στοιχεία που είναι τοποθετημένα σε αυτό, εξηγήστε πως μπορούμε να απαλλαγούμε από την καταπόνηση που σχετίζεται με αυτήν την αλλαγή.

**Λύση**

$$(i) \text{ Φυσική συχνότητα} = \frac{1}{2\pi} \sqrt{\frac{k}{m}} = \frac{1}{2\pi} \sqrt{1000/20 \times 10^{-3}} = 35.6 \text{ Hz.}$$

Υπάρχει σημαντική ενέργεια που σχετίζεται με τις συχνότητες δόνησης εκτόξευσης στα λίγα δέκατα του εύρους Hz, επομένως υπάρχει πιθανό πρόβλημα.

$$(ii) \text{ Για το αλουμίνιο: } \delta = \alpha (\Delta T) L_{\alphaρχ} = 23 \times 10^{-6} (90) \times 8.5 \times 10^{-2} = 1.76 \times 10^{-4} \text{ m}$$

(iii) Η κόλλα που συγκρατεί το κελιά στο πάνελ δημιουργεί κάποιο περιθώριο. Αυτό λύνει το πρόβλημα των καταπονήσεων.

## Προβλήματα

- 10.1** Μια κυλινδρική δοκός από ομοιογενές αλουμίνιο που βρίσκεται σε τροχιά στον Διεθνή Διαστημικό Σταθμό (ISS) και θερμαίνεται/ψύχεται κατά την διάρκεια εκλείψεων. Η θερμική διακύμανση της δοκού είναι  $\Delta T = \pm 30^\circ$ . Η δοκός είναι στηριγμένη σταθερά και στις δύο πλαϊνές πλευρές. Αν το μήκος της δοκού είναι  $L = 1$  m και η διάμετρος του είναι  $D = 10$  cm, να βρείτε την καταπόνηση ( $\epsilon$ ), τάση ( $\sigma$ ), την δύναμη θλίψης ( $F_c$ ), εφελκισμού ( $F_t$ ) και να προσδιορίσετε το είδος της παραμόρφωσης της δοκού. Για την δοκό από αλουμίνιο σας δίδονται:  $E = 10^{10}$  N/m<sup>2</sup>, συντελεστής θερμικής διαστολής  $\alpha = 23.2 \cdot 10^{-6}$ ; Όριο αντοχής διαρροής τάσης;  $\sigma_y = 450 \cdot 10^6$  N/m<sup>2</sup>; οριακής αντοχής θραύσης  $\sigma_{tu} = 520 \cdot 10^6$  N/m<sup>2</sup>;  $I = \pi r^4/4$ . Τι θα συμβεί αν διαλέγαμε μία δοκό με διάμετρο 1 cm αντί για 10 cm;
- 10.2** Ένας δορυφόρος με μάζα  $m = 100$  kg είναι συνδεδεμένος με έναν εκτοξευτή με έναν προσαρμογέα (adaptor) με ελατήριο με συντελεστή  $k = 10^4$  N/m. Την στιγμή που σταματά η καύση του κινητήρα, ασκείται στον δορυφόρο μία μηχανική κρούση (shock). Ποια είναι η θεμελιώδη συχνότητα  $f_n$  του δορυφόρου/προσαρμογέα αν η μάζα του πυραύλου είναι κατά πολύ μεγαλύτερη από αυτήν του δορυφόρου και όταν δεν έχει απόσβεση; Ένα υπάρχει απόσβεση και η σταθερά του χρόνου απόσβεσης είναι  $c = 5200$  Ns/m, ποιος είναι ο λόγος απόσβεσης  $\zeta$ ;
- 10.3** Ένας μικροδορυφόρος 15 kg είναι συνδεδεμένος με ένα προσαρμογέα εκτοξευτή με 4 μπουλόνια σιδήρου ( $F_{cy} = 240$  Mpa) τα οποία συγκρατούν τον δορυφόρο στον εκτοξευτή κατά την διάρκεια της εκτόξευσης και θα κοπούν με πυροτεχνικούς μηχανισμούς όταν πρέπει να απελευθερωθεί ο δορυφόρος στην τροχιά του. Ο εκτοξευτής μεταδίδει μέγιστη επιτάχυνση 20g στον εγκάρσιο άξονα κατά την άνοδο. Την στιγμή της μέγιστης επιτάχυνσης δύο από τα τέσσερα μπουλόνια φτάνουν στο όριο εφελκισμού. Οι μηχανικοί σχεδιασμού προτείνουν να χρησιμοποιηθούν μπουλόνια με διάμετρο 10-mm. Να επιβεβαιώσετε αν τα μπουλόνια θα αντέξουν τα φορτία αν πρέπει να έχουν συντελεστή ασφάλειας 10.

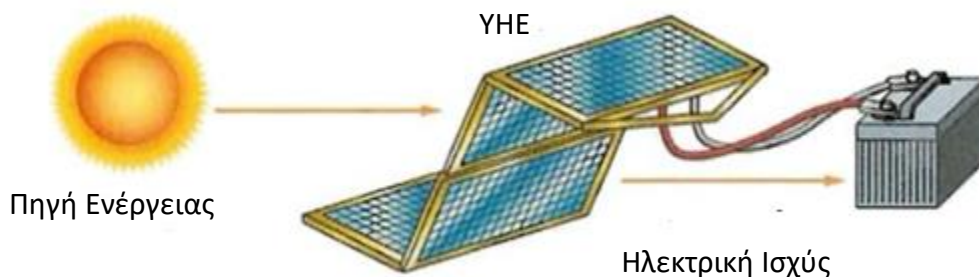
# Κεφάλαιο 11

## Υποσύστημα Ηλεκτρικής Ισχύος

Σε αυτή την ενότητα θα μάθετε να:

- Περιγράψετε τις βασικές λειτουργίες του υποσυστήματος ηλεκτρικής ενέργειας
- Καθορίζετε τις βασικές έννοιες και τις παραμέτρους ενός υποσυστήματος ηλεκτρικής ενέργειας
- Αναγνωρίζετε τις κύριες πηγές ενέργειας που είναι διαθέσιμες από ένα διαστημικό σκάφος, τις εφαρμογές και τους περιορισμούς που υπάρχουν
- Σχολιάζετε σχετικά με την παροχή ηλεκτρικής ενέργειας και τη διανομή της στο διαστημικό σκάφος
- Εφαρμόζετε τη διαδικασία του σχεδιασμού διαστημικών συστημάτων για να δοκιμάζετε και να ελέγχετε ένα υποσύστημα ηλεκτρικής ενέργειας

Όπως όλες οι σύγχρονες συσκευές, τα ωφέλιμα φορτία και τα υποσυστήματα χρειάζονται ηλεκτρική ενέργεια για να λειτουργήσουν. Δυστυχώς, στο διάστημα δεν υπάρχουν πρίζες και ένα καλώδιο επέκτασης θα ήταν πολύ μακρύ! Η δουλειά του υποσυστήματος ηλεκτρικής ενέργειας (EPS) είναι να χρησιμοποιήσει κάποια βολική πηγή ενέργειας και να τη μετατρέψει σε χρησιμοποιήσιμη ηλεκτρική ενέργεια για να λειτουργήσει ολόκληρο το διαστημικό σκάφος. Όπως και με οποιοδήποτε άλλο σύστημα, το EPS έχει εισόδους και εξόδους. Όπως απεικονίζεται στο Σχήμα 168, το EPS παίρνει την ακατέργαστη ενέργεια από μια πηγή, συνήθως τον Ήλιο, και την μετατρέπει σε ηλεκτρική ενέργεια, σε μορφή δηλαδή που μπορεί να χρησιμοποιηθεί από τον εξοπλισμό του διαστημικού σκάφους.

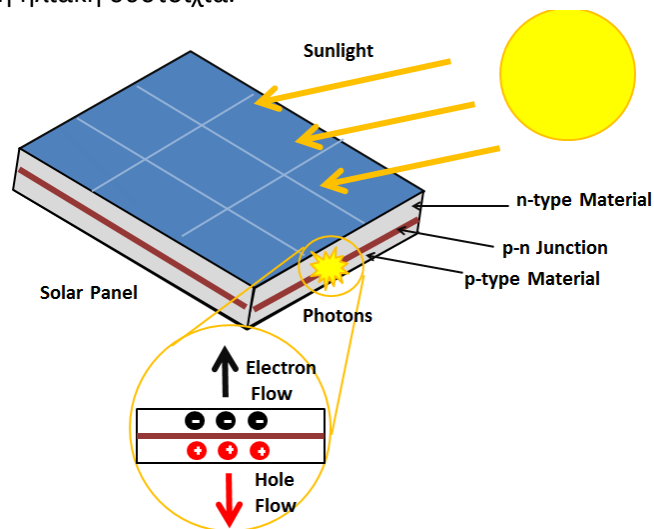


**Σχήμα 168:** Υποσύστημα ηλεκτρικής ενέργειας (ΥΗΕ). Το ΥΗΕ παίρνει την ενέργεια από τον Ήλιο (πηγή) και την μετατρέπει σε ηλεκτρική ισχύ σε μορφή που να μπορεί να χρησιμοποιηθεί από τα όργανα και υποσυστήματα του δορυφόρου

### Πηγές ενέργειας

Όπως μάθαμε η μόνη είσοδος στο EPS είναι η ενέργεια από μια πηγή ενέργειας. Στη συνέχεια, εξετάζουμε τις πιο συνηθισμένες πηγές ενέργειας ενός διαστημικού οχήματος, ξεκινώντας από τον Ήλιο.  
*Ηλιακή ενέργεια*

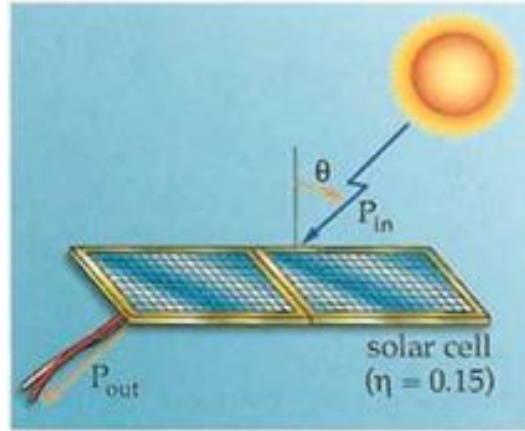
Ο Ήλιος είναι μια προφανής πηγή ενέργειας για τα διαστημικά σκάφη που βρίσκονται σε τροχιά γύρω από τη Γη. Μπορούμε να μετατρέψουμε την ηλιακή ενέργεια σε ηλεκτρική ενέργεια είτε έμμεσα είτε άμεσα. Οι έμμεσες μέθοδοι συγκεντρώνουν το φως του ήλιου για να αυξήσουν τη θερμότητα ενός υγρού με στόχο τη λειτουργία μιας γεννήτριας. Οι άμεσοι μέθοδοι κάνουν χρήση των εισερχόμενων ηλιακών φωτονίων για τη δημιουργία ροής ηλεκτρονίων - δηλαδή ρεύματος. Μέχρι στιγμής, ο πιο συνηθισμένος τρόπος είναι η άμεση μετατροπή με τη χρήση ηλιακών κυψελών, ή πιο τεχνικά φωτοβολταϊκών κυψελών, παρόμοιων με αυτά του Σχήματος 169. Όταν το ηλιακό φως πέφτει σε μια ηλιακή κυψέλη ρέει ηλεκτρικό ρεύμα. Αλλά πως? Μια ηλιακή κυψέλη αποτελείται από ένα λεπτό στρώμα από πυρίτιο, αρσενικό γάλλιο ή κάποιον άλλο ημιαγωγό. Καθώς τα φωτόνια προσκρούουν στην επιφάνεια του υλικού μεταδίδουν την ενέργεια τους στα άτομα της ηλιακής κυψέλης, απελευθερώνοντας κάποια ηλεκτρόνια των οποίων η κίνηση μειώνει την αντίσταση στην κυψέλη με αποτέλεσμα ελεύθερα ηλεκτρόνια να αρχίσουν να ρέουν. Έτσι έχουμε ρεύμα! Λόγω περιορισμών στην κατασκευή, το μέγιστο μέγεθος μίας μόνο ηλιακής κυψέλης είναι αρκετά μικρό. Ως εκ τούτου, πρέπει να συνενώσουμε εκατοντάδες ή και χιλιάδες μαζί για να σχηματίσουμε μια πλήρη ηλιακή συστοιχία.



Σχήμα 169: Αρχή λειτουργίας φωτοβολταϊκής κυψέλης

Επί του παρόντος, η αποτελεσματικότητα των ευρέως διαθέσιμων φωτοβολταϊκών κυψελών είναι αρκετά μέτρια. Ορίζουμε την απόδοση,  $\eta$ , μιας ηλιακής κυψέλης ως τον λόγο της προσπίπτουσας ηλιακής ενέργειας προς ηλεκτρική ενέργεια που παράγεται από αυτήν. Αν και στο εργαστήριο η απόδοση που έχει επιτευχθεί φτάνει το 30%, οι τυπικές ηλιακές κυψέλες πυριτίου παραγωγής αποδίδουν μόνο περίπου 15%, ενώ οι ακριβότερες κυψέλες αρσενικού γάλλιου πλησιάζουν το 20%. Αυτό σημαίνει ότι μόνο το 20% της ηλιακής ενέργειας που χτυπά στην επιφάνεια μετατρέπεται σε ηλεκτρική ενέργεια. Η υπόλοιπη ηλιακή ενέργεια αντανακλάται ή μετατρέπεται σε θερμότητα.

Πρακτικά, μόνο η συνιστώσα της ηλιακής ενέργειας που προσκρούει κάθετα στην επιφάνεια της ηλιακής κυψέλης μετατρέπεται σε ηλεκτρική ενέργεια. Χρησιμοποιούμε τη γωνία πρόσπτωσης  $\theta$ , για να καθορίσουμε το ποσό της ηλιακής ενέργειας που «χτυπά» σε ένα ηλιακό πάνελ. Η γωνία  $\theta$  είναι η γωνία που σχηματίζεται μεταξύ του διανύσματος που είναι κάθετο στην επιφάνεια της κυψέλης και του διανύσματος της ηλιακής ακτίνας.



Σχήμα 170: Γωνία Πρόσπτωσης

Το σχήμα 170 δείχνει την ηλιακή ενέργεια καθώς «χτυπά» μια ηλιακή κυψέλη καθώς και τη γωνία πρόσπτωσης. Έτσι, η συνολική ισχύς εξόδου ενός ηλιακού στοιχείου εξαρτάται από την ένταση της ηλιακής ενέργειας (σε W/m), την απόδοση και τη γωνία πρόσπτωσης.

Με αυτές τις πληροφορίες, μπορούμε να εκφράσουμε την πυκνότητα ισχύος εξόδου ως:

$$P_{out} = P_{in} \eta \cos \theta$$

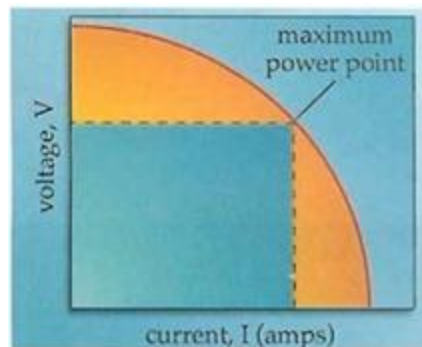
Όπου

$P_{out}$ : πυκνότητα ισχύος εξόδου ηλιακής κυψέλης (W/m<sup>2</sup>)

$P_{in}$ : πυκνότητα ισχύος εισόδου ηλιακής κυψέλης (W/m<sup>2</sup>)

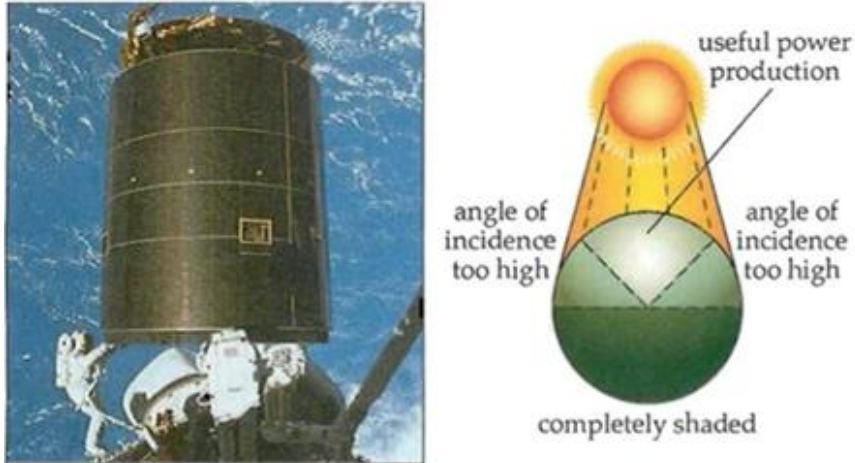
$\eta$ : απόδοση ηλιακής κυψέλης (τυπικά <0.25)

$\theta$ : γωνία πρόσπτωσης (μοίρες ή ακτίνια)



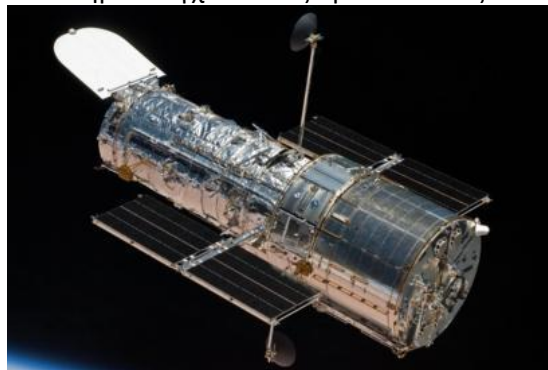
Σχήμα 171: Καμπύλη Τάσης-Ρεύματος (I-V)

Όπως είδαμε, η ισχύς είναι συνάρτηση του ρεύματος και της τάσης. Όλα τα ηλιακά στοιχεία έχουν μια χαρακτηριστική καμπύλη ρεύματος / τάσης (καμπύλη I/ V), όπως φαίνεται στο σχήμα 171. Παρατηρήστε από αυτή την καμπύλη ότι υπάρχει περιορισμός μεταξύ του ρεύματος και της τάσης. Το σχήμα αυτής της καμπύλης για δεδομένη ηλιακή κυψέλη μπορεί να αλλάξει λόγω της θερμοκρασίας της, της ηλικίας και άλλων παραγόντων. Μπορούμε να φτάσουμε στη μέγιστη ισχύ εξόδου προσαρμόζοντας το ρεύμα και την τάση για να παραμείνουμε στην περιβάλλουσα της καμπύλης. Οι ηλιακές κυψέλες στα διαστημικά σκάφη μπορούν να τοποθετηθούν με πολλούς τρόπους. Ο απλούστερος τρόπος είναι να τοποθετηθούν όλες στο εξωτερικό μέρος του διαστημικού σκάφους. Αυτή η τεχνική ονομάζεται τοποθέτηση στο σώμα. Αυτές οι συστοιχίες κυψελών είναι σχετικά απλές και χρησιμοποιούνται συνήθως σε διαστημικά σκάφη με γυροσκοπική σταθεροποίηση, όπως το διαστημικό σκάφος IntelSat, που φαίνεται στο σχήμα 172.



**Σχήμα 172: Ηλιακές κυψέλες τοποθετημένες στο σώμα του δορυφόρου (body mounted)**

Δυστυχώς, για τη συγκεκριμένη τεχνική, ο ήλιος λάμπει σε λιγότερο από το ήμισυ των κυψελών ταυτόχρονα. Το σώμα του διαστημικού σκάφους σκιάζει συνήθως μεγάλο μέρος της συστοιχίας και η γωνία πρόσπτωσης είναι τόσο μεγάλη ώστε η ισχύς που παράγεται να είναι πολύ μικρή. Για ένα κυλινδρικό διαστημόπλοιο, λιγότερο από το ένα τρίτο (στην πραγματικότητα:  $1/\pi$ ) από τις ηλιακές κυψέλες μπορούν να παράξουν ταυτόχρονα ηλεκτρική ενέργεια. Μπορούμε να ξεπεράσουμε αυτό το πρόβλημα στρέφοντας τις ηλιακές συστοιχίες προς τον Ήλιο, διατηρώντας τη γωνία πρόσπτωσης κοντά στο μηδέν και την ισχύ εξόδου κοντά στη μέγιστη δυνατή τιμή. Για να γίνει αυτό, πρέπει οι συστοιχίες να μπορούν να κινούνται και ένα σύστημα ελέγχου να τις προσανατολίζει στον Ήλιο.



**Σχήμα 173: Στρεφόμενες Ηλιακές Συστοιχίες**

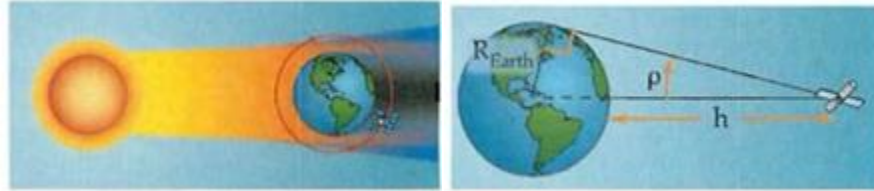
Το σχήμα 173 δείχνει μια κινούμενη συστοιχία, όπως χρησιμοποιείται στο τηλεσκόπιο Hubble. Εκτός από τη γωνία πρόσπτωσης, πολλοί άλλοι περιβαλλοντικοί παράγοντες μπορούν να υποβαθμίσουν την απόδοση των ηλιακών κυψελών όπως:

- Η θερμοκρασία
- Η ακτινοβολία και τα φορτισμένα σωματίδια
- Οι εκλείψεις

Οι ηλιακές κυψέλες είναι πολύ ευαίσθητες στη θερμοκρασία, είναι πιο αποδοτικές σε χαμηλές θερμοκρασίες και χάνουν την απόδοση του σε υψηλότερες θερμοκρασίες. Τυπικά ηλιακές κυψέλες χάνουν από 0,025% έως 0,075% της απόδοσης τους τους ανά °C, καθώς η θερμοκρασία αυξάνεται πάνω από 28°C. Για παράδειγμα, μια συστοιχία με απόδοση 15% στους 28 °C θα έχει απόδοση περίπου 14,75% στους 38 °C. Αυτό σημαίνει ότι είναι απαραίτητο ένα είδος θερμικού ελέγχου για τις ηλιακές συστοιχίες.



Οι ηλιακές κυψέλες καθώς και το γυαλί από το οποίο καλύπτονται είναι εξαιρετικά ευαίσθητα στην ακτινοβολία και τα φορτισμένα σωματίδια στο διάστημα. Καθώς η ακτινοβολία και τα σωματίδια χτυπούν τις συστοιχίες, τα υλικά αρχίζουν να φθείρονται. Ανάλογα με την τροχιά, οι ηλιακές συστοιχίες μπορούν να χάσουν μέχρι και το 30% της απόδοσης τους μέσα σε μόλις δέκα χρόνια. Για το λόγο αυτό, οι ηλιακές συστοιχίες σχεδιάζονται λαμβάνοντας υπόψιν αυτή την υποβάθμιση στην απόδοση με τη πάροδο του χρόνου. Έτσι, στο ξεκίνημα της αποστολής η απόδοση πρέπει να είναι αρκετά υψηλή ώστε μέχρι το τέλος της αποστολής να επαρκεί για τη λειτουργία όλων των συστημάτων του διαστημικού σκάφους. Ένα ακόμα πρόβλημα με την ηλιακή ενέργεια είναι ότι τα διαστημικά σκάφη σε τροχιά περνούν περιοδικά στη σκιά της Γης (εισέρχονται στην έκλειψη), όπως φαίνεται στο Σχήμα 174.



Σχήμα 174: Σκιά της Γης

Σχήμα 175: Γεωμετρία Γης-Δορυφόρου

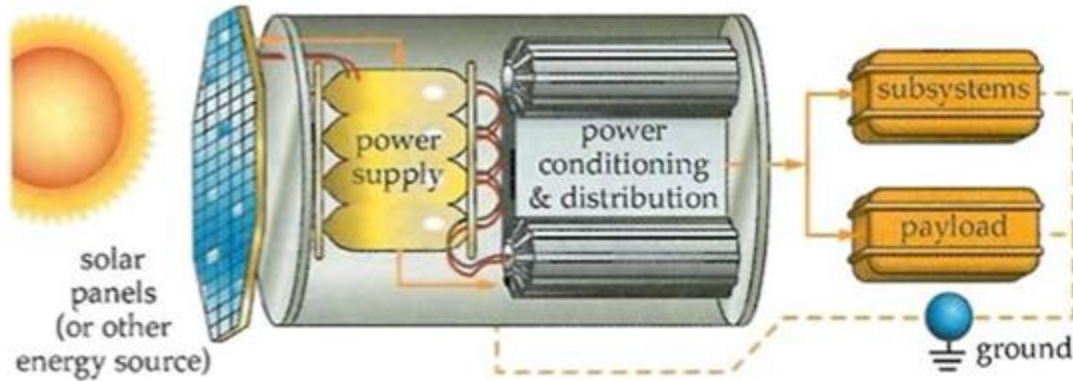
Κατά τη διάρκεια αυτών των περιόδων έκλειψης, η προσπίπτουσα ηλιακή ενέργεια πέφτει στο μηδέν και τα ηλιακά κύτταρα σταματούν να παράγουν ενέργεια. Η διάρκεια μιας τροχιακής έκλειψης εξαρτάται κυρίως από το υψόμετρο του διαστημικού σκάφους, το οποίο καθορίζει τη φαινόμενη ακτίνα  $\rho$ , όπως φαίνεται στο Σχήμα 8 (για μηδενική κλίση έχουμε τη χειρότερη περίπτωση).

$$\rho = \sin^{-1}\left(\frac{R_{earth}}{h + R_{earth}}\right)$$

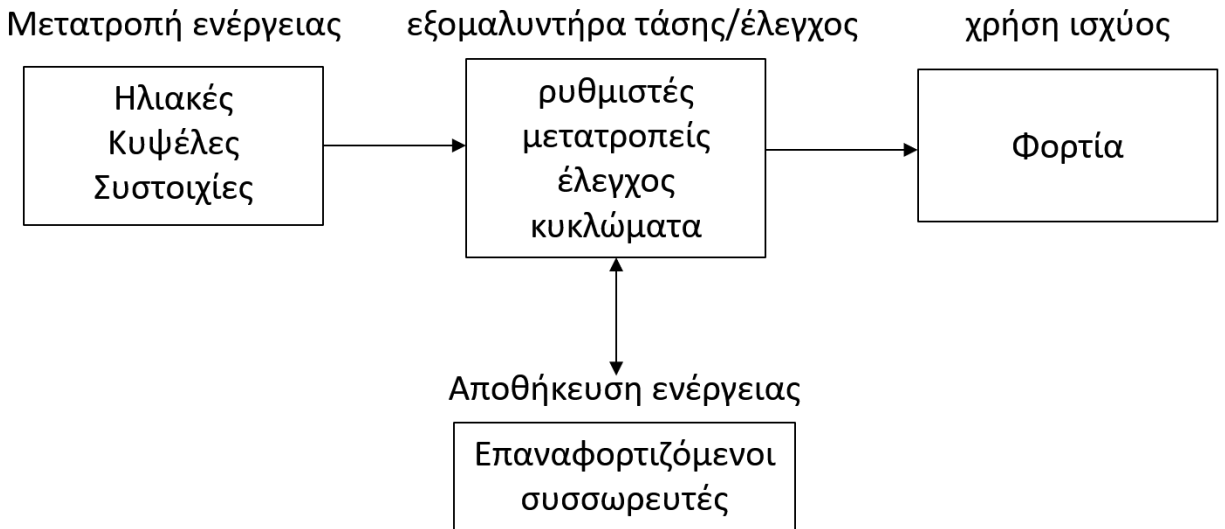
Ειδικά για δορυφόρους σε LEO, θα υπάρχουν τακτικές εκλείψεις καθ' όλη τη διάρκεια της ημέρας και μπορεί να χρειαστεί περίπου 40% ισχύς από τη μπαταρία για κάθε τροχιά. Κάθε έκλειψη μπορεί να διαρκέσει έως και 35 λεπτά. Σε τροχιές GEO, μια έκλειψη μπορεί να συμβεί σε ορισμένες εποχές και μπορεί να διαρκέσει για περίπου 72 λεπτά.

### 11.1 Λειτουργίες Υποσυστήματος

Τώρα που περιγράψαμε κάποιες από τις βασικές αρχές της ηλεκτρικής ισχύος και των διαθέσιμων πηγών ενέργειας, μπορούμε να εστιάσουμε την προσοχή μας στις αρχές λειτουργίας του υποσυστήματος ηλεκτρικής ενέργειας. Το σχήμα 176 παρουσιάζει τη δομή ενός τυπικού EPS που βασίζεται στην ηλιακή ενέργεια. Σε αυτό το παράδειγμα, το σύστημα μετατρέπει την πρωτογενή ηλιακή ενέργεια σε ηλεκτρική ισχύ (DC) εντός των ηλιακών κυψελών, όπως περιεγράφηκε προηγουμένως.



Σχήμα 176: Αρχή λειτουργίας Υποσυστήματος ηλεκτρικής ισχύος



Σχήμα 177: Σχήμα Δομής του ΥΗΙ

Οι υπόλοιπες λειτουργίες ενός EPS σε δύο στάδια: 1) παροχή ενέργειας και 2) ρύθμιση και διανομή ενέργειας. Θα περιγράψουμε τις λειτουργίες κάθε σταδίου και στη συνέχεια θα δούμε ένα απλό παράδειγμα ενός EPS.

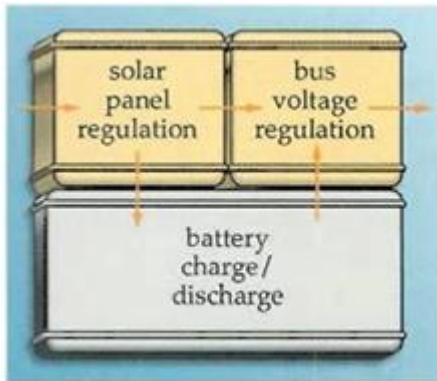
#### Παροχή ενέργειας

Το πρώτο στάδιο αφορά στη ρύθμιση της ενέργειας εξόδου από τους ηλιακούς συλλέκτες και υπάρχουν δύο τεχνικές γι' αυτό. Η πρώτη ονομάζεται άμεση μεταφορά ενέργειας, είναι η πιο συνηθισμένη τεχνική και η τάση εξόδου από τις ηλιακές κυψέλες παραμένει σταθερή καθώς το ρεύμα μεταβάλλεται σύμφωνα με την καμπύλη  $I/V$  όπως φαίνεται στην σχήμα 171. Με αυτή την τεχνική, όταν οι ηλιακές κυψέλες βρεθούν στο ηλιακό φως μετά από μια έκλειψη, το σύστημα θα σπαταλήσει την πρόσθετη ισχύ που είναι διαθέσιμη μέσω αντιστατών σε θερμότητα. Η σπατάλη αυτής της μικρής ποσότητας ενέργειας θεωρείται ότι αξίζει την ευκολία ώστε να έχουμε μια σταθερή τάση εξόδου. Για πολύ μικρά διαστημικά οχήματα, μπορούμε να χρησιμοποιήσουμε την τεχνική του εντοπισμού του σημείου μέγιστης ισχύος. Όπως υποδηλώνει ο όρος, το σύστημα ρυθμίζει συνεχώς το ρεύμα και την τάση ώστε να παραμένει στο «γόνατο» της καμπύλης  $I/V$  (Σχήμα 171), με αποτέλεσμα να μεγιστοποιεί την παραγόμενη ισχύ.

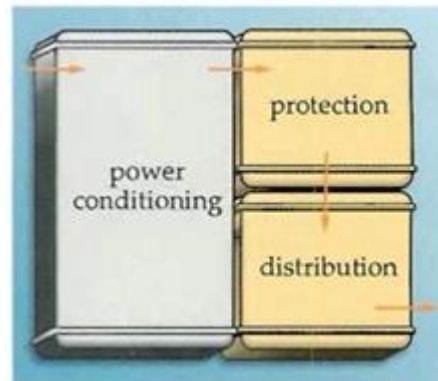
Ανεξάρτητα από την ισχύ εξόδου από τις ηλιακές κυψέλες, το σύστημα ελέγχου πρέπει να καθορίζει την τάση και το ρεύμα για την τροφοδοσία του διαύλου διαστημικού σκάφους. Όταν υπάρχει περίσσεια ισχύος τότε ποσό της ενέργειας αποθηκεύεται σε μπαταρίες. Κατά τη διάρκεια της έκλειψης, φυσικά, οι μπαταρίες τροφοδοτούν το διαστημικό σκάφος. Το σχήμα 176 απεικονίζει αυτές τις λειτουργίες του σταδίου παροχής ενέργειας ενός EPS και δείχνει τη ροή της ηλεκτρικής ενέργειας.

#### Ρύθμιση και διανομή ενέργειας

Το δεύτερο στάδιο του EPS ρυθμίζει την ισχύ που διέρχεται στον δίαυλο για την τροφοδοσία των υποσυστημάτων και τον τρόπο που διανέμεται σε αυτά σύμφωνα με τις ανάγκες αποστολής, όπως φαίνεται στο Σχήμα 178 και 179.



Σχήμα 178: Τροφοδοσία



Σχήμα 179: Ρύθμιση και διανομή ενέργειας

Ας εξετάσουμε πρώτα το κομμάτι της ρύθμισης. Η ονομαστική τάση του διαύλου μπορεί να είναι 28V, ενώ το CDHS μπορεί να χρειάζεται τροφοδοσία μόνο 5V. Σε αυτή την περίπτωση, το EPS πρέπει να μειώσει την τάση προτού τροφοδοτήσει το συγκεκριμένο υποσύστημα. Σημειώστε ότι αυτή η λειτουργία ρύθμισης μπορεί να πραγματοποιηθεί είτε μέσα στο EPS («κεντρική προσέγγιση») είτε μέσα σε κάθε υποσύστημα («αποκεντρωμένη προσέγγιση»). Η αποκεντρωμένη προσέγγιση είναι κάπως πιο αποδοτική από πλευράς ισχύος, αλλά θέτει επιπλέον απαιτήσεις στο σχεδιασμό κάθε υποσυστήματος. Ωστόσο, για τους σκοπούς της συζήτησής μας, θα επικεντρωθούμε στην κεντρική προσέγγιση για τη ρύθμιση και τη διανομή της ηλεκτρικής ενέργειας.

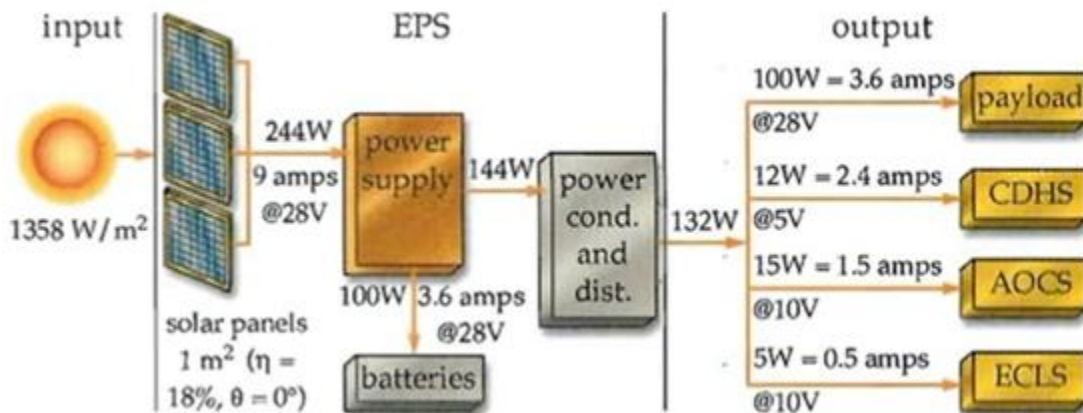
Μόλις παραχθεί, η ισχύς πρέπει να μεταβεί στους χρήστες. Όπως φαίνεται στο σχήμα 179, πριν από τη διανομή, η ισχύς πρέπει να περάσει από κάποια κυκλώματα προστασίας. Στα σπίτια μας, όλη η ισχύς περνά μέσα από ασφάλειες ή αυτόματους διακόπτες πριν μεταβεί στο σπίτι. Αν για παράδειγμα, έχετε υπερβολικά πολλές συσκευές συνδεδεμένες στην ίδια πρίζα η ασφάλεια «καίγεται» ή ο διακόπτης «πέφτει» ώστε να ανοίξει το κύκλωμα. Σε ένα διαστημικό σκάφος, οι ασφάλειες είναι δύσκολο να αντικατασταθούν, γι' αυτό χρησιμοποιούμε διακόπτες ισχύος ή διακόπτες στερεάς κατάστασης που μπορούμε να τους επαναφέρουμε στις αρχικές τους καταστάσεις.

Οι απαιτήσεις της αποστολής και οι εντολές από το έδαφος μπορούν να καθορίσουν την κατανομή της ισχύος σε κάποια υποσυστήματα. Για παράδειγμα, μια αποστολή που χρησιμοποιεί ένα ραντάρ συνθετικού ανοίγματος, όπως το διαστημικό σκάφος Magellan που χρησιμοποιείται για τη χαρτογράφηση της Αφροδίτης, έχει πολύ υψηλές απαιτήσεις ισχύος στο ωφέλιμο φορτίο κατά τη διάρκεια σύντομων και συγκεκριμένων φάσεων της αποστολής. Κατά τη διάρκεια αυτών των φάσεων, η ισχύς μειώνεται στις λιγότερο σημαντικές λειτουργίες για να εξασφαλίζεται ότι στο ωφέλιμο φορτίο παρέχεται επαρκώς η απαιτούμενη ισχύς. Ένα τελευταίο ζήτημα σχεδιασμού συστήματος που πρέπει να

εξεταστεί είναι η γείωση. Κατά το σχεδιασμό του EPS, η δέουσα προσοχή στη γείωση των διαστημικών σκαφών είναι σημαντική για την πρόληψη ανεπιθύμητων "γειωμένων βρόχων" που μπορούν να οδηγήσουν σε συγκέντρωση φορτίου και ζημιές στα υποσυστήματα.

Παράδειγμα. Ας δούμε ένα απλό παράδειγμα για να δούμε πώς λειτουργεί ένα EPS. Φανταστείτε ένα διαστημικό σκάφος μέσου μεγέθους με συστοιχίες εντοπισμού ηλίου  $1\text{m}^2$  σε τροχιά γύρω από τη Γη. Ας μελετήσουμε τη συνολική κατανάλωση ενέργειας σε σχέση με την παραγωγή ηλεκτρικής ενέργειας.

Το σχήμα 180 απεικονίζει μια πιθανή ροή και διανομή ισχύος για το διαστημικό μας σκάφος. Η επιφάνεια των συστοιχιών, η αποτελεσματικότητά τους και η γωνία πρόσπτωσης καθορίζουν τη μέγιστη παραγόμενη ισχύ. Κάνοντας χρήση της τεχνικής του εντοπισμού του σημείου μέγιστης ισχύος, το EPS μπορεί να διατηρεί τη μέγιστη παραγόμενη δυνατή ισχύ.



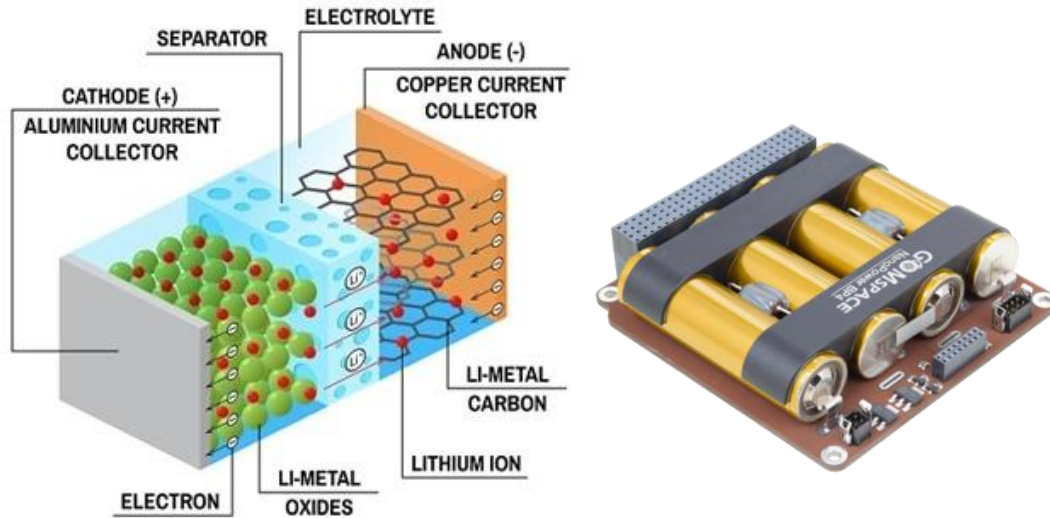
Σχήμα 180: Παράδειγμα Υποσυστήματος Ηλεκτρικής Ισχύος

Τώρα, ένα ποσό της ενέργειας πρέπει να χρησιμοποιηθεί για τη λειτουργία του διαστημικού σκάφους και το υπόλοιπο να αποθηκευτεί σε μπαταρίες για να χρησιμοποιηθεί κατά τη διάρκεια εκλείψεων. Αν το 40% περίπου αποθηκευτεί σε μπαταρίες, το υπόλοιπο είναι διαθέσιμο για τη λειτουργία του διαστημικού σκάφους. Ένα μέρος της εναπομένουσας ενέργειας χρησιμοποιείται από το EPS για τις εσωτερικές του λειτουργίες. Αν η συνολική ισχύς ισούται με  $244\text{ W}$ , για παράδειγμα, μένουν  $132\text{ W}$  για το ωφέλιμο φορτίο και τα υποσυστήματα. Ωστόσο, διαφορετικοί χρήστες μπορούν να έχουν διαφορετικές απαιτήσεις ισχύος. Το ωφέλιμο φορτίο, για παράδειγμα, μπορεί να χρησιμοποιεί την τυπική τάση διαύλου  $28\text{ V}$ , ενώ το CDHS να χρειάζεται  $12\text{ W}$  στα  $5\text{ V}$  με ονομαστική ένταση ρεύματος τα  $2.4\text{ amp}$ . Όπως δείχνει το παράδειγμα, πρέπει να υπολογίσουμε όλες τις απαιτήσεις ρεύματος, τάσης και ισχύος για τις εισόδους και τις εξόδους στο διαστημικό σκάφος.

## 11.2 Συσσωρευτές/Μπαταρίες Δορυφόρων

Στη δεκαετία του 1960, οι νικελίου καδμίου (NiCd) ήταν η κύρια τεχνολογία που χρησιμοποιούνταν για τους δορυφόρους και χρησιμοποιείται ακόμη σε κάποιο βαθμό και σήμερα για τους δορυφόρους LEO που απαιτούν χαμηλότερα επίπεδα ισχύος. Οι μπαταρίες NiCd είναι αξιόπιστες, απλές στη διαχείριση, έχουν χαμηλή αυτοεκφόρτιση και ισχυρή κληρονομιά στο χώρο του διαστήματος. Τη δεκαετία του 1990, οι μπαταρίες νικελίου-υδρογόνου (Ni-H<sub>2</sub>) άρχισαν να αντικαθιστούν τις NiCd, ειδικά στους δορυφόρους GEO λόγω της υψηλής αναλογίας ενέργειας προς μάζα. Τώρα οι μπαταρίες ιόντων λιθίου είναι το βασικό πρότυπο, σε συνδυασμό με υψηλότερη ενέργεια και καλύτερη απόδοση φόρτισης, αυτό επιτρέπει στον κατασκευαστή δορυφόρων να μειώσει το μέγεθος των ηλιακών συλλεκτών των δορυφόρων.

Όπως φαίνεται στο σχήμα 181, μια μπαταρία λιθίου αποτελείται από ένα ή περισσότερα ηλεκτροχημικά κελιά (κυψελίδες), συνδεδεμένα παράλληλα ή σε σειρά. Στα κελιά αυτά η χημική ενέργεια που είναι αποθηκευμένη μετατρέπεται σε ηλεκτρική ενέργεια μέσα από ηλεκτροχημικές αντιδράσεις. Ένα κελί αποτελείται από την άνοδο, την κάθοδο και τον ηλεκτρολύτη που διαχωρίζει τα δύο ηλεκτρόδια. Κατά την διάρκεια της εκφόρτισης στην άνοδο λαμβάνει χώρα αντίδραση οξειδωσης, που σημαίνει απώλεια ηλεκτρονίων. Αντίθετα αντίδραση αναγωγής χαρακτηρίζεται ως η απόκτηση ηλεκτρονίων και συμβαίνει κατά την φόρτιση στην κάθοδο. Στην οξειδωση το αναγωγικό μέσο αποβάλλει η-ηλεκτρόνια, που απελευθερώνονται στο συνδεδεμένο κύκλωμα. Από την άλλη πλευρά στην κάθοδο λαμβάνει χώρα η αντίστροφη διαδικασία και η-ηλεκτρόνια προσλαμβάνονται από το οξειδωτικό μέσο.



**Σχήμα 181: (Αριστερά) Δομή Μπαταρίας Λιθίου (Δεξιά) Μπαταρία Li για ναοδορυφόρους (Cubesat)**

Κατά την φόρτιση έχουμε εξαναγκασμένη οξειδοαναγωγή αντίδραση και μετατροπή της ηλεκτρικής σε χημική ενέργεια. Το αντίστροφο συμβαίνει κατά την εκφόρτιση όπου η οξειδοαναγωγική αντίδραση είναι αυθόρμητη και η χημική ενέργεια της μπαταρίας μετατρέπεται σε ηλεκτρική. Υπάρχουν διαφορετικές χημείες για κάθε ηλεκτρόδιο ανάλογα με τον τύπο της μπαταρίας λιθίου. Η χημική σύσταση των υλικών παίζει κύριο ρόλο στις επιδόσεις και στα χαρακτηριστικά των μπαταριών. Σαν αποτέλεσμα έχουμε διαφορετικές χωρητικότητες και ρυθμούς εκφόρτισης

Η τροχιά του δορυφόρου έχει μεγάλη επίδραση στις μπαταρίες που θα πρέπει να υπάρχουν στον δορυφόρο. Οι δορυφόροι LEO χρειάζονται περίπου 90 λεπτά για να περιστραφούν γύρω από τη γη. Σε αυτήν τη θέση, ο δορυφόρος βρίσκεται σε έκλειψη για 30 έως 40 λεπτά την ημέρα, και οι μπαταρίες αντέχουν περίπου 5.000 κύκλους το χρόνο. Οι δορυφόροι GEO χρειάζονται 24 ώρες για να περιστραφούν γύρω από τη γη, και όταν βρίσκονται σε έκλειψη (δύο φορές το χρόνο από 45 ημέρες), χρησιμοποιούν μπαταρίες για 0 έως 72 λεπτά την ημέρα. Οι μπαταρίες για τέτοιους δορυφόρους GEO - που χρησιμοποιούνται κυρίως για τηλεπικοινωνίες, στρατιωτικά και μετεωρολογικά συστήματα - πρέπει να διαρκούν 15 έως 18 χρόνια.

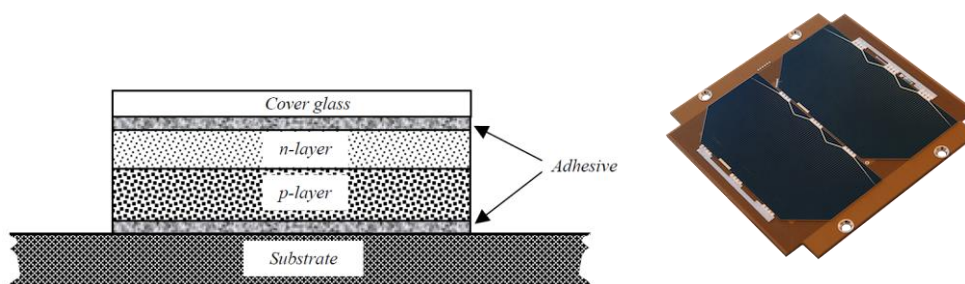
Ένα σημαντικό μέγεθος για να χαρακτηρίσουμε μία μπαταρία είναι το βάθος εκφόρτισης (DOD = Depth of Discharge): Ο λόγος της ποσότητας ηλεκτρικής ενέργειας ή φορτίου που αφαιρείται από ένα στοιχείο κατά την εκφόρτιση (DOD) προς τη διαβαθμισμένη χωρητικότητά του. Εάν υποθέσουμε ότι η μπαταρία είναι πλήρως φορτισμένη 100%, σημαίνει ότι το βάθος εκφόρτισης της είναι 0%. Εάν η μπαταρία έχει

παραδώσει το 30% της ενέργειας της, έχουμε 30% βάθος εκφόρτισης και 70% αποθηκευμένη, εναπομείνασα, ενέργεια. Το βάθος εκφόρτισης (DOD) μπορεί να καθορίσει τη διάρκεια ζωής μιας μπαταρίας σε έναν δορυφόρο. 100% DOD σημαίνει πλήρη αποφόρτιση. Για να διατηρηθεί η λειτουργία της μπαταρίας, απαιτείται μικρότερο βάθος εκφόρτισης. Το 20% DOD χρησιμοποιείται συνήθως για μπαταρίες NiCd στο διάστημα με εγγύηση 5 ετών ζωής σε LEO. Δεδομένου ότι οι δορυφόροι GEO θα υποστούν λιγότερες εκλείψεις, μπορεί να χρησιμοποιηθεί υψηλότερο DOD. Το DOD καθορίζει επίσης τη μάζα λόγω του απαιτούμενου αριθμού μπαταριών. Εάν ένας δορυφόρος απαιτεί 2 kW ισχύος, τότε η μάζα της μπαταρίας θα κυμαίνεται από 50 kg έως 100 kg σε 100% DOD και από 250 kg έως 500 kg σε 20% DOD (επειδή χρειάζεστε περισσότερες μπαταρίες για την ίδια λειτουργία).

Όπως έχουμε αναφέρει, για τους συσσωρευτές/μπαταρίες, η αποθήκευση ισχύος είναι μια από τις κύριες λειτουργίες του ΥΗΙ και παρέχουν ισχύ σε υποσυστήματα διαστημικών σκαφών κατά τις περιόδους έκλειψης και ως απόκριση στην αιχμή της ζήτησης που υπερβαίνει την ικανότητα ηλιακής συστοιχίας. Οι γεωστατικοί δορυφόροι βιώνουν δύο «εποχές» έκλειψης την Άνοιξη και το Φθινόπωρο - συνολικά 90 εκλείψεις ετησίως διάρκειας έως 72 λεπτών η καθεμία. Οι δορυφόροι LEO αντιμετωπίζουν πολλές περισσότερες εκλείψεις, ανάλογα με τη διαμόρφωση της τροχιάς, π.χ. 550 χλμ πολική ηλιοσύγχρονη τροχιά 12 π.μ.-μ.μ. θα υπάρξουν 15 εκλείψεις κάθε μέρα, διάρκειας 30 λεπτών, άρα 5500 εκλείψεις κάθε χρόνο!

### 11.3 Σχεδιασμός Ηλιακής Συστοιχίας

Η μάζα της ηλιακής συστοιχίας πρέπει να λαμβάνει υπόψη τις απαιτήσεις φόρτισης της μπαταρίας μαζί με τις απαιτήσεις φορτίου. Εάν ο δορυφόρος απαιτεί 2kW για τη λειτουργία και η ενέργεια που καταναλώνεται από τις μπαταρίες από τα φορτία κατά τη διάρκεια της έκλειψης είναι 2kW-hr, τότε η συστοιχία πρέπει να είναι σε θέση να παράγει περίπου 3 kW ισχύος. Έτσι, η μάζα της ηλιακής συστοιχίας σε αυτό το παράδειγμα θα είναι περίπου 85 έως 120 kg. Τα τωρινά άκαμπτα ηλιακά πάνελ στους δορυφόρους των ΗΠΑ έχουν συγκεκριμένη ισχύ από 15W/kg έως 30 W/kg. Πρέπει επίσης να ληφθεί υπόψη η έκθεση της ηλιακής συστοιχίας στη θερμοκρασία.

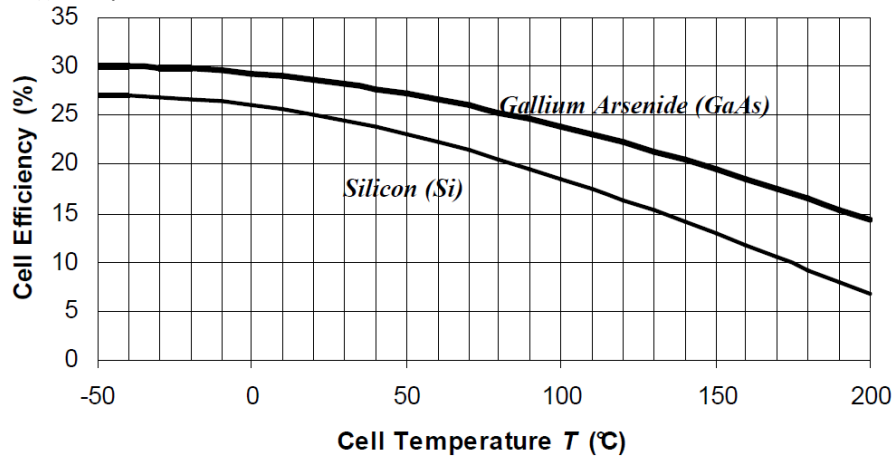


**Σχήμα 182: (Αριστερά) Διατομή Ηλιακής Κυψέλης (Δεξιά) Ηλιακή Συστοιχία με κυψέλες για δορυφόρο**

Το σχήμα 182 δείχνει την διατομή της ηλιακής κυψέλης με τα κύρια στοιχεία της: ένα λεπτό στρώμα από πυρίτιο, αρσενικό γάλλιο ή κάποιον άλλο ημιαγωγό, προστατευτικές επικαλύψεις (γυαλί) τα οποία συνθέτουν μία ηλιακή συστοιχία (σχήμα 182 δεξιά). Ανάλογα με το υλικό των ηλιακών κυψελών διαφέρει και η απόδοση των ΗΣ (σχήμα 183),

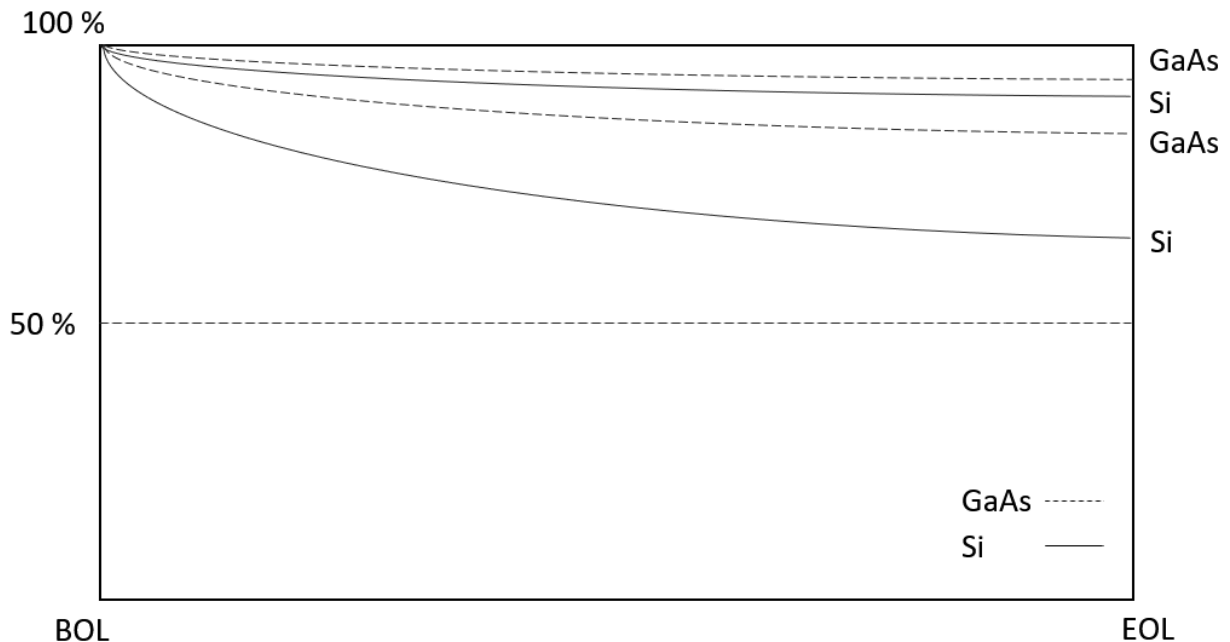
Το εξωτερικό περιβάλλον (ατομικό οξυγόνο, μικρομετεωρήτες, θερμοκρασίες, ακτινοβολία, κοσμικές ακτινοβολίες), όπως και τα υλικά που συνθέτουν τις ηλιακές κυψέλες σημαίνει ότι οι ηλιακές κυψέλες

και κατά συνέπεια οι ΗΣ έχουν φθίνουσα απόδοση η οποία φτάνει και στο 70% της αρχικής απόδοσης μετά από 10 χρόνια λειτουργίας στο διάστημα και που διαφέρει ανάλογα με την τροχιά (LEO, GEO) αλλά και το υλικό/τεχνολογία των ΗΣ.



Σχήμα 183: Απόδοση ηλιακών κυψελών Πυριτίου (Si) και Αρσενικού γαλλίου (GaAs)

Στο σχήμα 184 φαίνεται η φθίνουσα απόδοση ηλιακών κυψελών Πυριτίου (Si) και Αρσενικού γαλλίου (GaAs) σε τροχιές LEO/GEO. Επειδή η απόδοση φθίνει σημαντικά ορίζουμε την αρχική απόδοση ισχύος ως BOL (Beginning of Life) και αντίστοιχα στο τέλος του χρόνου λειτουργίας ενός δορυφόρου/αποστολής ως EOL (End of Life). Για τον σχεδιασμό του συστήματος ισχύος, πρέπει να ληφθεί υπόψιν η ισχύς που θα είναι απαραίτητη για την διαστημική αποστολή ώστε να μπορεί να παραχθεί από τους ηλιακούς συλλέκτες μέχρι το τέλος της αποστολής (EOL), άρα τα οι ΗΣ θα πρέπει να έχουν περίσσεια ισχύος στην αρχή λειτουργίας τους (BOL).



Σχήμα 184: Φθίνουσα απόδοση Ηλιακών Συστοιχιών (ΗΣ) στο Διάστημα

## Μηχανική συστημάτων

Είδαμε ότι ο προϋπολογισμός ισχύος καθορίζει το σχεδιασμό του ΥΗΙ/ΕΡΣ. Ας εξετάσουμε τώρα τι περιλαμβάνει αυτός ο προϋπολογισμός. Όπως εξηγήθηκε και το προηγούμενο παράδειγμα μας, μπορούμε να κατασκευάσουμε τον συνολικό προϋπολογισμό ισχύος προσθέτοντας τους επιμέρους προϋπολογισμούς ισχύος κάθε υποσυστήματος. Συνήθως, το ωφέλιμο φορτίο έχει τις μεγαλύτερες απαιτήσεις σε ισχύ παρ' ότι δεν καθορίζει απόλυτα τον σχεδιασμό του ΕΡΣ. Θυμηθείτε από τη συζήτησή μας για τα φωτοβολταϊκά συστήματα ότι περιβαλλοντικοί παράγοντες όπως η ακτινοβολία και τα φορτισμένα σωματίδια μπορούν να υποβαθμίσουν τη απόδοση τους κατά 4% ετησίως. Έτσι, θα πρέπει να υπολογίσουμε το συνολικό προϋπολογισμό ισχύος του συστήματος τις ανάγκες ισχύος έως το τέλος της ζωής του. Στη συνέχεια, γνωρίζοντας τη διάρκεια ζωής της αποστολής μπορούμε να καθορίσουμε την απαιτούμενες ανάγκες ισχύος κατά την εκκίνηση της αποστολής ώστε να σχεδιάσουμε το ΥΗΙ/ΕΡΣ.

Η σχεδίαση του ΥΗΙ περιλαμβάνει τα εξής βήματα:

(1 & 2) Υπολογίστε την ισχύ των ηλιακών συστοιχιών

$$\frac{P_d T_d}{X_d} + \frac{P_e T_e}{X_e} = P_{sa} T_d$$

$P_{sa}$ : ισχύς που παράγεται από ηλιακή συστοιχία (sa – solar array)

$P_e$  και  $P_d$ : φορτία ισχύος κατά την έκλειψη και το φως της ημέρας (d-day)

$T_e$  και  $T_d$ : χρόνος σε κάθε τροχιά που δαπανάται σε έκλειψη και στο φως της ημέρας

$X_d$ : απόδοση ισχύος από ΗΣ απευθείας σε φορτία (συνήθως 0.85)

$X_e$ : απόδοση ισχύος από ΗΣ για φόρτιση μπαταρίας και από μπαταρία σε φορτία (συνήθως 0.65)

(3/4) Προσδιορισμός μεγέθους συστοιχίας για συγκεκριμένη ισχύ

$$P_{BOL} = (Flux)(\eta)(I_d) \cos \theta \left[ \frac{W}{m^2} \right]$$

$P_0$ : πυκνότητα ισχύος εξόδου από τα κελιά

$Flux$  ή  $P_i$ : ηλιακή ροή (σταθερά) εισόδου ( $W/m^2$ )

$\zeta$  ή  $\eta$ : απόδοση υλικού ηλιακής κυψέλης

$P_{BOL}$ : ισχύς που δημιουργεί το ΗΣ (S/A) στο ξεκίνημα της ζωής του (S/A – solar array)

$P_{EOL}$ : πυκνότητα ισχύος που δημιουργεί το ΗΣ στο τέλος της ζωής του

$I_d$ : εγγενής υποβάθμιση (degradation)

$\theta$ : γωνία πρόσπτωσης ηλιακής ακτίνας

(5) Λαμβάνουμε υπόψιν την υποβάθμιση λόγω έκθεσης στο διαστημικό περιβάλλον

$$P_{EOL} = P_{BOL} L_d = P_{BOL} \left( 1 - \frac{degradation}{year} \right)^{lifetime \text{ in years}} \left[ \frac{W}{m^2} \right]$$

$P_{EOL}$ : πυκνότητα ισχύος που δημιουργεί το S/A στο τέλος της ζωής του

$L_d$ : υποβάθμιση διάρκειας ζωής

Τυπική υποβάθμιση / έτος:

- 0,0375 για πυρίτιο σε LEO
- 0,0275 για GaAs στο LEO



$$P_{BOL} = (Flux)(\zeta)(I_d) \cos \theta \left[ \frac{W}{m^2} \right]$$

(6) Βρείτε το μέγεθος της ηλιακής συστοιχίας που απαιτείται στο τέλος του χρόνου λειτουργίας:

$$A_{sa} = \frac{P_{sa}}{P_{EOL}} [m^2]$$

Αντικαθιστώντας στις προηγούμενες εξισώσεις:

$$A_{sa} = \frac{\frac{P_d T_d}{X_d} + \frac{P_e T_e}{X_e}}{(Flux)(\zeta)(I_d) \cos \theta} [m^2]$$

Η εξίσωση για την χωρητικότητα της μπαταρίας:

$$C_r = \frac{P_e T_e}{(DOD) N n} [W \cdot hr]$$

$C_r$ : συνολική χωρητικότητα μπαταρίας S / C

$P_e$ : μέσο φορτίο έκλειψης (watts)

$T_e$ : διάρκεια έκλειψης (hr)

$DOD$ : βάθος αποφόρτισης ( $0 \leq DOD \leq 1$ )

$N$ : αριθμός μπαταριών (τουλάχιστον δύο)

$n$ : απόδοση μετάδοσης μεταξύ μπαταρίας και φορτίου (η τυπική τιμή είναι 0,9)

Υπολογισμός Βάθους εκφόρτισης – DOD

$$\#Κύκλοι = (\#έτη ζωής) \left( \frac{365.25 \text{ μέρες}}{\text{έτος}} \right) \left( \frac{24 \text{ ώρες}}{\text{ημέρα}} \right) \left( \frac{\#εκλίψεις}{\text{ώρα}} \right)$$

## Παράδειγμα

**11.1** Σε μια διαστημική αποστολή μικροδορυφόρου πρέπει να υπολογιστούν οι παράμετροι του συστήματος ηλεκτρικής ισχύος. Αρχικές προσομοιώσεις δείχνουν ότι η κατανομή ισχύος για κάθε υποσύστημα θα είναι:

Υποσύστημα Αποθήκευσης και Διανομής Δεδομένων (ΥΑΔΔ):	8W
Υποσύστημα Προσδιορισμού και Ελέγχου Προσανατολισμού (ΥΠΕΠ):	3W
Υποσύστημα Ηλεκτρικής Ισχύος (ΥΗΙ):	0.5 W

Η σχεδίαση του δορυφόρου είναι στο τελικό στάδιο. Ο κύριος αισθητήρας/διαστημικό όργανο (payload) με τα ηλεκτρονικά του θα καταναλώνει 7.5 W. Για την ψύξη του αισθητήρα έχουμε φτιάξει μία διάταξη με ψύκτη με αντίσταση 2 Ω και λειτουργεί σε τάση 5V. Το σύστημα αυτό (ψύξης) θα λειτουργεί στο 30% του χρόνου κάθε τροχιάς (duty cycle). Η διαστημική αποστολή προγραμματίζεται να έχει πενταετή χρόνο λειτουργίας σε τροχιά των 500 km (ηλιακή ροή 1358

$W/m^2$ ). Ο δορυφόρος χρησιμοποιεί ηλιακές συστοιχίες από αρκενικούχο γάλλιο (GaAs) με απόδοση 28% ( $\eta_{cell}$ ) και γνωρίζουμε ότι θα έχουν φθίνουσα απόδοση 3% ανά έτος.

Γνωρίζοντας ότι όλα τα υποσυστήματα λειτουργούν συνεχόμενα, υπολογίστε:

- Τον μέσο όρο ισχύος ανά τροχιά (orbit average power)
- Αν το εμβαδό των ηλιακών συστοιχιών που χρειάζεται για να καλύψουν την επιφάνεια του δορυφόρου αν έχει γεωμετρικό σχήμα κύβου με πλευρά 0.3 m είναι αρκετό για την λειτουργία του δορυφόρου (υποθέτοντας ότι μία έδρα του κύβου φωτίζεται συνεχόμενα από τον Ήλιο)
- Την απαιτούμενη χωρητικότητα της μπαταρίας/συσσωρευτή (σε  $W \cdot hr$ ) για να υποστηρίξει τα κύρια υποσυστήματα (όχι τον αισθητήρα/διαστημικό όργανο) κατά την διάρκεια έκλειψης με βάθος εκφόρτισης (DOD) 25%.

### Λύση

- 1) Βρίσκουμε την μέγιστη ισχύ που καταναλώνει το διαστημικό όργανο, συμπεριλαμβανομένου του συστήματος ψύξης ( $\Sigma\Psi$ ):

$$\text{Ρεύμα συστήματος ψύξης} = (\text{τάση } \Sigma\Psi) / (\text{αντίσταση } \Sigma\Psi) = (5V) / (2\Omega)$$

$$\text{Ρεύμα } \Sigma\Psi = 2.5A$$

$$\text{Ισχύς } \Sigma\Psi = (\text{ρεύμα } \Sigma\Psi)(\text{τάση } \Sigma\Psi) = (2.5A)(5V)$$

$$\text{Ισχύς } \Sigma\Psi = 12.5W$$

$$\text{Ισχύς} = 7.5W + 12.5W = 20W$$

- 2) Βρίσκουμε τον μέσο όρο ισχύος του διαστημικού οργάνου που απαιτείται:

$$\text{Μέσος όρος ισχύος} = (\text{μέγιστη ισχύ}) (\% \text{ χρόνου λειτουργίας}) = (20W)(0.3) = 6.0W$$

- 3) Βρίσκουμε την συνεχόμενη ισχύ των υποσυστημάτων της πλατφόρμας (bus):

$$\text{Ισχύς υποσυστημάτων} = \text{ΥΑΔΔ} + \text{ΥΠΕΠ} + \text{ΥΗΙ} = 8W + 3W + 0.5W = 11.5W$$

- 4) Υπολογίζουμε την ακτίνα από το ύψος της τροχιάς:

$$\rho = \text{asin} \left( \frac{R_{\text{Earth}}}{h_{\text{mission}} + R_{\text{Earth}}} \right) = \text{asin} \left( \frac{6378 \text{ km}}{500 \text{ km} + 6378 \text{ km}} \right) = 68.0 \text{ deg}$$

- 5) Υπολογίζουμε τον ημιάξονα και την περίοδο της τροχιάς

$$a_{\text{mission}} = R_{\text{Earth}} + h_{\text{mission}} = 6378 \text{ km} + 500 \text{ km} = 6.878 \times 10^3 \text{ km}$$

$$P = 2\pi \sqrt{\frac{a_{\text{mission}}^3}{\mu}} = 2\pi \sqrt{\frac{(6878 \text{ km})^3}{3.986 \times 10^5 \frac{\text{km}^3}{\text{s}^2}}} = 94.6 \text{ min}$$

- 6) Βρίσκουμε τον μέγιστο χρόνο έκλειψης (time of eclipse - TE) και το χρόνο ηλιοφάνειας (time of sunlight - TS):

$$TE = \frac{2\rho}{360 \text{ deg}} P = \frac{2(68^\circ)}{360 \text{ deg}} (94.6 \text{ min}) = 35.7 \text{ min}$$

$$TS = P = TE = 94.6 - 35.7 = 58.9 \text{ min}$$

7) Βρίσκουμε την ενέργεια που απαιτείται κατά την έκλειψη:

$$\text{Ενέργεια έκλειψης} = (\text{ισχύς υποσυστημάτων})(TE) = (11.5\text{W})(35.7 \text{ min})/[(60 \text{ min/hr})]$$

$$\text{Ενέργεια έκλειψης} = 6.84\text{W}\cdot\text{hr} = 2.463 \times 10^4 \text{ J}$$

8) Βρίσκουμε την χωρητικότητα της μπαταρίας:

$$\text{χωρητικότητα της μπαταρίας} = \text{ενέργεια έκλειψης}/\text{DOD} = (6.84\text{W}\cdot\text{hr})/0.25 = 27.4 \text{ W}\cdot\text{hr}$$

9) Υπολογίζουμε το εμβαδό των ηλιακών συστοιχιών που εκτίθεται στον ήλιο:

$$\text{εμβαδό ηλιακών συστοιχιών που εκτίθεται στον ήλιο} = (\text{μήκος})(\text{πλάτος}) = (0.3\text{m})(0.3\text{m}) = 0.9 \text{ m}^2$$

10) Βρίσκουμε την μέγιστη ισχύ ηλιακών συστοιχιών (HΣ) στην αρχή λειτουργίας του δορυφόρου (beginning of life – BOL)

$$\text{Ισχύς ηλιακών συστοιχιών (BOL)} = (\text{εμβαδό HΣ})(\eta_{\text{cell}})(\text{ηλιακή σταθερά}) = (0.09 \text{ m}^2)(0.28)(1358 \text{ W/m}^2) = 34.2 \text{ W}$$

11) Βρίσκουμε την μέγιστη ισχύ ηλιακών συστοιχιών (HΣ) στο τέλος λειτουργίας του δορυφόρου (end of life – EOL)

$$\text{Ισχύς ηλιακών συστοιχιών (EOL)} = (\text{εμβαδό HΣ})(\eta_{\text{cell}})[(1-\text{φθίνουσα απόδοση})^{\text{έτη λειτουργίας}}](\text{ηλιακή σταθερά}) = (0.09 \text{ m}^2)(0.28)(1.0-0.03)^5(1358 \text{ W/m}^2) = 29.4 \text{ W}$$

12) Υπολογίζουμε τον μέσο όρο ισχύος των ηλιακών συστοιχιών

$$\text{μέσο όρο ισχύος HΣ} = [(\text{Ισχύς HΣ EOL})(TS)]/P = [(29.4\text{W})(58.9 \text{ min})]/94.6 \text{ min} = 18.3 \text{ W}$$

13) Υπολογίζουμε τον απαιτούμενο μέσο όρο ισχύος ανά τροχιά

$$\text{απαιτούμενο μέσο όρο ισχύος ανά τροχιά} = \text{μέση ισχύς οργάνου} + \text{ισχύς υποσυστημάτων} = 6.0 \text{ W} + 11.5 \text{ W} = 17.5 \text{ W}$$

14) Βρίσκουμε αν το εμβαδό των HΣ είναι επαρκές:

$$\text{Ισχύς HΣ} - \text{απαιτούμενης μέσης ισχύος ανά τροχιά} = 18.3 \text{ W} - 17.5 \text{ W} = 0.8\text{W}$$

Η διάταξη HΣ μας δίνει περίσσεια ισχύος κατά 0.8 W, που σημαίνει ότι το εμβαδό των HΣ είναι αρκετό

## Κεφάλαιο 12

### Υποσύστημα αποθήκευσης και διαχείρισης δεδομένων

#### Υποσύστημα Διαχείρισης και Υπολογισμού Δεδομένων (ΥΔΥΔ)

Το υποσύστημα επικοινωνιών και διαχείρισης δεδομένων είναι υπεύθυνο για τον χειρισμό των δεδομένων μεταξύ των υποσυστημάτων του διαστημικού διαύλου καθώς και για την επικοινωνία του διαστημικού σκάφους προς τη Γη. Περιλαμβάνει τα στοιχεία για τη μεταβίβαση, την υποδοχή και τη δρομολόγηση δεδομένων και σημάτων αποστολής εκ μέρους του διαστημικού σκάφους. Αποτελείται από πομπούς και δέκτες πάνω στο δορυφόρο για την εξασφάλιση της επικοινωνίας με το έδαφος, ώστε συγκεκριμένου τύπου δεδομένα να καταλήξουν σε συγκεκριμένους σταθμούς εδάφους. Επίσης, περιλαμβάνει τις απαραίτητες κεραιές, τους κατάλληλες πολυπλέκτες σημάτων και τυχόν φίλτρα ή και ενισχυτές σήματος. Η ανάλυση των απαιτήσεων επικοινωνίας παράγει έναν προϋπολογισμό που καθορίζει τις παραμέτρους για τον τύπο του εξοπλισμού και τον όγκο των δεδομένων που χρειάζεται να μεταδίδονται. Οι μηχανικοί χρησιμοποιούν τον προϋπολογισμό δεδομένων και τους προϋπολογισμό επικοινωνίας, μαζί με άλλες απαιτήσεις της αποστολής για το σχεδιασμό του υποσυστήματος επικοινωνιών και διαχείρισης δεδομένων.

#### Υποσύστημα επικοινωνιών και διαχείρισης δεδομένων (CDHS)/ΥΔΥΔ

Σε αυτή την ενότητα θα μάθετε να:

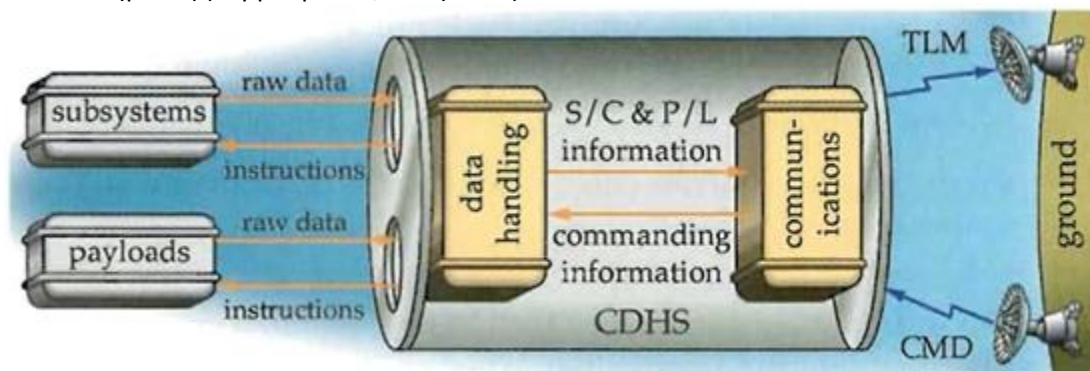
- Περιγράψετε τις εισόδους, τις εξόδους και τις βασικές διαδικασίες του υποσυστήματος επικοινωνιών και διαχείρισης δεδομένων (CDHS)
- Εξηγήστε τις βασικές αρχές που χρησιμοποιούνται για την επικοινωνία και τη διαχείριση των δεδομένων
- Εφαρμόζετε τη διαδικασία σχεδιασμού διαστημικών συστημάτων για το σχεδιασμό και τη δοκιμή ενός CDHS

Η παρακολούθηση πληροφοριών σχετικά με την κατάσταση του διαστημικού σκάφους είναι ζωτικής σημασίας για την επιτυχία μιας αποστολής. Το CDHS επεξεργάζεται όλη αυτές τις πληροφορίες. Χρησιμεύει ως τα αυτιά, τον εγκέφαλο και το στόμα του διαστημικού σκάφους. Τα "αυτιά" του συγκεντρώνουν ακατέργαστα δεδομένα από το ωφέλιμο φορτίο, από άλλα υποσυστήματα και από τους ελεγκτές εδάφους. Ο "εγκέφαλος" του επεξεργάζεται αυτά τα δεδομένα και τα μεταφράζει σε χρήσιμη μορφή ώστε να διανεμηθούν μεταξύ των υποσυστημάτων του σκάφους και προς το έδαφος. Το "στόμα" του κοινοποιεί τις πληροφορίες αυτές κατά τρόπο κατανοητό στους χρήστες στο κέντρο ελέγχου της αποστολής. Το CDHS λαμβάνει, αποθηκεύει και μεταφέρει όλες τις πληροφορίες του διαστημικού σκάφους. Το τμήμα επικοινωνίας αυτού του υποσυστήματος μεταφέρει δεδομένα και λειτουργικές

εντολές μεταξύ του διαστημικού σκάφους και των επίγειων σταθμών ή άλλων διαστημικών οχημάτων. Το τμήμα διαχείρισης δεδομένων συλλέγει τα δεδομένα από το ωφέλιμο φορτίο και οποιαδήποτε άλλα δεδομένα και τα αποθηκεύει μέχρι έως χρειαστεί να τα μεταδώσει στο έδαφος. Σε αυτή την ενότητα, θα ξεκινήσουμε με την εξέταση των εισόδων και εξόδων του CDHS. Στη συνέχεια θα δούμε σύντομα μερικές από τις βασικές αρχές της επικοινωνίας και της διαχείρισης των δεδομένων και θα εξηγήσουμε τη διαδικασία μετάφρασης των δεδομένων σε μορφή που μπορεί να μεταδοθεί από το ένα μέρος στο άλλο. Τέλος, θα εξετάσουμε τα βασικά στοιχεία κάθε υποσυστήματος διαχείρισης δεδομένων και τις απαιτήσεις λογισμικού ώστε να λειτουργήσουν όλα μαζί.

### Επισκόπηση Συστήματος

Θα συνεχίσουμε να εφαρμόζουμε την προσέγγιση των συστημάτων για να κατανοήσουμε τον τρόπο με τον οποίο λειτουργούν τα πράγματα σε ένα διαστημικό σκάφος. Κάθε σύστημα λαμβάνει κάποιες εισόδους, τις επεξεργάζεται και παράγει αποτελέσματα. Το σχήμα 185 απεικονίζει τις εισόδους και εξόδους του CDHS. Αρχίζοντας από τα αριστερά, το CDHS συλλέγει ακατέργαστα δεδομένα από το ωφέλιμο φορτίο και από τα άλλα υποσυστήματα. Μέσα στο τμήμα διαχείρισης δεδομένων, το CDHS επεξεργάζεται αυτά τα ακατέργαστα δεδομένα για να μεταφράσει τις πληροφορίες αυτές σε πολύτιμες πληροφορίες (εικόνες, μετρήσεις κ.λπ.) ή σημαντικές πληροφορίες σχετικά με την απόδοση του υποσυστήματος (θερμοκρασία, τάση κ.λπ.).



**Σχήμα 185: Υποσύστημα Διαχείρισης και Υπολογισμού Δεδομένων (ΥΔΥΔ).**

Σημειώνουμε εδώ ότι γίνεται διάκριση μεταξύ "δεδομένων" και "πληροφοριών". Δεδομένα μπορεί να είναι οποιαδήποτε συλλογή γεγονότων. Για παράδειγμα, 23°C ή 14V. Αυτά τα γεγονότα γίνονται χρήσιμα μόνο όταν τα βάζουμε σε ένα συγκεκριμένο πλαίσιο, π.χ. η θερμοκρασία των ηλιακών συλλεκτών στις 12:34 GMT ήταν 23°C ή η τάση της μπαταρίας μετά την έκλειψη ήταν 14V. Αφού συλλέξουμε αυτές τις πληροφορίες, το επόμενο βήμα είναι να τις μεταδώσουμε σε χρήστες στο έδαφος. Το τμήμα επικοινωνίας του CDHS είναι απλά ένα ραδιόφωνο που μεταδίδει ένα σήμα στο έδαφος. Οι πληροφορίες για την υγεία και την κατάσταση του ωφέλιμου φορτίου και του διαστημικού σκάφους, που λαμβάνουν οι ελεγκτές εδάφους για ανάλυση, ονομάζονται τηλεμετρία. Εάν κοιτάξουμε από δεξιά προς αριστερά το σχήμα 185, παρατηρούμε ότι το τμήμα επικοινωνιών συλλέγει εντολές που εκπέμπονται από το έδαφος (π.χ. "τράβηξε μια φωτογραφία πάνω από την Washington, D.C.") και τις μετατρέπει σε κατάλληλη μορφή ώστε να γίνονται αντιληπτές από το τμήμα της διαχείρισης δεδομένων. Στη συνέχεια, το CDHS σπάει αυτές τις πληροφορίες σε συγκεκριμένα σύνολα οδηγιών στο ωφέλιμο φορτίο και σε άλλα υποσυστήματα, τα οποία εκτελούν την εντολή (π.χ. περιστρέψτε το διαστημικό σκάφος 14° και τραβήξτε μια φωτογραφία στις 09:47 GMT). Στη συνέχεια, θα δούμε πώς το CDHS εκτελεί όλες αυτές τις λειτουργίες.

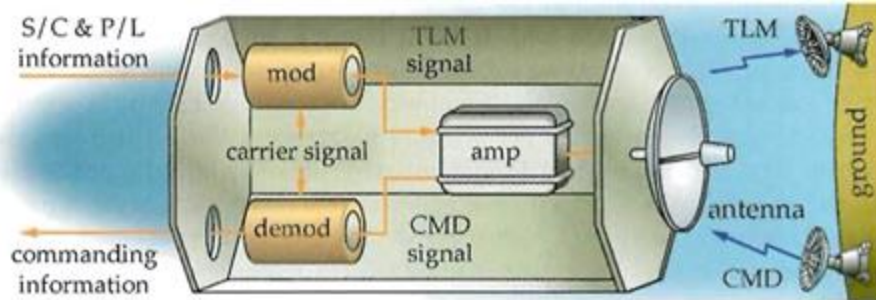
### 12.1 Βασικές αρχές λειτουργίας

Για να κατανοήσουμε αυτές τις βασικές αρχές λειτουργίας του CDHS, θα ξεκινήσουμε εξετάζοντας τη λειτουργία επικοινωνίας. Η επικοινωνία περιλαμβάνει τη μετάφραση πληροφοριών σε μορφή που μπορεί να μεταφερθεί από το σημείο Α στο σημείο Β. Σε ένα θεμελιώδες επίπεδο, αυτή είναι η ίδια διαδικασία που συμβαίνει σε έναν υπολογιστή. Η κύρια διαφορά είναι η ποσότητα της "μετάφρασης" που συμβαίνει. Στην πραγματικότητα, στα σύγχρονα διαστημικά σκάφη, μπορεί να είναι πολύ δύσκολο να ξεχωρίσει κανείς πότε οι υπολογισμοί τελειώνουν και πότε η επικοινωνία αρχίζει. Οι δύο λειτουργίες έχουν πλέον συνδυαστεί κατά μεγάλο βαθμό στο ίδιο υλικό και λογισμικό. Ωστόσο, εδώ θα σπάσουμε το CDHS σε δύο μέρη -την επικοινωνία και τη διαχείριση των δεδομένων.

#### Επικοινωνία

Σε ένα απλό τηλεγραφικό σύστημα, ένα καλώδιο συνδέει δύο σταθμούς. Όταν ένας ηλεκτρομηχανικός διακόπτης κλείνει σε κάθε άκρη, ένας ηλεκτρικός παλμός κινείται κατά μήκος του καλωδίου και ένας άλλος ηλεκτρομηχανικός διακόπτης στο άλλο άκρο τον εντοπίζει. Γνωρίζοντας τους προφανείς περιορισμούς αυτού του αρκετά αργού συστήματος, πώς μπορούμε να σχεδιάσουμε μια χρήσιμη τεχνική επικοινωνίας; Εν απουσία οποιασδήποτε επικοινωνίας, δεν υπάρχει δραστηριότητα στο καλώδιο. Από τεχνική άποψη, για να υπάρξει επικοινωνία χρειαζόμαστε έναν φορέα σήματος. Ο φορέας σήματος κυριολεκτικά μεταφέρει την πληροφορία μαζί του, χωρίς ο ίδιος να παρέχει καμία πληροφορία. Έχουμε αποφασίσει ότι αυτό το ηλεκτρικό σήμα θα έχει πάντα το ίδιο πλάτος, φάση και συχνότητα. Η επικοινωνία πραγματοποιείται διαμορφώνοντας το μήνυμα στον φορέα ώστε να πάρουμε ένα σήμα προς μετάδοση. Για έναν τηλεγράφο, ο φορέας του συστήματος είναι ένα «σιωπηλό» καλώδιο (μηδενικό πλάτος, φάση και συχνότητα). Όταν προσθέτουμε ένα μήνυμα, είναι σαν να φωνάζουμε σε ένα ήσυχο δωμάτιο. Η τεχνική που χρησιμοποιούμε για να συνδυάσουμε το -ωφέλιμο- σήμα στο φορέα ονομάζεται διαμόρφωση. Για το τηλεγράφημα, οι επιλογές διαμόρφωσης είναι αρκετά περιορισμένες. Μπορούμε μόνο να ενεργοποιήσουμε ή να απενεργοποιήσουμε τον παλμό ή να αλλάξουμε το πλάτος του (μικρότερη ή μεγαλύτερη διάρκεια). Ωστόσο, ο Morse επινόησε ένα απλό αλλά αποτελεσματικό τρόπο διαμόρφωσης που εξακολουθεί να φέρει το όνομά του: κώδικας Morse. Ο Morse αποδίδει σε κάθε γράμμα του αλφαβήτου και σε κάθε αριθμό από το 0-9 μια συγκεκριμένη σειρά "κουκίδων" (σύντομων παλμών) και "παύσεων" (μεγάλων παλμών). Έτσι, δύναται να μεταφραστεί οποιοδήποτε μήνυμα στον κώδικα Morse και να μεταδοθεί χρησιμοποιώντας τον τηλεγράφο.

Οι φυσικοί, τεχνικοί και νομικοί περιορισμοί υπαγορεύουν συγκεκριμένες συχνότητες επικοινωνίας για τις διαστημικές αποστολές. Τα ατμοσφαιρικά παράθυρα θέτουν φυσικούς περιορισμούς στις συχνότητες που μπορούν να περάσουν ανεπηρέαστες μέσα από την ατμόσφαιρα. Οι τεχνικές απαιτήσεις όπως το μέγεθος της κεραίας, η διαθέσιμη ισχύς, ο ρυθμός μετάδοσης δεδομένων όπως και πολλές άλλες προδιαγραφές περιορίζουν το εύρος συχνοτήτων που μπορούμε να χρησιμοποιήσουμε για μια συγκεκριμένη αποστολή. Τέλος, η διεθνής αδειοδότηση των συχνοτήτων για τα διαστημικά σκάφη από τη Διεθνή Ένωση Τηλεπικοινωνιών (ITU) και από την Παγκόσμια Διάσκεψη Ραδιοεπικοινωνιών (WARC) υπαγορεύουν ποιες συχνότητες μπορούμε να χρησιμοποιούμε που ίσως να διαφέρουν από αυτές που εμείς θέλουμε να χρησιμοποιήσουμε. Η άδεια χρήσης συγκεκριμένων συχνοτήτων μπορεί να είναι ένα εξαιρετικά πολύτιμο περιουσιακό στοιχείο μιας εταιρείας. Στο σχήμα 186 παρουσιάζονται τα βασικά στοιχεία του τμήματος επικοινωνίας του CDHS. Το φορτίο και οι πληροφορίες του διαστημικού σκάφους κωδικοποιούνται επί του φορέα από έναν διαμορφωτή πριν ενισχυθούν και αποσταλούν στην κεραία του διαστημικού σκάφους για τη μετάδοση στο έδαφος. Στην κεραία του δέκτη συγκεντρώνονται αντίστοιχα οι εντολές από το έδαφος. Κατόπιν ένας ενισχυτής ενισχύει το ασθενές σήμα και ένας αποδιαμορφωτής μεταφράζει (αποκωδικοποιεί) το σήμα που λήφθηκε προτού το στείλει στο κομμάτι της διαχείρισης των δεδομένων.

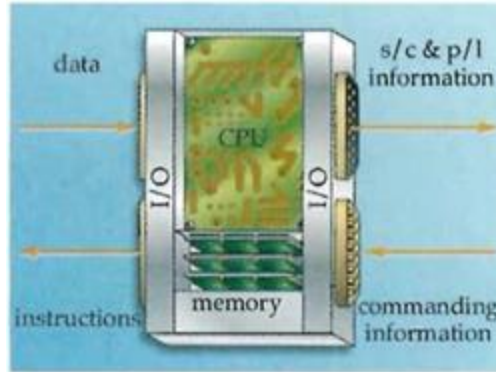


Σχήμα 186: Σύστημα επικοινωνίας

Ένας οικιακός υπολογιστής χειρίζεται την πρόσβαση στο Διαδίκτυο με τον ίδιο τρόπο, χρησιμοποιώντας έναν συνδυαστικό διαμορφωτή /αποδιαμορφωτή που ονομάζεται "MODEM" (ή διαποδιαμορφωτής).

## 12.2 Διαχείριση Δεδομένων

Για να μετατραπεί το ωφέλιμο σήμα σε μορφή που μπορεί να μεταδοθεί, ο διαμορφωτής πρέπει να συνδυάσει το σήμα με το φορέα. Με μαθηματικούς όρους, ο συνδυασμός σημαίνει ο πολλαπλασιασμός των δύο ώστε να σχηματίσουν το μεταδιδόμενο σήμα. Για να φτάσουμε σε αυτό το σημείο, πρέπει να έχουμε χρήσιμες πληροφορίες για αποστολή. Έτσι, το κομμάτι της διαχείρισης δεδομένων πρέπει πρώτα να χειριστεί τα δεδομένα από το ωφέλιμο φορτίο και από τα υπόλοιπα υποσυστήματα. Αυτή η διαδικασία περιλαμβάνει προσθέσεις, αφαιρέσεις, πολλαπλασιασμούς και διαιρέσεις μεταξύ σημάτων. Αυτές οι λειτουργίες αποτελούν την καρδιά της διαχείρισης δεδομένων, η οποία είναι η μόνη λειτουργία που επιτελούν υπολογιστές. Το υλικό από το οποίο αποτελείται η διαχείριση δεδομένων ενός διαστημικού σκάφους μοιάζει σε μεγάλο βαθμό με έναν προσωπικό υπολογιστή. Οι σύγχρονοι υπολογιστές εργάζονται υπό τους ίδιους βασικούς περιορισμούς που αντιμετώπισε ο Samuel Morse. Όπως και στον τηλεγράφο, τα δεδομένα εντός ενός υπολογιστή μπορούν να ταξιδεύουν μόνο ως ηλεκτρονικοί παλμοί που είναι είτε ενεργοποιημένοι είτε απενεργοποιημένοι. Αντί του κώδικα Morse, αντιμετωπίζουμε αυτούς τους παλμούς on / off ως 1 και 0 και εφαρμόζουμε τη δυαδική αριθμητική. (Τα γνωστά μαθηματικά χρησιμοποιούν δεκαδικό σύστημα – με βάση το 10. Τα δυαδικά μαθηματικά χρησιμοποιούν το δυαδικό σύστημα – με βάση το 2). Κάθε 1 ή 0 ονομάζεται bit. Ακριβώς όπως τα γράμματα συνδυάζονται για να σχηματίζουν λέξεις, bits δεδομένων συνδυάζονται σε ομάδες που ονομάζονται bytes. Ανάλογα με τον υπολογιστή, 8, 16, 32, ή περισσότερα κομμάτια σχηματίζουν μια λέξη. Εκατομμύρια τρανζίστορ που συσκευάζονται σε τσιπ υπολογιστών πραγματοποιούν μαθηματικές λειτουργίες μέσα στο υλικό του υπολογιστή. Όσο πιο πυκνά τοποθετούμε αυτά τα τρανζίστορ, τόσο περισσότεροι υπολογισμοί μπορούν να πραγματοποιηθούν σε μια δεδομένη χρονική στιγμή. Μετράμε αυτήν την ταχύτητα επεξεργασίας ή διεκπεραίωσης σε κύκλους ανά δευτερόλεπτο (ή Hertz, συντομογραφία Hz) και μερικές φορές την αποκαλούμε "ταχύτητα ρολογιού" στους οικιακούς υπολογιστές.



**Σχήμα 187: Κύρια στοιχεία του τμήματος διαχείρισης δεδομένων ΥΔΥΔ**

Το σχήμα 187 απεικονίζει τα τρία κύρια στοιχεία του τμήματος διαχείρισης δεδομένων του CDHS. Οι συσκευές input/output (I/O) αλληλεπιδρούν με τον "εξωτερικό κόσμο" για τη συλλογή και τη διανομή δεδομένων σε άλλους χρήστες. Οι υπολογισμοί λαμβάνουν χώρα μέσα στην κεντρική μονάδα επεξεργασίας (CPU). Αυτός είναι ο κύριος επεξεργαστής στον υπολογιστή και είναι παρόμοιος (και σε ορισμένες περιπτώσεις, ακόμη και ίδιος) με έναν Pentium III που υπάρχει σε έναν οικιακό υπολογιστή. Όταν χρειάζεται πρόσθετες πληροφορίες, η CPU μπορεί να έχει πρόσβαση και να χρησιμοποιεί τις πληροφορίες που είναι αποθηκευμένες στη μνήμη. Η μνήμη έχει πολλές διαφορετικές μορφές. Το μνήμη μόνο για ανάγνωση (ROM) αποθηκεύει σταθερά προγράμματα και δεδομένα που δεν αλλάζουν καθ' όλη τη διάρκεια της αποστολής (εκτός αν αντικατασταθούν από χειριστές ή μηχανικούς). Αυτή είναι η μη πτητική μνήμη που διατηρεί τα δεδομένα της ακόμα και αν ο υπολογιστής κλείσει. Μέσα σε έναν οικιακό υπολογιστή, η ROM αποθηκεύει τις βασικές οδηγίες που επιτρέπουν στον υπολογιστή να ενεργοποιείται και να επικοινωνεί με τις συσκευές εισόδου.

Για μακροπρόθεσμη αποθήκευση, το διαστημικό σκάφος χρησιμοποιεί μη πτητική μνήμη που αποθηκεύει μεγάλα ποσά δεδομένων, όπως συγκεκριμένα προγράμματα ή δεδομένα ωφέλιμου φορτίου. Αρχικά, τα δεδομένα αποθηκεύονταν σε ογκώδεις δίσκους ταινιών, όμως, έχουν πλέον αντικατασταθεί από οι μνήμες στερεάς κατάστασης ως επί το πλείστον στα σύγχρονα διαστημικά σκάφη. Οι υπολογιστές επίσης βασίζονται στη μνήμη τυχαίας προσπέλασης (RAM) για βραχυπρόθεσμη αποθήκευση. Οι πληροφορίες ρέουν από τη μακροπρόθεσμη αποθήκευση στη μνήμη RAM, όπου η CPU μπορεί να την προσπελάσει με μεγαλύτερες ταχύτητες. Δυστυχώς, η μνήμη RAM κρατά συνήθως πολύ λιγότερες πληροφορίες από τις υπόλοιπες συσκευές αποθήκευσης μακράς διάρκειας. Επιπλέον, η μνήμη RAM είναι πτητική μνήμη. Δηλαδή, όλες οι πληροφορίες που αποθηκεύονται στη μνήμη RAM χάνονται όταν διακοπεί η τροφοδοσία.

Το λογισμικό ελέγχει τις ενέργειες επί των δεδομένων. Το λειτουργικό σύστημα επιτελεί βασικότερες λειτουργίες για να δουλέψει ο υπολογιστής και να προγραμματίσει γεγονότα/εντολές. Στους οικιακούς υπολογιστές, το λειτουργικό σύστημα (π.χ. Windows ή MacOS) είναι το βασικό σύνολο οδηγιών που επιτρέπει στον υπολογιστή να ξεκινά και να λειτουργεί. Το λογισμικό στον υπολογιστή σας χειρίζεται συγκεκριμένες εργασίες, όπως επεξεργασίες κειμένου ή υπολογιστικά φύλλα. Σε ένα διαστημικό σκάφος, μια εφαρμογή λογισμικού μπορεί να λειτουργήσει ώστε να στρέψει το διαστημικό σκάφος ή να επεκτείνει τις κεραίες. Άλλες εφαρμογές λογισμικού ελέγχουν αισθητήρες, προωθητές και εκτελούν άλλες συγκεκριμένες εργασίες.

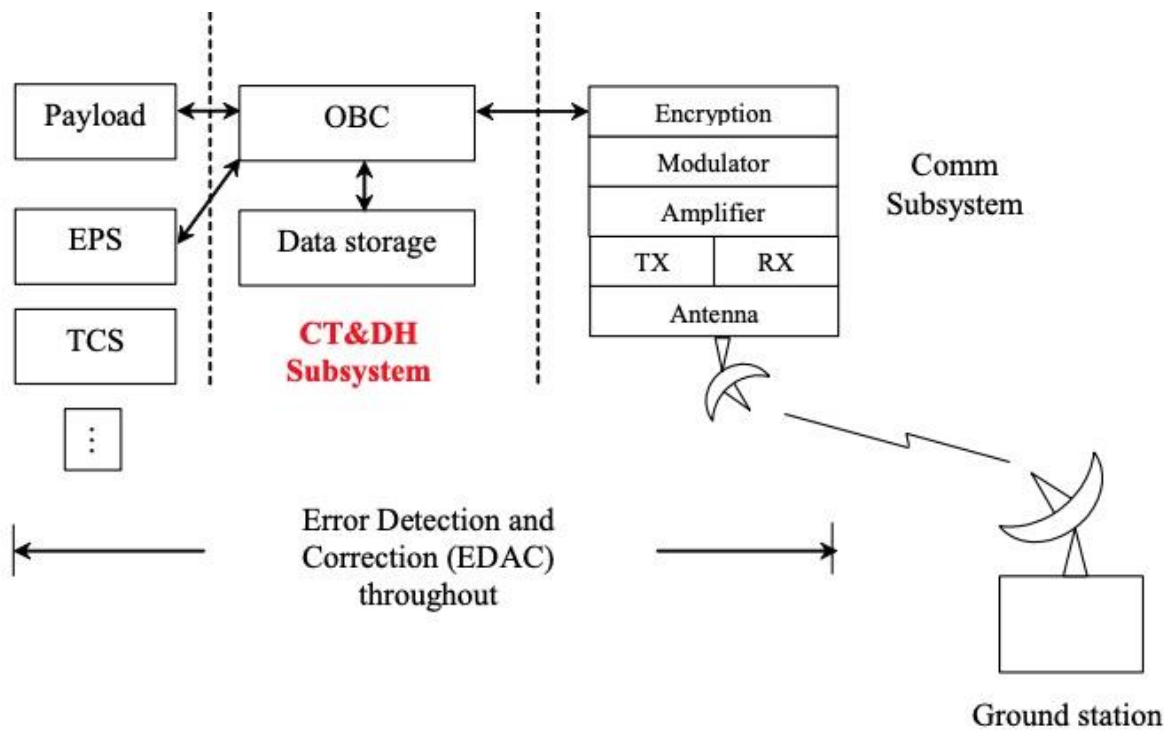
Το λογισμικό ελέγχει σχεδόν κάθε ενέργεια σε ένα διαστημικό σκάφος (καθώς και στο κέντρο επιχειρησιακού ελέγχου). Η επιτυχία ή η αποτυχία μιας αποστολής μπορεί να εξαρτάται από μία μόνο



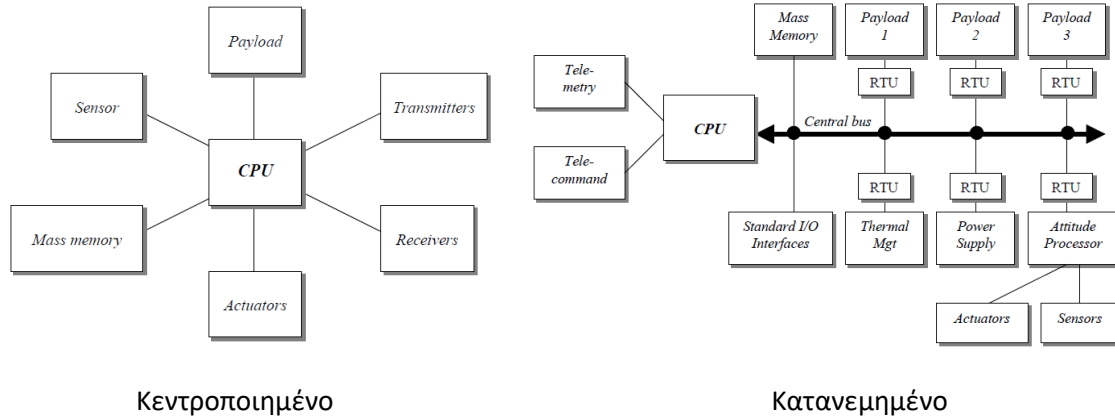
γραμμή κώδικα. Για να εξασφαλιστεί η επιτυχία, οι διαχειριστές αποστολών εκτελούν αυστηρές δοκιμές λογισμικού. Ωστόσο, όπως κάθε χρήστης του υπολογιστή γνωρίζει, κανένα λογισμικό δεν είναι αψευγάδιαστο. Για το λόγο αυτό, οι έμπειροι σχεδιαστές αποστολών ενσωματώνουν την ευελιξία να επαναπρογραμματίζουν το διαστημικό σκάφος τους ακόμα και μετά την εκτόξευση, κατά τη διάρκεια της αποστολής, από το σύστημα εδάφους. Αυτό τους επιτρέπει να διορθώνουν σφάλματα ανάλογα με τις ανάγκες και να αναβαθμίζουν λειτουργίες καθ' όλη τη διάρκεια της αποστολής. Για παράδειγμα, όταν το διαστημικό σκάφος Voyager εμφάνισε πρόβλημα στην περιστροφή της κάμερας του μετά την προσέγγιση του στον Κρόνο, οι ελεγκτές εδάφους τροποποίησαν εκτενώς το λογισμικό του από περισσότερα από τρία δισεκατομμύρια χιλιόμετρα μακριά για να το επιδιορθώσουν.

### 12.3 Αρχιτεκτονική Υποσυστήματος Διαχείρισης και Υπολογισμού Δεδομένων (ΥΔΥΔ)

Στην καρδιά του OBDH βρίσκεται μια κεντρική μονάδα επεξεργασίας (CPU) και μια σχετική μνήμη αποθήκευσης, μαζί αποτελούν τον εγκέφαλο του δορυφόρου. Στη διαμόρφωση κατακεντρωμένου διαύλου, η CPU εξυπηρετείται από μια σειρά από απομακρυσμένες μονάδες τερματικού (RTU) - ένα σύνολο μίνι επεξεργαστών που εκτελούν τοπικές εργασίες ώστε ο διάλογος μεταξύ των λειτουργικών μονάδων και της CPU να λειτουργεί ομαλά. Με λειτουργικές μονάδες εννοούμε όργανα, αισθητήρες, ρελέ, ενεργοποιητές, συσκευές αποθήκευσης κ.λπ.



Σχήμα 188: ΥΔΥΔ Λειτουργίες



Σχήμα 189: ΥΔΥΔ – Αρχιτεκτονική

Το σχήμα 189 δείχνει τις λειτουργίες του ΥΔΥΔ και την διασύνδεσή του με τα υπόλοιπα υποσυστήματα του δορυφόρου. Ανάλογα με τον τύπο, πολυπλοκότητα, προδιαγραφές και επιχειρησιακές ανάγκες μιας διαστημικής αποστολής μπορεί να υπάρχουν διαφορετικές αρχιτεκτονικές του ΥΔΥΔ, όπως απεικονίζονται στο σχήμα 5. Ένα από τα κύρια στοιχεία του ΥΔΥΔ είναι ο μικροεπεξεργαστής ο οποίος είναι ισχυρός σε υπολογιστική ικανότητα, επαναπρογραμματιζόμενος, μικρός σε μέγεθος, κατανάλωση ισχύος και χαμηλής ενέργειας και λειτουργεί σαν ελεγκτής και επεξεργαστής δεδομένων. Οι τυπικές χρήσεις του στο διάστημα περιλαμβάνουν την μορφοποίηση τηλεμετρίας, προγραμματισμός εντολών, λειτουργίες βρόχων ελέγχου του υποσυστήματος προσανατολισμού, συλλογή δεδομένων, έλεγχος πειράματος και την επεξεργασία επικοινωνιών, εικόνες από τα επιστημονικά όργανα.

Το λογισμικό που χρησιμοποιείται σε δορυφόρους αποτελεί σημαντικό στοιχείο του ΥΔΥΔ και με τον χρόνο απαιτεί αυξημένη προσπάθεια καθώς οι διαστημικές αποστολές αποκτούν αυξημένους αυτοματισμούς και αυτονομία. Υπάρχουν αρκετοί κίνδυνοι κατά την διάρκεια της δημιουργίας του λογισμικού ενός δορυφόρου που περιλαμβάνουν:

- Έλλειψη δοκιμών, δεν γίνονται αρκετές δοκιμές (πιστοποίηση/επιβεβαίωση)
- Αρκετά περίπλοκο
- Προβλήματα με το υλικό (hardware) π.χ. αστοχία (π.χ. ακτινοβολία), περίπλοκο
- Αμφισβητήσιμη αξιοπιστία
- Υποστηρίζεται από τεράστια ισχύ και ταχύτητα.

Οι λειτουργίες της κεντρικής μονάδας επεξεργασίας (Central Processing Unit) περιλαμβάνουν:

- Προσανατολισμός κεραιών
- Ανάπτυξη κεραιών και ηλιακών συλλεκτών.
- Διατήρηση των ηλιακών πάνελ στραμμένα στον ήλιο. Ρύθμιση ισχύος με εναλλαγή σειρών ηλιακών συστοιχιών.
- Ενεργοποίηση τοπικών θερμαντήρων όπως απαιτείται στα υποσυστήματα ωφέλιμου φορτίου, μπαταρίας και πρόωσης.
- Εκτέλεση ελιγμών προσανατολισμού και τροχιάς σύμφωνα με οδηγίες που έχουν ήδη φορτωθεί από το έδαφος.
- Εναλλαγή μεταξύ περιττών μονάδων σε περίπτωση αποτυχίας μιας από αυτές.
- Διακοπή της αποστολής σε περίπτωση σοβαρών ανωμαλιών επί του σκάφους και τοποθέτηση του δορυφόρου σε ασφαλή προσανατολισμό και διαμόρφωση, εν αναμονή της διαγνωστικής ανάλυσης και της αποκατάστασης από το έδαφος.

- Λήψη, αποκωδικοποίηση και εκτέλεση τηλε-εντολών.
- Συλλογή, κωδικοποίηση και μετάδοση δεδομένων τηλεμετρίας στο τμήμα RF (τηλ/ων) του υποσυστήματος TT&C. (Τηλεπικοινωνίες, τηλεμετρίας και εντολών)

Στις περισσότερες περιπτώσεις σε συστήματα αεροδιαστημικής (αεροσκάφη, δορυφόροι) και ειδικά σε επανδρωμένες πτήσεις τα συστήματα ΥΔΥΔ χρησιμοποιούν εφεδρικούς/πολλαπλούς υπολογιστές για αυξημένη ασφάλεια και αξιοπιστία. Στους εφεδρικούς υπολογιστές (Πλεονασμός/Redundancy) χρησιμοποιούνται διάφορες τεχνικές : Με τρεις εφεδρικούς υπολογιστές είναι δυνατόν να εισάγουμε ένα σύστημα ψηφοφορίας ώστε όταν οι δύο από αυτούς βρίσκονται σε συμφωνία να επικρατούν του τρίτου. Το διαστημικό λεωφορείο για παράδειγμα διέθετε 4 ίδιους εφεδρικούς κύριους επεξεργαστές με ένα περίπλοκο σύστημα ψηφοφορίας. Οι τρεις από αυτούς μπορούν να «υπερισχύσουν» του τέταρτου και οι δύο μπορούν ακόμα και να παραβλέψουν τον τρίτο εάν ο τέταρτος είναι σίγουρο ότι δεν λειτουργεί σωστά και ο τρίτος δεν συμφωνεί με τους δύο πρώτους. Στην έσχατη περίπτωση το πλήρωμα χρησιμοποιεί και πέμπτο επεξεργαστή με διαφορετικό λογισμικό για να αναλύσει την κατάσταση ανεξάρτητα από τους υπόλοιπους επεξεργαστές.

Στους υπολογιστές 'Πτήσης' (OBC) μπορεί να ανακύψουν διάφορα προβλήματα υλικού (hardware), όπως:

- Αξιοπιστία συσκευής
- Ακτινοβολία
  - Συνολική δόση
  - Μεμονωμένες επιδράσεις (SEU) που προκαλούνται από ακτινοβολία
  - Παρακολούθηση μεμονωμένων εκδηλώσεων (SEL) που προκαλούνται από ακτινοβολία
- Λογισμικό
  - Συντηρητισμός
  - Φόβος
  - κανένα πρόβλημα σε LEO
  - ανίχνευση και διόρθωση σφαλμάτων (EDAC)

Όπως αναφέραμε σε προηγούμενη ενότητα, η ευαισθησία των κυκλωμάτων σε ακτινοβολία μπορεί να δημιουργήσει πολλαπλά προβλήματα, φθορές στα ηλεκτρονικά και λογισμικό, όπως μες τις Μεμονωμένες Επιδράσεις (ME) (Single Event Upsets – SEU) και με την περίπτωση μεμονωμένων εκδηλώσεων (MEK) (Single Event Latch-Up).

Για τις μεμονωμένες επιδράσεις SEU μπορούμε να πάρουμε τις παρακάτω προφυλάξεις:

- Μια μεμονωμένη επίδραση (SEU) είναι μια αλλαγή κατάστασης που προκαλείται από ένα μόνο σωματίδιο ιονισμού (ιόντα, ηλεκτρόνια, φωτόνια ...) που χτυπά έναν ευαίσθητο κόμβο σε μια μικρο-ηλεκτρονική συσκευή, όπως σε έναν μικροεπεξεργαστή, μνήμη ημιαγωγών ή τρανζίστορ ισχύος.
- Ποσοστό LEO  $1 \times 10^{-7}$  SEU / bit / ημέρα
- Η SEU μπορεί να καταστρέψει το αποθηκευμένο πρόγραμμα ή μια μεταβλητή
  - Απαιτείται διόρθωση
  - Δεν φαίνεται στη CPU

Single Event Latch-Up που δημιουργείται από ακτινοβολία με ιόντα υψηλής ενέργειας σε κυκλώματα CMOS [15]. Το φαινόμενο Single Event Latch-Up δημιουργεί μόνιμα σφάλματα και μπορεί να οδηγήσει το ολοκληρωμένο κύκλωμα ακόμα και σε καταστροφή λόγω αύξησης της θερμοκρασίας που προκαλεί η διέλευση ισχυρών ρευμάτων στην κατάσταση αυτή.

Μπορούμε να συνοψίσουμε τις χρήσεις ΥΔΥΔ (OBDH) ως:

- Συλλογή «τηλεμετρίας»
  - Δεδομένα πειράματος
  - Δεδομένα επικοινωνιών
  - Δεδομένα παρακολούθησης συστήματος
- Διανομή «εντολών»
  - τυπικές εντολές παραγγελιών
  - παράμετροι λογισμικού
  - επαναφόρτωση λογισμικού
  - δεδομένα επικοινωνιών

### Παράδειγμα 12.1

Ένας δορυφόρος cubesat τηλεπαρατήρησης σε τροχιά 500 km (LEO) χρησιμοποιεί ένα οπτικό ωφέλιμο φορτίο με ανιχνευτή 1024 x 1024 pixel. Ας υποθέσουμε ότι απαιτούνται 8 bit για την ακριβή καταγραφή κάθε pixel δεδομένων. Ο στόχος της αποστολής είναι να απεικονίσει περιοχές εδάφους, πράγμα που σημαίνει ότι ο οπτικός αισθητήρας θα είναι ενεργός για το 30% κάθε τροχιάς. Η περίοδος τροχιάς του cubesat είναι 90 λεπτά και απαιτείται η συλλογή εικόνας κάθε 30 δευτερόλεπτα. Χρησιμοποιώντας τεχνικές επεξεργασίας επί του σκάφους και αλγόριθμους ανίχνευσης σφαλμάτων, το 95% των εικόνων εξαλείφεται για σκοπούς αποθήκευσης επί του σκάφους. Οι υπόλοιπες εικόνες αποθηκεύονται στην ενσωματωμένη μνήμη του cubesat και πρέπει να σταλούν στη Γη μέσω 15-λεπτου περάσματος πάνω από έναν σταθμό εδάφους που βρίσκεται στο Πανεπιστήμιο της Πάτρας. Ας υποθέσουμε ότι δεδομένα 3ών τροχιών πρέπει να αποθηκευτούν και να ληφθούν με ένα πέρασμα. Υπολογίστε τη μέγιστη ποσότητα δεδομένων (byte) που πρέπει να αποθηκευτούν στον δορυφόρο και τον ελάχιστο ρυθμό δεδομένων (bits/s) που απαιτείται για τη λήψη των δεδομένων στο σταθμό εδάφους

Λύση

#### 1) Προσδιορισμός δεδομένων ανά εικόνα

Δεδομένα ανά εικόνα =  $(1024)(1024)(8) = 8.389 \times 10^6$  bits

#### 2) Προσδιορισμός εικόνων που συλλέγονται ανά τροχιά:

Εικόνες ανά τροχιά =  $(90\text{min}) (2/\text{min}) (0.3) (0.05) = 2.7$

Με στρογγυλοποίηση → Εικόνες ανά τροχιά = 3

#### 3) Προσδιορισμός μέγιστων δεδομένων που αποθηκεύονται

Μέγιστος αριθμός bits δεδομένων =  $(3 \text{ τροχιές})(3 \text{ εικόνες ανα τροχιά})(8.389 \times 10^6 \text{ bits})$

Μέγιστος αριθμός bits δεδομένων =  $7.55 \times 10^7$  bits

Μέγιστος αριθμός bytes δεδομένων =  $7.55 \times 10^7 \text{ bits} / 8 = 9.437 \times 10^6$  bytes

#### 4) Προσδιορισμός ελάχιστου ρυθμού μετάδοσης

Ελάχιστος ρυθμός μετάδοσης =  $7.55 \times 10^7 \text{ bits} / [(15\text{min}) (60\text{s}/\text{min})] = 8.389 \times 10^4 \text{ bits/s}$

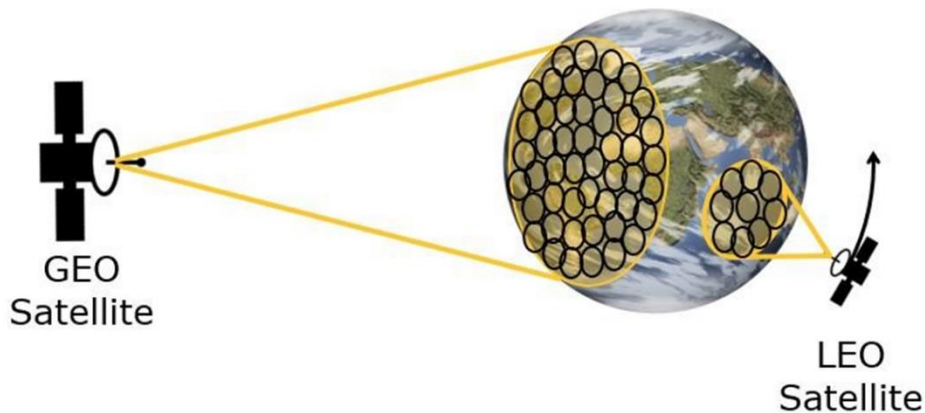
## Κεφάλαιο 13

### Υποσύστημα Τηλεπικοινωνιών/Ζεύξεων

Τα δορυφορικά δίκτυα επικοινωνιών αποτελούν ένα σημαντικό τμήμα των σύγχρονων τηλεπικοινωνιακών συστημάτων, εξαιτίας της ανάπτυξης των δυνατοτήτων σχετικά με τους τρόπους μετάδοσης πληροφοριών, της ζεύξης μεταξύ σημείων, που θα ήταν αδύνατον να επικοινωνήσουν, χωρίς τη χρήση δορυφόρων, τον άμεσο χρόνο λήψης δεδομένων χωρίς την παρέμβαση άλλων δικτύων, αλλά και την προσιτή χρήση τους πλέον σε όλες τις εκφάνσεις της ανθρώπινης δραστηριότητας. Μέσω αυτών των δικτύων έχει καταστεί πλέον δυνατή η επικοινωνία οποιουδήποτε, με οποιονδήποτε και ανά πάσα στιγμή. Τα δορυφορικά συστήματα αρχικά χρησιμοποιήθηκαν για την παροχή τηλεφωνικής υπηρεσίας. Σήμερα, οι δορυφόροι χρησιμοποιούνται σε μια ευρεία γκάμα υπηρεσιών, όπως η εκπομπή τηλεοπτικού σήματος, οι τοπικές και διεθνείς κλήσεις, η μεταφορά δεδομένων και η πρόσβαση στο Διαδίκτυο. Η ανάπτυξη των δορυφορικών επικοινωνιών προσφέρει πλήθος νέων δυνατοτήτων και είναι σχεδόν σίγουρο ότι και στο προσεχές μέλλον οι δορυφόροι θα συνεχίσουν να κατέχουν εξέχοντα ρόλο στις τηλεπικοινωνίες. Οι δορυφορικές επικοινωνίες χωρίζονται ουσιαστικά σε δύο υποκατηγορίες: 1) στις εφαρμογές, όπως τηλεφωνία, αναμετάδοση τηλεόρασης, παροχή ευρυζωνικού διαδικτύου 2) δορυφορικές ζεύξεις για την επικοινωνία, τηλεμετρία και παροχή εντολών/λήψη δεδομένων από και προς σταθμών εδάφους. Η ενότητα αυτή θα περιγράψει εισαγωγικά την δεύτερη υποκατηγορία.

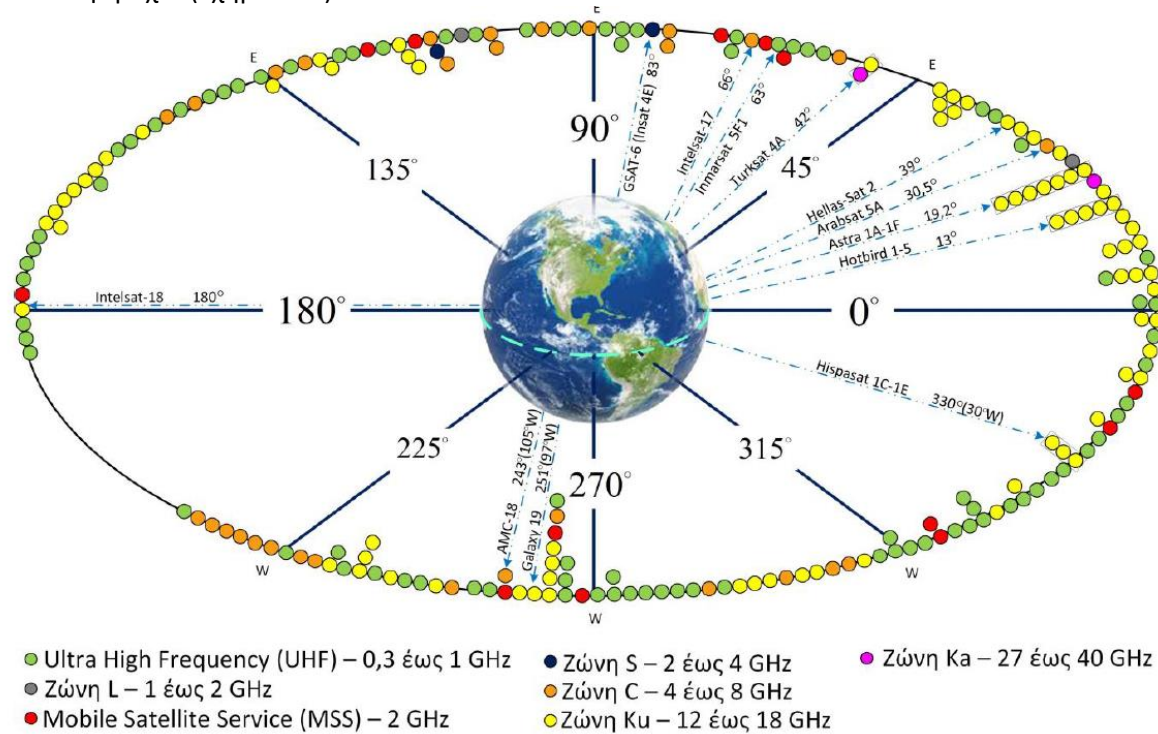
Οι κύριες εφαρμογές των διαστημικών επικοινωνιών είναι:

- Επικοινωνία φωνής και δεδομένων
- Αναμετάδοση σήματος
- Πλοήγηση
- Μετεωρολογία
- Επιστημονικές αποστολές (π.χ. εξερεύνησης)



Σχήμα 190: Δορυφόροι GEO και LEO για εφαρμογές Τηλεπικοινωνιών

Οι δορυφορικές επικοινωνίες για την τηλεφωνία, αναμετάδοση βίντεο, δεδομένων, διαδικτύου, τηλεόρασης είναι η πιο διαδομένη εφαρμογή διαστημικών τεχνολογιών. Οι περισσότεροι τηλ/οι δορυφόροι βρίσκονται σε γεωστατική τροχιά σε υψόμετρο 36000 km ώστε να έχουν την ίδια περίοδο με την Γη, άρα μένουν σταθεροί πάνω από μια γεωγραφική επικράτεια, όπως φαίνεται στο σχήμα 190. Η πρώτη αναφορά στην χρήση τηλ/ων δορυφόρων σε γεωστατική τροχιά έγινε το 1945 από τον συγγραφέα Arthur C. Clarke, όπου υποστήριξε ότι ένας τηλ/ός δορυφόρος σε αυτήν την τροχιά μπορεί να βλέπει το 48% της επιφάνειας της Γης, που πρακτικά σημαίνει ότι τρεις τέτοιοι δορυφόροι μπορούν να παρέχουν παγκόσμια κάλυψη σε όλη την επιφάνεια της Γης. Το 2020 βρίσκονται περίπου 500 δορυφόροι σε γεωστατική τροχιά (Σχήμα 191).



**Σχήμα 191: Δορυφόροι σε γεωστατική τροχιά**

Τα τελευταία 5 χρόνια, η ραγδαία ανάπτυξη της μικροηλεκτρονικής, των μικρών δορυφόρων (μάζα < 500 kg) σε συνδυασμό με το ευρύ άνοιγμα της αγοράς διαστημικών φορέων/εκτοξευτών με την άφιξη ιδιωτών όπως ο Elon Musk (Space X), έχει φέρει στο προσκήνιο την χρήση μαζικά παραγόμενων μικροδορυφόρων και την τοποθέτησή τους σε σμήνη σε χαμηλές τροχιές LEO σε συνδυασμό ή σε αντικατάσταση δορυφόρων GEO για εφαρμογές παροχής ευρυζωνικού διαδικτύου. Το χαμηλότερο κόστος παραγωγής πολλών μικροδορυφόρων (μαζικά) και η εκτόξευσή τους κατά δεκάδες με χαμηλού κόστους εκτοξευτές, αποτελεί μία από τις κυριότερες τάσεις στην παγκόσμια αγορά των τηλεπικοινωνιών και της διαστημικής με τα προγράμματα SpaceLink της SpaceX και το OneWeb να βρίσκονται στο στάδιο της υλοποίησης και να υπόσχονται χαμηλού κόστους πρόσβαση στο διαδίκτυο μέσω διαστημικών μέσων με χαμηλή καθυστέρηση (latency) στην αναμετάδοση του σήματος συγκριτικά με τους δορυφόρους GEO.

Η χρήση τεχνητών (artificial) δορυφόρων σε διάφορες εφαρμογές παρουσιάζει αρκετά πλεονεκτήματα, τα σημαντικότερα από τα οποία είναι τα εξής (Maral & Bousquet, 2012):

- Χρήση ανεξαρτήτως απόστασης.
- Μοναδική λύση για δυσπρόσιτες περιοχές και περιοχές, όπου τα επίγεια δίκτυα αδυνατούν να παρέχουν επικοινωνία (π.χ. πλοία, αεροπλάνα).

- Παγκόσμια κάλυψη εκπομπής σημάτων ευρείας ζώνης συχνοτήτων.
- Παράκαμψη των επίγειων δικτύων.
- Παροχή κινητών υπηρεσιών συμπληρωματικά ως προς τα επίγεια.
- Ευκολία εγκατάστασης και αναδιάταξης.
- Διασύνδεση επίγειων δικτύων ανεξάρτητα από την τεχνολογία και τον τύπο του δικτύου.
- Λειτουργία ακόμη και σε περιόδους φυσικών καταστροφών.

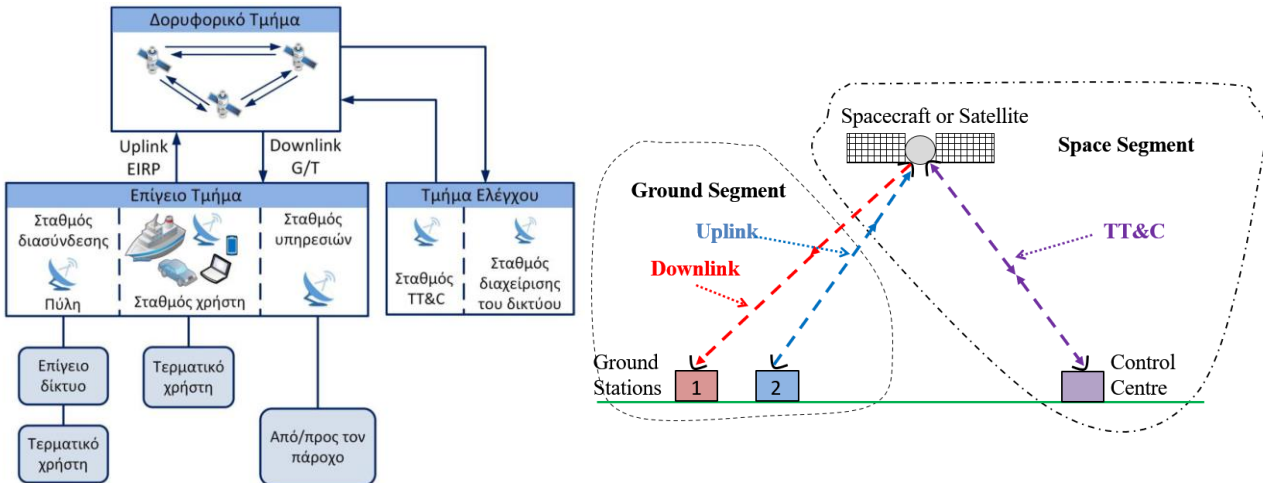
Αλλά και μειονεκτήματα:

- Καθυστέρηση μετάδοσης της τάξης των 240ms (για γεωστατικούς δορυφόρους).
- Εξασθένηση των σημάτων εξαιτίας της μεγάλης απόστασης και του μέσου διάδοσης.
- Αύξηση της τρωτότητας (vulnerability) στις δορυφορικές επικοινωνίες εξαιτίας της εκπομπής στον αέρα, με αποτέλεσμα να χρειάζονται μεγαλύτερες απαιτήσεις στην κρυπτογράφηση.
- Υψηλό κόστος τοποθέτησης και περιορισμένη διάρκεια ζωής σε αντιστοιχία με πιθανότητα αποτυχίας εκτόξευσης και επιτυχούς λειτουργίας.
- Συμφόρηση, η οποία συχνά παρατηρείται στη γεωστατική τροχιά και στις χρησιμοποιούμενες συχνότητες.

Η μεγάλη απόσταση μεταξύ του δορυφόρου και των τερματικών του χρήστη σε σύγκριση με τα επίγεια συστήματα προκαλεί μεγάλες καθυστερήσεις, που επηρεάζουν ειδικότερα τις επικοινωνίες φωνής και μεγάλες εξασθενίσεις του σήματος, απαιτώντας μεγάλη ισχύ μετάδοσης και διάμετρο κεραίας. Για τις περιπτώσεις όπου η απόσταση είναι κρίσιμος παράγοντας για την επικοινωνία, χρησιμοποιούνται μη γεωστατικοί δορυφόροι, οι οποίοι μειώνουν τις απαιτήσεις στην καθυστέρηση του σήματος και στο μέγεθος της κεραίας.

### 13.1 Σχεδιασμός και οργάνωση δορυφορικού συστήματος

Η δομή ενός δορυφορικού συστήματος αποτελείται από το διαστημικό και το επίγειο τμήμα. Οι λειτουργίες κατά τη διάρκεια σύνδεσής τους επιμερίζονται σε δύο ζεύξεις: στην άνω και την κάτω ζεύξη. Σήμερα οι δορυφόροι καλύπτουν ένα ευρύ πεδίο εφαρμογών, όπως π.χ. Δορυφορική Τηλεόραση, Δορυφορικό Internet και Δορυφορικό Τηλέφωνο, ενώ υπάρχουν διαθέσιμοι Μετεωρολογικοί Δορυφόροι, Δορυφόροι Στρατιωτικών Εφαρμογών, Δορυφόροι Διάσωσης, Δορυφόροι Εντοπισμού Θέσης και Πλοήγησης, Δορυφόροι Γήινης Παρατήρησης κ.ά. Για την εξυπηρέτηση του εκάστοτε σκοπού, ο δορυφόρος είναι εφοδιασμένος με τις κατάλληλες διατάξεις (κεραίες, αναμεταδότες, φωτογραφικές μηχανές, κάμερες παρακολούθησης), οι οποίες και τον διαφοροποιούν από τους άλλους δορυφόρους.



**Σχήμα 192: Οργάνωση συστήματος δορυφορικών επικοινωνιών [1-4]**

Το διαστημικό τμήμα αποτελείται από τον δορυφόρο, ενώ το τμήμα ελέγχου αποτελείται από τις επίγειες εγκαταστάσεις ελέγχου, τηλεμετρίας & ιχνηλάτησης του δορυφόρου (Tracking, Telemetry & Command, TT&C), καθώς και από το κέντρο διαχείρισης του δικτύου. Ο δορυφόρος αποτελείται από το ωφέλιμο φορτίο (payload), το οποίο περιλαμβάνει τις κεραίες, τον λοιπό ηλεκτρονικό εξοπλισμό μεταδόσεων και την πλατφόρμα (Platform or Bus). Η πλατφόρμα είναι μία μηχανική κατασκευή για την υποστήριξη του εξοπλισμού, που εγγυάται τη σταθερότητα και ευστάθεια του δορυφόρου, παρέχει την απαιτούμενη ηλεκτρική ενέργεια για την ισχύ και ρύθμιση της τάσης, πραγματοποιεί έλεγχο θερμοκρασίας με δυνατότητα απαγωγής θερμότητας, έλεγχο θέσης και σταθεροποίηση τροχιάς με μεγάλη ακρίβεια. Επίσης, διαθέτει τον εξοπλισμό πρόωσης, για να παρέχει αυξήσεις ταχύτητας και κατάλληλες ροπές με συγκεκριμένες ωθήσεις, όπως και τον εξοπλισμό παρακολούθησης της τηλεμετρίας και ελέγχου, όπου γίνεται ανταλλαγή δεδομένων με τον σταθμό ελέγχου.

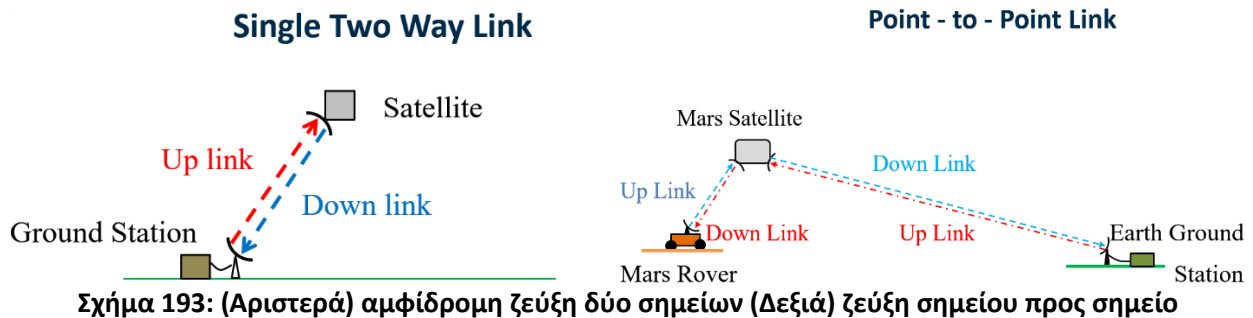
Το επίγειο τμήμα αποτελείται από τον επίγειο σταθμό, που περιλαμβάνει πομπούς και δέκτες. Οι επίγειοι σταθμοί είναι είτε σταθεροί είτε κινητοί. Οι σταθεροί επίγειοι σταθμοί περιλαμβάνουν σταθμούς δρομολόγησης της τηλεπικοινωνιακής κίνησης, η οποία συλλέγεται από επίγεια συστήματα και σταθμούς στις εγκαταστάσεις του χρήστη. Οι κινητοί σταθμοί περιλαμβάνουν σταθμούς σε ξηρά, θάλασσα και αέρα. Τα δορυφορικά συστήματα επικοινωνιών εμπλέκουν πολλούς επίγειους σταθμούς, οι οποίοι εκπέμπουν και ζητούν ταυτόχρονη πρόσβαση σε έναν δορυφόρο, χρησιμοποιώντας τεχνικές πολλαπλής πρόσβασης. Τα δορυφορικά συστήματα ευρείας μετάδοσης περιλαμβάνουν έναν επίγειο σταθμό, που εκπέμπει, και πολλαπλούς επίγειους σταθμούς, που είναι μόνο δέκτες (Receive Only, RCVO).

Οι λειτουργίες του ωφέλιμου φορτίου (payload) μπορούν να υλοποιηθούν είτε με απλό (διάφανο) αναμεταδότη είτε με αναμεταδότη επεξεργασίας επί του σκάφους (on-board processing). Η λειτουργία με απλό αναμεταδότη αφορά τη συλλογή μικροκυματικών σημάτων από συγκεκριμένες περιοχές της Γης, την ενίσχυση του φέροντος ραδιοσυχνότητας, τη μετατροπή της συχνότητας του φέροντος από τη συχνότητα της άνω ζεύξης στη συχνότητα της κάτω ζεύξης και την εκπομπή των μικροκυματικών σημάτων προς συγκεκριμένη περιοχή της Γης. Το συνολικό εύρος ζώνης του επαναλήπτη (repeater) χωρίζεται σε υπο-ζώνες, καθμία από τις οποίες έχει εύρος μέχρι μερικές δεκάδες MHz. Κάθε υπο-ζώνη συχνοτήτων ενισχύεται από έναν δορυφορικό δίαυλο. Ένας αναμεταδότης (transponder) μπορεί να υποστηρίξει πιο πολύπλοκες διεργασίες από την απλή αναμετάδοση με τη χρήση του αναμεταδότη επεξεργασίας επί του σκάφους, όπως π.χ. μεταγωγή (switching) στη συχνότητα και/ή στον χώρο και/ή



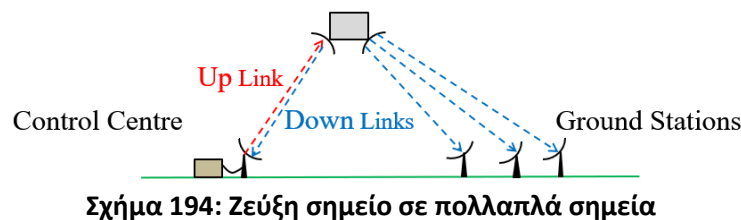
στον χρόνο, αναγέννηση (regeneration), ψηφιακής πληροφορίας στον δορυφόρο, και επεξεργασία βασικής ζώνης (baseband processing), όπως π.χ. bit rate conversion, error correcting decoding κ.λπ.

Στο σχήμα 193 παρουσιάζεται η βασική δομή συστήματος διαστημικών επικοινωνιών. Άλλοι τύποι είναι: i) αμφίδρομη ζεύξη δύο σημείων ii) ζεύξη σημείου προς σημείο



Η αμφίδρομη ζεύξη δύο σημείων μεταξύ δορυφόρου και σταθμού εδάφους είναι η απλούστερη μορφή ζεύξης. Η ζεύξη σημείου προς σημείο επιτρέπει την εκπομπή δεδομένων σε πολλαπλούς σταθμούς εδάφους και επιτρέπει να στέλνουμε εντολές η δεδομένα επίσης από πολλαπλούς σταθμούς η σημεία από διαφορετικά σημεία (π.χ. πλανήτες ή από δορυφόρο και σταθμό εδάφους). Παραδείγματα ζεύξης σημείου προς σημείο (Point-to-Point Communications): 1) Γεωστατικοί δορυφόροι - αναμετάδοση τηλεόρασης και αναμετάδοση δεδομένων και τηλεφωνίας 2) Αποστολή Cassini – Huygens στον Κρόνο - Ο ατμοσφαιρικός βολιστήρας Huygens θα αποδεσμεύονταν από το διαστημόπλοιο Cassini και θα προσγειωνόταν στην επιφάνεια του Τιτάνα με αλεξίπτωτο. Όλα τα δεδομένα από την προσγείωση θα αναμεταδίδονταν στο διαστημόπλοιο Cassini, καθώς η επιβίωση του Huygens δεν ήταν σίγουρη. 3) Αποστολές στον Άρη με ρομπότ (rover).

### Point to Multi Point Links



Ένας τρίτος τύπος δορυφορικής ζεύξης είναι αυτή από ένα σημείο σε πολλαπλά σημεία, δημιουργώντας ένα δίκτυο, όπως φαίνεται στο σχήμα 194.

## 13.2 Υπηρεσίες και εφαρμογές δορυφορικών επικοινωνιών

Ο επίσημος ορισμός των γενικών υπηρεσιών ραδιοεπικοινωνιών (Radio-communication Services) είναι η εκπομπή και/ή λήψη ραδιοκυμάτων για συγκεκριμένους τηλεπικοινωνιακούς σκοπούς. Μέρος της κατηγορίας των υπηρεσιών ραδιοεπικοινωνιών αποτελούν οι δορυφορικές ραδιοεπικοινωνίες (Space Radiocommunication Services). κατηγορίες για τις Δορυφορικές Ραδιοεπικοινωνίες:

- Σταθερή Δορυφορική Υπηρεσία (Fixed Satellite Service, FSS): υπηρεσία ραδιοεπικοινωνίας μεταξύ επίγειων σταθμών σε δεδομένες θέσεις, όταν χρησιμοποιούνται ένας ή περισσότεροι δορυφόροι. Η δεδομένη θέση μπορεί να είναι ένα καθορισμένο σταθερό σημείο ή οποιοδήποτε σταθερό σημείο εντός των συγκεκριμένων περιοχών. Σε ορισμένες περιπτώσεις, η υπηρεσία αυτή περιλαμβάνει ζεύξεις δορυφόρου με δορυφόρο, οι οποίες μπορούν, επίσης, να λειτουργούν με δια-δορυφορική υπηρεσία. Η σταθερή δορυφορική υπηρεσία μπορεί ακόμη να περιλαμβάνει ζεύξεις τροφοδοσίας για άλλες υπηρεσίες δορυφορικών ραδιοεπικοινωνιών.
- Δορυφορική Υπηρεσία Ευρυεκπομπής (Broadcasting Satellite Service, BSS): υπηρεσία ραδιοεπικοινωνίας, στην οποία τα σήματα, που μεταδίδονται ή αναμεταδίδονται από διαστημικούς σταθμούς, προορίζονται για άμεση λήψη από το ευρύ κοινό. Στις δορυφορικές υπηρεσίες ευρυεκπομπών ο όρος «άμεση λήψη» περιλαμβάνει τόσο την ατομική λήψη όσο και τη λήψη ευρείας κοινότητας.
- Κινητή Δορυφορική Υπηρεσία (Mobile Satellite Service, MSS): Υπηρεσία μεταξύ κινητών επίγειων σταθμών και ενός ή περισσότερων διαστημικών σταθμών ή μεταξύ διαστημικών σταθμών και μεταξύ κινητών επίγειων σταθμών μέσω ενός ή περισσότερων διαστημικών σταθμών. Η υπηρεσία αυτή μπορεί να περιλαμβάνει για τη λειτουργία της και ζεύξεις τροφοδοσίας.
  - Αεροναυτική Κινητή Δορυφορική Υπηρεσία (Aeronautical Mobile Satellite Service, AMSS): κινητή υπηρεσία μεταξύ αεροναυτικών σταθμών και σταθμών αεροσκάφους ή μεταξύ σταθμών αεροσκάφους, στην οποία μπορεί να συμμετάσχουν και σταθμοί σωστικών σκαφών. Μπορούν, επίσης, να συμμετέχουν σε αυτή την υπηρεσία σταθμοί ένδειξης θέσης ραδιοφάρων (radiobeacon) για περιστατικά έκτακτης ανάγκης σε καθορισμένες συχνότητες κινδύνου και επείγουσας ανάγκης.
  - Ναυτική Κινητή Δορυφορική Υπηρεσία (Maritime Mobile Satellite Service, MMSS): κινητή δορυφορική υπηρεσία, στην οποία οι κινητοί επίγειοι σταθμοί βρίσκονται επί των πλοίων. Μπορούν, επίσης, να συμμετέχουν σε αυτή την υπηρεσία σταθμοί σωστικών σκαφών και σταθμοί ένδειξης θέσης ραδιοφάρων για περιστατικά έκτακτης ανάγκης.
  - Κινητή Υπηρεσία Ξηράς (Land Mobile Satellite Service, LMSS): κινητή δορυφορική υπηρεσία, στην οποία οι επίγειοι σταθμοί βρίσκονται στην ξηρά.
- Δορυφορική Υπηρεσία για Ερασιτέχνες (Amateur Satellite Service, AmSS): υπηρεσία ραδιοεπικοινωνίας, που χρησιμοποιεί τους διαστημικούς σταθμούς σε δορυφόρους της Γης για τους ίδιους μη κερδοσκοπικούς λόγους, όπως η υπηρεσία ραδιοερασιτεχνών (εκπαίδευση, επικοινωνία, έρευνα).
- Δορυφορική Υπηρεσία Ραδιοεντοπισμού (Radio Determination Satellite Service, RDSS): υπηρεσία ραδιοεπικοινωνίας για τον σκοπό του ραδιοεντοπισμού της θέσης, της ταχύτητας και άλλων χαρακτηριστικών ενός αντικειμένου, μέσω των ιδιοτήτων του μέσου διάδοσης. Περιλαμβάνει τη χρήση ενός ή περισσότερων δορυφορικών σταθμών και μπορεί, επίσης, να περιλαμβάνει ζεύξεις τροφοδοσίας, οι οποίες είναι απαραίτητες για τη λειτουργία της.
  - Δορυφορική Υπηρεσία Ραδιοεντοπισμού (Radiolocation Satellite Service): υπηρεσία ραδιοεντοπισμού μέσω δορυφόρου, που χρησιμοποιείται για τους σκοπούς του ραδιοεντοπισμού, εκτός της ραδιοπλοήγησης. Αυτή η υπηρεσία μπορεί, επίσης να περιλαμβάνει και ζεύξεις τροφοδοσίας, που είναι απαραίτητες για τη λειτουργία της.
  - Δορυφορική Υπηρεσία Ραδιοπλοήγησης (Radio Navigation Satellite Service, RNSS): υπηρεσία ραδιοεντοπισμού μέσω δορυφόρου, που χρησιμοποιείται για τους σκοπούς της ραδιοπλοήγησης, συμπεριλαμβανομένης της προειδοποίησης εμποδίων. Αυτή η υπηρεσία μπορεί, επίσης, να περιλαμβάνει και ζεύξεις τροφοδοσίας, που είναι απαραίτητες για τη λειτουργία της.

- Ναυτική Δορυφορική Υπηρεσία Ραδιοπλοήγησης (Maritime Radio Navigation Satellite Service, MRNSS): υπηρεσία ραδιοεντοπισμού μέσω δορυφόρου, όπου οι επίγειοι σταθμοί βρίσκονται επί των πλοίων.
- Αεροναυτική Δορυφορική Υπηρεσία Ραδιοπλοήγησης (Aeronautical Radio Navigation Satellite Service, AeRNSS): υπηρεσία ραδιοεντοπισμού μέσω δορυφόρου, όπου οι επίγειοι σταθμοί βρίσκονται επί των αεροσκαφών.
- Δορυφορική Υπηρεσία Πρότυπων Σημάτων Χρόνου και Συχνότητας (Standard Frequency & Time signal Satellite Service, SFSS): υπηρεσία ραδιοεπικοινωνίας, που χρησιμοποιεί τους διαστημικούς σταθμούς σε δορυφόρους της Γης για τους ίδιους σκοπούς, όπως η βασική υπηρεσία σημάτων συχνότητας και χρόνου. Αυτή η υπηρεσία μπορεί, επίσης, να περιλαμβάνει και ζεύξεις τροφοδοσίας, που είναι απαραίτητες για τη λειτουργία της.
- Δια-Δορυφορική Υπηρεσία (Inter-Satellite Service, ISS): υπηρεσία ραδιοεπικοινωνίας, που παρέχει ζεύξεις μεταξύ των τεχνητών δορυφόρων.
- Δορυφορική Υπηρεσία Εξερεύνησης της Γης (Earth Exploration Satellite Service, EESS): υπηρεσία ραδιοεπικοινωνίας μεταξύ επίγειων σταθμών και ενός ή περισσότερων διαστημικών σταθμών, η οποία μπορεί να συμπεριλάβει ζεύξεις μεταξύ διαστημικών σταθμών κατά την οποία: α) συλλέγονται πληροφορίες σχετικά με τα χαρακτηριστικά της Γης και τα φυσικά φαινόμενα, συμπεριλαμβανομένων των δεδομένων σχετικά με την κατάσταση του περιβάλλοντος, από ενεργούς ή παθητικούς αισθητήρες σε δορυφόρους της Γης, β) συλλέγονται παρόμοιες πληροφορίες από αερομεταφερόμενες πλατφόρμες ή πλατφόρμες εδάφους, γ) οι πληροφορίες αυτές μπορούν να διανεμηθούν στους επίγειους σταθμούς εντός του συγκεκριμένου συστήματος, και δ) μπορεί να συμπεριληφθεί πλατφόρμα εξακρίβωσης των στοιχείων. Αυτή η υπηρεσία μπορεί, επίσης, να περιλαμβάνει και ζεύξεις τροφοδοσίας, που είναι απαραίτητες για τη λειτουργία της.
  - Μετεωρολογική Δορυφορική Υπηρεσία (Meteorological Satellite Service, MetS): δορυφορική υπηρεσία επίγειας εξερεύνησης για μετεωρολογικούς σκοπούς.
- Υπηρεσία Έρευνας Διαστήματος (Space Research Service, SRS): υπηρεσία ραδιοεπικοινωνίας, στην οποία χρησιμοποιούνται για σκοπούς επιστημονικής ή τεχνολογικής έρευνας διαστημικά σκάφη ή άλλα αντικείμενα στο διάστημα.
- Υπηρεσία Λειτουργίας Διαστήματος (Space Operation Service, SpO): υπηρεσία ραδιοεπικοινωνίας, που αφορά αποκλειστικά τη λειτουργία των διαστημικών σκαφών και συγκεκριμένα την ιχνηλάτηση, την τηλεμετρία και τον τηλεχειρισμό στο διάστημα. Αυτές οι λειτουργίες θα πρέπει κανονικά να παρέχονται εντός της υπηρεσίας, στην οποία λειτουργεί ο διαστημικός σταθμός.

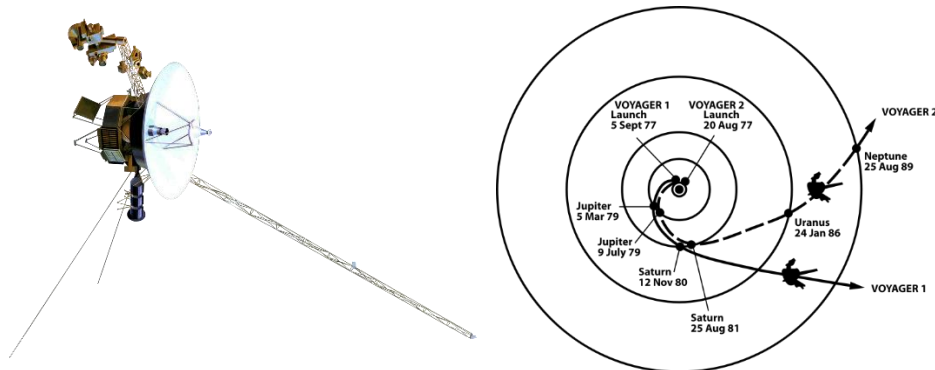
### 13.3 Προϋπολογισμός Δορυφορικής Ζεύξης (Satellite Link budget)

Για να μπορέσουμε να σχεδιάσουμε μία δορυφορική ζεύξη η οποία θα διασφαλίσει ότι θα εκπέμψουμε και θα λάβουμε κάποιο σήμα ή δεδομένα από ένα δορυφόρο ή σταθμό εδάφους, είναι απαραίτητο να ορίσουμε κάποια κρίσιμα μεγέθη:

- Σήματα εισόδου (Inputs signals): Ψηφιακά ή αναλογικά σήματα που μετατρέπονται σε ψηφιακά
- Σφάλμα κωδικοποίησης (Error encoding)
- Διαμόρφωση σήματος (modulation): Μέθοδοι που επιτρέπουν να διαμορφώσουμε το σήμα σε κατάλληλη μορφή (φέρον σήμα – carrier)
- Πολυπλεξία συχνότητας (Multiplexing): είναι η τεχνική, που επιτρέπει δεδομένα από πολλές πηγές να μεταδίδονται μέσα από την ίδια γραμμή επικοινωνίας.

- πολλαπλής πρόσβασης (Multiple Access): Παροχή πολλαπλής πρόσβασης στο δορυφορικό κανάλι
- Κεραία (Antenna): την χρησιμοποιούμε να στέλνουμε και να λαμβάνουμε ραδιοσήματα
- Εξασθένιση σήματος (Signal Attenuation): Εξασθένιση σήματος στην ζεύξη
- Αποπολυπλέκτες (De-multiplexing): αντίθετο της πολυπλεξίας
- Αποδιαμόρφωση (De-modulation): είναι η αντίστροφη διαδικασία της διαμόρφωσης. Ανάκτηση εξαγωγή αρχικού σήματος πληροφορίας από το λαμβανόμενο διαμορφωμένο σήμα στον δέκτη.
- Αποκωδικοποίηση και Διόρθωση σφάλματος (De-coding and Error Correction),
- Ανάκτηση σήματος με διορθωμένα σφάλματα
- Σήμα εξόδου (Output Signals): Καθυστερημένο αντίγραφο του εισαγόμενου σήματος

Στην ενότητα αυτή θα δούμε ένα απλό και αντιπροσωπευτικό παράδειγμα προϋπολογισμού δορυφορικής ζεύξης χρησιμοποιώντας την αποστολή Voyager 1 ως παράδειγμα.



**Σχήμα 195: Αποστολή Voyager 1**

Ο Voyager 1 εκτοξεύτηκε το 1977 και έχει ξεπεράσει τα  $21 \times 10^9$  km απόστασης από την Γη και πλέον είναι στο διαστρικό διάστημα και χρησιμοποιεί μία θερμοηλεκτρική γεννήτρια (RTG) η οποία κατά την διάρκεια της πτήσης του στο άκρο του Ηλιακού μας συστήματος το 2015 παρήγαγε ισχύ 254.6 W με περιθώριο 22.8 W και ρυθμό απόσβεσης/μείωσης 4.2 W ανά έτος. Για οικονομία ενέργειας, πολλά όργανα του διαστημοπλοίου χρησιμοποιούνται για πολύ μικρές περιόδους/χρόνο. Τα δεδομένα της αποστολής λαμβάνονται από τούς σταθμούς εδάφους 'Deep Space Network – DSN' στο Goldstone, California USA (κεραίες διαμέτρου 70 m και 35 m), Madrid Spain (κεραίες διαμέτρου 70 m και 35 m), Canberra, Australia (κεραίες διαμέτρου 70 m και 35 m). Η κεραία του δορυφόρου έχει διάμετρο 3.7 m και η συχνότητα της ζεύξης του συστήματος τηλεμετρίας, ιχνηλάτησης και εντολών (TT&C) για την άνω ζεύξη (uplink) είναι S band με ρυθμό μετάδοσης 16 bit/s. Η κάτω ζεύξη (downlink) είναι X band με ρυθμό μετάδοσης 160 bit/s συνολικά. Η ισχύς της κάτω ζεύξης είναι 20 W.

Για την κάτω ζεύξη, η συχνότητα είναι X-band (8-12 GHz) με ρυθμό μετάδοσης 160 bit/s στα 20 W. Εφόσον η συχνότητα είναι 8.4 GHz μπορούμε να υπολογίσουμε:

$$\text{Μήκος κύματος (wavelength), } \lambda = \frac{3 \times 10^8}{8.4 \times 10^9} = 0.0357 \text{ m}$$

$$\text{Κέρδος κεραίας (antenna gain), } G = \eta \left( \frac{4 \pi A}{\lambda^2} \right)$$

Όπου,

$\eta$  είναι ο συντελεστής απόδοσης της κεραίας

$A$  είναι το εμβαδό της κεραίας

$G = 10 \log N$ , αν χρησιμοποιούμε μονάδες dB (όπου  $N$  η ισχύς/απολαβή)

Το κέρδος της κεραίας του Voyager 1  $G_V$  είναι:

$$\text{Διάμετρος } 3.7\text{m}, \quad \text{Area } A_V = \pi R^2 = 10.75 \text{ m}^2$$

$$A_V \eta = 0.65, \quad G_V = 0.65 \left( \frac{4\pi A_V}{0.0357^2} \right) = 68,896 \text{ or } 48.4 \text{ dB}$$

Το κέρδος της κεραίας του σταθμού εδάφους  $G_{\text{DSN}}$  είναι:

$$70\text{m DSN dish } A_{70} = \pi \times 35^2 = 3848 \text{ m}^2$$

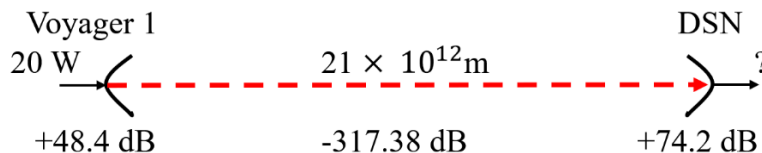
$$A_{70} \eta = 0.7, \quad G_{\text{DSN}} = 0.7 \left( \frac{4\pi A_{\text{DSN}}}{0.0357^2} \right) = 26,562,000 \text{ or } 74.2 \text{ dB}$$

Εξασθένηση ελεύθερου χώρου (*Free Space Loss*), εξασθένηση/απώλεια μεταξύ κεραίας διαστημοπλοίου και σταθμού εδάφους DSN:

$$\text{FSL} = \left( \frac{4\pi R}{\lambda} \right)^2 = \left( \frac{4\pi \cdot 21 \times 10^{12}}{0.0357} \right)^2 = 54.64 \times 10^{30} \text{ ή } 317.38 \text{ dB}$$

όπου  $R$  είναι η απόσταση μεταξύ κεραιών  $R = 21 \times 10^{12} \text{m}$

Υπενθυμίζουμε ότι μελετάμε τον προϋπολογισμό της ζεύξης (απώλειες, ισχύς των κεραιών), που συνοπτικά παρουσιάζεται στο παρακάτω σχήμα με τα δεδομένα που έχουμε μέχρι τώρα:



Συνολικά έχουμε:  $+48.4 - 317.38 + 74.2 = -194.8 \text{ dB}$  ή  $3.33 \times 10^{-20} \text{ W}$

Με μετατροπή<sup>8</sup> σε dB έχουμε:  $P_{\text{DSN}} (\text{dB}) = 20 \times 3.33 \times 10^{-20} = 66.6 \times 10^{-20} \text{ W}$

Η ισχύς σήμερα που λαμβάνουμε είναι λιγότερο από  $40 \times 10^{-20} \text{ W}$  λόγω της αυξημένης απόστασης που έχει διανύσει ο Voyager 1.

<sup>8</sup> <http://kioan.users.uth.gr/wireless/decibels.html>

# Κεφάλαιο 14

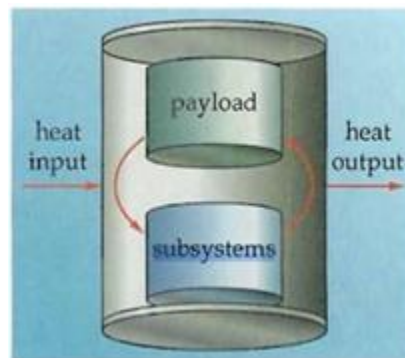
## Υποσύστημα Θερμικής Προστασίας

### Υποσύστημα Θερμικού Ελέγχου (ΥΘΕ)

Όπως γνωρίζουμε, το διάστημα είναι ένα μη φιλικό μέρος για να ζεις και να δουλεύεις- τόσο για ανθρώπους όσο και για μηχανές. Για να επιβιώσει το διαστημικό σκάφος, χρειαζόμαστε κάποιον τρόπο για να διατηρήσουμε το ωφέλιμο φορτίο και όλα τα υποσυστήματα επί του σκάφους (συμπεριλαμβανομένου του πληρώματος σε επανδρωμένες πτήσεις) υγιή και χαρούμενα. Η παροχή ενός βιώσιμου περιβάλλοντος στη «σκληρότητα» του διαστήματος είναι ο σκοπός του υποσυστήματος περιβαλλοντικού ελέγχου και υποστήριξης της ζωής (ECLSS). Μπορούμε να χωρίσουμε τα καθήκοντα του ECLSS εννοιολογικά σε δύο προβλήματα - θερμικό έλεγχο και υποστήριξη ζωής. Σε αυτήν την ενότητα, θα επικεντρωθούμε κυρίως στο πρόβλημα θερμικού ελέγχου, το κύριο μέλημα για τα μη επανδρωμένα διαστημόπλοια. Στη συνέχεια, θα παρουσιάσουμε μερικές από τις επιπρόσθετες επιπλοκές που προκαλούνται από την τοποθέτηση ευάλωτων ανθρώπων επί του σκάφους.

### Επισκόπηση Συστήματος

Ένα διαστημικό σκάφος, σε τροχιά στο διάστημα, είναι ίσως το απόλυτο παράδειγμα ενός απομονωμένου συστήματος. Μπορούμε πολύ εύκολα να αναλύσουμε όλα όσα εισέρχονται και εξέρχονται σε αυτό. Ένα από αυτά τα πράγματα είναι η θερμότητα. Εάν περισσότερη θερμότητα πηγαίνει σε ένα διαστημικό σκάφος, ή παράγεται εσωτερικά, από ότι εκπέμπει, τότε η θερμοκρασία του αυξάνεται. Εάν φύγει περισσότερη θερμότητα από ότι μπαίνει, αρχίζει να κρυώνει. Επειδή ο ευαίσθητος εξοπλισμός και το ωφέλιμο φορτίο (συμπεριλαμβανομένων των ανθρώπων) δεν μπορούν να επιβιώσουν σε μεγάλες μεταβολές θερμοκρασίας, πρέπει να εξισορροπήσουμε την εισερχόμενη ροή θερμότητας, καθώς και τη θερμότητα που παράγεται εσωτερικά, με τη ροή θερμότητας. Θα προτιμούσαμε η μέση θερμοκρασία του διαστημικού σκάφους να παραμείνει σχεδόν σταθερή, μια κατάσταση που ονομάζουμε θερμική ισορροπία.



Σχήμα 196: Θερμικός Έλεγχος είναι η ισορροπία θερμότητας εισόδου, της θερμότητας που παράγεται μέσα στον δορυφόρο και στην θερμότητα εξόδου (εκπομπή)

Η κύρια δουλειά του υποσυστήματος θερμικού ελέγχου είναι να ρυθμίζει και να ελέγχει την ποσότητα θερμότητας που εισέρχεται, εξέρχεται και κινείται γύρω από ένα διαστημικό σκάφος. Όπως και ο φούρνος και το κλιματιστικό στα σπίτια μας, το υποσύστημα θερμικού ελέγχου ρυθμίζει και μετριάζει τη θερμοκρασία του διαστημικού σκάφους. Για να διατηρηθεί η θερμική ισορροπία, το ECLSS πρέπει να εξισορροπεί τις εισόδους/εισροές και τις εξόδους/εκροές, καθώς και τις εσωτερικές πηγές θερμότητας. Αυτό σημαίνει ότι η θερμότητα που εισέρχεται συν τη θερμότητα που παράγεται εσωτερικά πρέπει να ισούται με τη συνολική θερμότητα που εκπέμπεται.

Εξερχόμενη θερμότητα = Εισερχόμενη θερμότητα + Εσωτερική θερμότητα (για θερμική ισορροπία)

Το Σχήμα 197 δείχνει τις εισόδους και τις εξόδους ενός θερμικού ελέγχου, καθώς και της ροής θερμότητας μεταξύ ωφέλιμων φορτίων και υποσυστημάτων.

### 14.1 Αρχές θερμικού ελέγχου

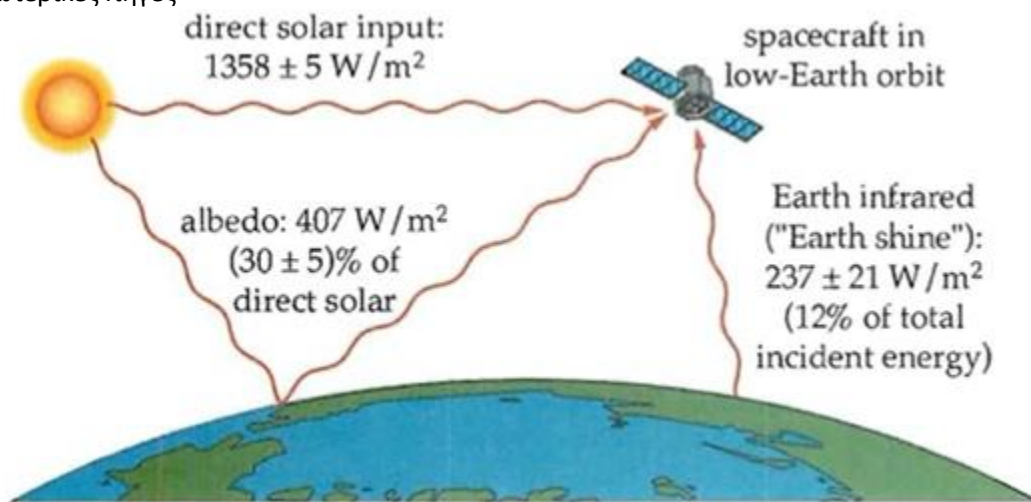
Αργότερα θα δούμε ποιες τεχνικές χρησιμοποιεί το υποσύστημα θερμικού ελέγχου για τον έλεγχο αυτής της ροής θερμότητας. Αλλά πρώτα, θα εξετάσουμε μερικές εσωτερικές και εξωτερικές πηγές θερμότητας για τα διαστημόπλοια. Μετά από αυτό, η περαιτέρω συζήτηση των μεθόδων θερμικού ελέγχου απαιτεί κατανόηση της βασικής θερμοδυναμικής, οπότε θα εξετάσουμε μερικές από τις αρχές της μεταφοράς θερμότητας.

#### Πηγές θερμότητας στο διάστημα

Συνήθως, το μεγαλύτερο πρόβλημα για τον θερμικό έλεγχο διαστημικών σκαφών είναι η αφαίρεση της θερμότητας. Ως επί το πλείστον, πρέπει να διατηρήσουμε τις θερμοκρασίες μέσα σε ακόμη και μη επανδρωμένα διαστημόπλοια σε κανονική θερμοκρασία δωματίου (20 °C ή περίπου 70 F). Σε ορισμένες περιπτώσεις, συγκεκριμένα ωφέλιμα φορτία μπορεί να έχουν πιο απαιτητικές προδιαγραφές. Οι αισθητήρες υπερύθρων, για παράδειγμα, απαιτούν ψυκτικές μονάδες για υπερψύξη στους 70 K (-193 °C ή -316 F).

Όπως δείχνει το Σχήμα 197, η θερμότητα στο διάστημα προέρχεται από τρεις κύριες πηγές:

- Τον Ήλιο
- Τη Γη
- Τις εσωτερικές πηγές



Σχήμα 197: Πηγές θερμότητας στο διάστημα

Κοντά στη Γη, η μεγαλύτερη πηγή θερμότητας για το διαστημικό σκάφος σε τροχιά είναι ο Ήλιος - περίπου  $1358 \text{ W/m}^2$ . Όλοι ξέρουμε πόσο ζεσταινόμαστε όταν στεκόμαστε στον Ήλιο μια καλοκαιρινή μέρα. Για έναν δορυφόρο στο διάστημα, η θερμότητα του Ήλιου είναι πολύ πιο έντονη επειδή δεν υπάρχει ατμόσφαιρα για να απορροφήσει την ακτινοβολούμενη ενέργεια και να μετριάσει τη θερμοκρασία. Στην πλευρά που βλέπει στον Ήλιο, η επιφάνεια ενός διαστημικού σκάφους μπορεί να φτάσει πολλές εκατοντάδες βαθμούς Κέλβιν. Στην πλευρά μακριά από τον Ήλιο, η θερμοκρασία μπορεί να βυθιστεί σε μερικούς βαθμούς Kelvin.

Ποια είναι λοιπόν η θερμοκρασία στο διάστημα; Η Γη είναι περίπου στους 300 K, ενώ οι θερμοκρασίες στο διάστημα κυμαίνονται από 900 - 1300 K. Ακούγεται ζεστό, αλλά είναι; Στη Γη μετράμε τη θερμοκρασία χρησιμοποιώντας ένα θερμόμετρο. Το υγρό στο θερμόμετρο διαστέλλεται όταν θερμαίνεται εξαιτίας των μορίων του αέρα. Η θερμοκρασία είναι ανάλογη με την ταχύτητα και τον αριθμό των μορίων.

Στο διάστημα, τα μόρια ταξιδεύουν γρηγορότερα, αλλά δεν υπάρχουν πάρα πολλά από αυτά. Έτσι, ενώ η θερμοκρασία εμφανίζεται υψηλότερη στο διάστημα, η επίδραση στους ανθρώπους και τα υλικά είναι πολύ μικρότερη από την αντίστοιχη θερμοκρασία στη Γη.

Για δορυφόρους σε χαμηλής γήινη τροχιά, η Γη είναι επίσης μια σημαντική πηγή θερμότητας λόγω δύο αιτιών. Η Γη ανακλά μέρος από το φως του ήλιου - ονομάζεται ανακλαστικότητα γης. Αντιπροσωπεύει έως και  $407 \text{ W/m}^2$ , ή 30% της άμεσης ηλιακής ενέργειας σε ένα διαστημικό σκάφος. Μια άλλη σημαντική πηγή είναι η "Γη που λάμπει" ή η υπέρυθη ενέργεια που εκπέμπει η Γη άμεσα, ως αποτέλεσμα της θερμοκρασίας της. Αυτό αντιπροσωπεύει άλλα  $237 \text{ W/m}^2$  ή περίπου το 12% της προσπίπτουσας ενέργειας σε ένα διαστημικό σκάφος.

Οι εσωτερικές πηγές προσθέτουν επίσης θερμότητα. Ηλεκτρικά εξαρτήματα που λειτουργούν επί του σκάφους και πηγές ισχύος, όπως θερμοηλεκτρικές γεννήτριες ραδιοϊσοτόπων (RTGs) παράγουν θερμότητα. Εάν έχετε τοποθετήσει ποτέ το χέρι σας στην κορυφή της τηλεόρασης σας, αφού έχει μείνει αναμμένη για ώρα, ξέρετε ότι μπορεί να ζεσταθεί. Στο σαλόνι σας, η θερμότητα από την τηλεόραση κατανέμεται γρήγορα σε όλο το δωμάτιο λόγω των μικρών ρευμάτων αέρα. Διαφορετικά, η τηλεόρασή σας θα υπερθερμανθεί και θα υποστεί ζημιά. Δυστυχώς, δεν είναι τόσο εύκολο να διατηρηθούν ισορροπημένες οι θερμοκρασίες των διαστημικών σκαφών. Θα δούμε ποιες μεθόδους είναι διαθέσιμες για τη μεταφορά της θερμότητας, στη συνέχεια.

## Μεταφορά Θερμότητας

Θυμηθείτε από το Κεφάλαιο 3 ότι η θερμότητα μεταφέρεται από το ένα σημείο στο άλλο με

- Αγωγιμότητα (conduction)
- Συναγωγή (Convection)
- Ακτινοβολία (radiation)

Ας ξεκινήσουμε με την αγωγιμότητα. Εάν κρατάτε το ένα άκρο μιας μακράς μεταλλικής ράβδου και βάλετε το άλλο άκρο σε φωτιά, όπως στο Σχήμα 198, τι συμβαίνει; Καίγεσαι! Η θερμότητα από τη φωτιά ρέει κατά κάποιο τρόπο ακριβώς κατά μήκος της μεταλλικής ράβδου.





**Σχήμα 198: Αγωγιμότητα (conduction)**

Όταν η θερμότητα ρέει από το ζεστό στο κρύο μέσω ενός φυσικού μέσου (στην περίπτωση αυτή η ράβδος), το ονομάζουμε αγωγιμότητα, και το βιώνουμε κάθε μέρα. Είναι ο λόγος που βάζουμε μόνωση στους τοίχους του σπιτιού μας για να αποτρέψουμε τη θερμότητα από το εσωτερικό να διεξάγεται έξω (και αντίστροφα κατά το καλοκαίρι). Μπορούμε να περιγράψουμε το ποσό της μεταφοράς θερμότητας λόγω αγωγιμότητας χρησιμοποιώντας το νόμο Fourier (που αναπτύχθηκε από τον J. B. J. Fourier, 1768 – 1830)].

$$q = -kA \frac{\Delta T}{\Delta X}$$

όπου

$q$  = θερμική ενέργεια ανά μονάδα χρόνου (W)

$k$  = θερμική αγωγιμότητα του υλικού (W / Km)

$A$  = εμβαδόν διατομής του υλικού  $m^2$

$\Delta T$  = διαφορά θερμοκρασίας μεταξύ των δύο πλευρών του υλικού (K)

$\Delta X$  = απόσταση μεταξύ "καυτών" και "ψυχρών" σημείων στο υλικό (m)

Όπως με τη ροή ηλεκτρονίων που συζητήθηκε στην τελευταία ενότητα, αυτή η σχέση υποδεικνύει ότι η θερμότητα θα ρέει γρηγορότερα εάν το υλικό είναι καλός αγωγός της θερμότητας (υψηλό  $k$ ), όπως το μέταλλο και όχι το ξύλο. Θα ρέει επίσης γρηγορότερα εάν μεγαλύτερο εμβαδό είναι διαθέσιμο, εάν η διαφορά θερμοκρασίας είναι μεγαλύτερη, ή εάν η απόσταση  $\Delta X$  είναι μικρότερη. Χρησιμοποιούμε αυτήν την αρχή για να μονώσουμε τους τοίχους στα σπίτια μας, Βάζοντας παχιά τοιχώματα (μεγάλο  $\Delta X$ ) και γεμίζοντας τα με κακούς αγωγούς θερμότητας (μονωτές) που έχουν χαμηλό  $k$ .

Η δεύτερη μέθοδος μεταφοράς θερμότητας είναι η συναγωγή. Εάν έχετε ποτέ βρασμένο νερό, έχετε χρησιμοποιήσει τη συναγωγή. Ας δούμε πώς βράζει το νερό σε μια κατσαρόλα στο μάτι της κουζίνας, όπως φαίνεται στο Σχήμα 199.



**Σχήμα 199: Αγωγιμότητα (convection)**

Το νερό στο κάτω μέρος της κατσαρόλας, πλησιέστερα στην πηγή θερμότητας, ζεσταίνεται πρώτα, μέσω αγωγιμότητας, απευθείας από την πηγή θερμότητας. Καθώς το νερό ζεσταίνεται, επεκτείνεται ελαφρώς, και το νερό στο κάτω μέρος γίνεται λίγο λιγότερο πυκνό από το νερό στο πάνω. Ταυτόχρονα, η βαρύτητα τραβά το βαρύτερο υλικό στο κάτω μέρος του δοχείου. Έτσι, το ψυχρότερο και πυκνότερο νερό στην κορυφή του δοχείου αντικαθιστά το θερμότερο, λιγότερο πυκνό νερό στο κάτω μέρος. Μόλις βυθιστεί, αυτό το ψυχρότερο νερό θερμαίνεται, διαστέλλεται και ανεβαίνει. Ένα ρεύμα συναγωγής συνεχίζεται καθώς το νερό ρέει προς από την πηγή θερμότητας, που οδηγείται από τη δύναμη της βαρύτητας, έως ότου φτάσει στη θερμική ισορροπία (θερμότητα απομακρύνεται με τον ίδιο ρυθμό που προσφέρεται). Σε αντίθεση με την αγωγιμότητα, η οποία βασίζεται στη ροή θερμότητας μέσω ενός στερεού μέσου, η συναγωγή μεταφέρει θερμότητα σε ένα ρευστό μέσο που ρέει προς από μια πηγή θερμότητας. Προφανώς, εφόσον το υγρό ρέει, κάτι το κάνει να ρέει. Η συναγωγή βασίζεται στη βαρύτητα, ή σε κάποια άλλη δύναμη, για να ωθήσει το υγρό πέρα από την πηγή θερμότητας.

Στο ελεύθερο περιβάλλον του διαστήματος, δεν υπάρχουν δυνάμεις που να προκαλούν το κρύο νερό να αντικαταστήσει το θερμότερο νερό (όλα κάνουν ελεύθερη πτώση μαζί). Για να λειτουργεί η συναγωγή στο διάστημα, πρέπει να παρέχουμε τη δύναμη για την κίνηση του υγρού. Για παράδειγμα, τα ρωσικά διαστημικά σκάφη βασίστηκαν εδώ και πολύ καιρό στην αναγκαστική συναγωγή για την ψύξη των ηλεκτρονικών. Τα στοιχεία βρίσκονται σε ένα μεγάλο δοχείο πίεσης γεμάτο με άζωτο σε πίεση περίπου 1 bar (14.7 p.s.i.). Χρησιμοποιούν προπέλες για την κυκλοφορία του αζώτου γύρω από το δοχείο για τη ψύξη των ηλεκτρονικών.

Η τελική μέθοδος μεταφοράς θερμότητας είναι η ακτινοβολία. Η ακτινοβολία είναι το μέσο μεταφοράς ενέργειας στο διάστημα. Πιο συγκεκριμένα, η μεταφορά θερμότητας δια ακτινοβολίας λαμβάνει χώρα μέσω της ηλεκτρομαγνητικής ακτινοβολίας (electromagnetic radiation - EM). Όπως έχουμε αναφέρει, η EM ακτινοβολία είναι τα κύματα (ή σωματίδια) που εκπέμπονται από μια πηγή ενέργειας. Θυμηθείτε ότι ένα κόκκινο-καυτό κομμάτι μετάλλου ενεργεί ως πηγή ακτινοβολίας - μέλαν σώμα, που σημαίνει ότι η έντονη θερμική ενέργεια το κάνει να εκπέμψει EM ακτινοβολία. Σε αυτήν την περίπτωση, η συχνότητα της EM ακτινοβολίας βρίσκεται στο ορατό (κόκκινο) τμήμα του EM φάσματος. Χρησιμοποιούμε τον νόμο Stefan-Boltzmann για να περιγράψουμε τη μεταφορά θερμότητας με ακτινοβολία.

$$q = \sigma \epsilon A T^4$$

Όπου

$q$ : μεταφορά θερμότητας-ισχύος ανά μονάδα χρόνου (W)

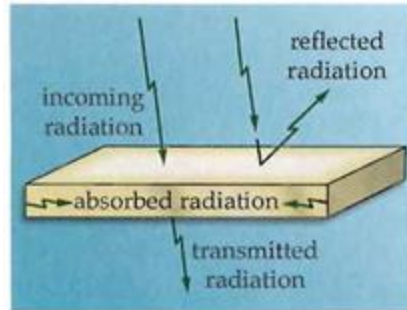
$\sigma$ : Σταθερά Stefan-Boltzmann ( $5,67 \times 10^{-8} \text{ W/m}^2 \text{ K}^4$ )

$\epsilon$ : εκπομπή ( $0 < \epsilon < 1$ )

$A$ : επιφάνεια του σώματος ( $\text{m}^2$ )

$T$ : θερμοκρασία μέλανος σώματος (K)

Αυτή η σχέση μας λέει ότι, καθώς αυξάνεται η θερμοκρασία του μέλανος σώματος, η ποσότητα θερμικής ισχύος που εκπέμψει είναι ανάλογη της θερμοκρασίας του εις την τετάρτη. Έτσι, εάν διπλασιάσουμε τη θερμοκρασία, η ποσότητα ενέργειας που εκπέμπεται θα αυξηθεί δεκαέξι φορές.

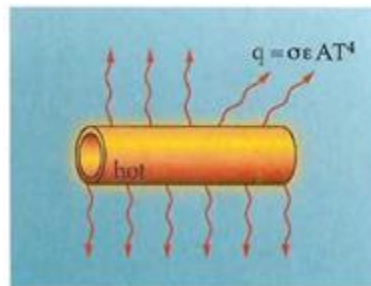


Σχήμα 200: Ακτινοβολία

Όπως δείχνει το Σχήμα 200, όταν η ακτινοβολία χτυπά μια επιφάνεια, το υλικό την ανακλά, την απορροφά ή τη μεταδίδει. Η ανακλώμενη ακτινοβολία είναι η ίδια με το ανακλώμενο φως από έναν καθρέφτη. Αυτός ο τύπος ακτινοβολίας αναπηδά ουσιαστικά από την επιφάνεια. Χρησιμοποιούμε το σύμβολο,  $\rho$ , για να αναγνωρίσουμε την ανακλαστικότητα μιας επιφάνειας (μην συγχέουμε αυτό το  $\rho$  με τη γωνιακή ακτίνα της Γης). Εργαζόμαστε με ανακλαστικότητα ως ποσοστό. Δηλαδή,  $\rho = 0.3$  σημαίνει ότι ένα αντικείμενο αντανακλά το 30% της ακτινοβολίας που το χτυπά.

Η απορροφούμενη ακτινοβολία είναι η ενέργεια που συλλαμβάνει η επιφάνεια, ακριβώς όπως ένα σφουγγάρι απορροφά το νερό. Η απορροφούμενη ακτινοβολία προκαλεί τελικά την αύξηση της θερμοκρασίας στη επιφάνεια. Χρησιμοποιούμε το σύμβολο,  $\alpha$ , για να συμβολίσουμε την απορροφητικότητα. Εργαζόμαστε επίσης με απορροφητικότητα ως ποσοστό. Δηλαδή,  $\alpha = 0,5$  σημαίνει ένα αντικείμενο απορροφά το 50% της ακτινοβολίας που το χτυπά.

Η ακτινοβολία που εκπέμπεται είναι ενέργεια που διέρχεται μέσα από το σώμα (όπως το ορατό φως περνά μέσα από ένα τζάμι). Χρησιμοποιούμε το σύμβολο  $\tau$  για να συμβολίσουμε την διαπερατότητα. Η διαπερατότητα είναι επίσης ποσοστό. Δηλαδή,  $\tau = 0,2$  σημαίνει ότι ένα αντικείμενο μεταδίδει το 20% της ακτινοβολίας που το χτυπά.



Σχήμα 201: Εκπομπή

Εξαιτίας της διατήρησης της ενέργειας, όλη η ακτινοβολία πρέπει να πάει κάπου. Έτσι, το άθροισμα της ανακλώμενης, απορροφούμενης και μεταδιδόμενης ενέργειας ακτινοβολίας ισούται με την εισερχόμενη ενέργεια:

$$\tau + \alpha + \rho = 1$$

όπου

$\tau$ : διαπερατότητα ( $0 < \tau < 1$ )

$\alpha$ : απορροφητικότητα ( $0 < \alpha < 1$ )

$\rho$ : ανακλαστικότητα ( $0 < \rho < 1$ )

Καθώς ένα αντικείμενο απορροφά ενέργεια, η κινητική ενέργεια των μεμονωμένων μορίων αυξάνεται και το αντικείμενο θερμαίνεται. Όπως δείχνει το Σχήμα 201, όλα τα αντικείμενα πάνω από το απόλυτο

μηδέν (0 K) εκπέμπουν ακτινοβολία. Αλλά δεν εκπέμπουν θερμότητα όλα τα υλικά με την ίδια απόδοση. Καλούμε την ικανότητα ενός υλικού να εκπέμπει θερμότητα ως ικανότητα εκπομπής,  $\epsilon$ . Ένα μέλαν σώμα έχει εκπομπή  $\epsilon = 1$ . Τα μαύρα «πλακάκια» στο Space Shuttle (πλακίδια προστασίας από την θερμότητα – thermal protection tiles) έχουν πολύ υψηλή εκπομπή ( $\epsilon = 0,8$ ).

## 14.2 Μέθοδοι θερμικού ελέγχου

Τώρα που διερευνήσαμε τις επιλογές μεταφοράς θερμότητας, ας δούμε πώς τις χρησιμοποιούμε για τη διατήρηση της θερμικής ισορροπίας των διαστημικών σκαφών. Όπως είπαμε νωρίτερα, πρέπει να διαχειριστούμε τη θερμότητα που εισέρχεται μέσα και έξω από το διαστημικό σκάφος (εξωτερικός θερμικός έλεγχος), καθώς και θερμότητα που παράγεται στο εσωτερικό (εσωτερικός θερμικός έλεγχος). Υπάρχουν δύο βασικές προσεγγίσεις για τον θερμικό έλεγχο. Η ευκολότερη μέθοδος είναι ο παθητικός θερμικός έλεγχος. Ο παθητικός θερμικός έλεγχος είναι ένας τρόπος ανοικτού βρόχου για τον έλεγχο της θερμοκρασίας του διαστημικού σκάφους, σχεδιάζοντας προσεκτικά ολόκληρο το σύστημα για τη ρύθμιση της εισόδου και της εξόδου θερμότητας και δημιουργώντας βολικές διαδρομές αγωγής θερμότητας. Το ωραίο με τον παθητικό θερμικό έλεγχο είναι ότι μόλις ξεκινήσει, δεν απαιτεί πρόσθετο έλεγχο. Δυστυχώς, μερικά συστήματα υπάρχει υπερβολική θερμότητα που πρέπει να ελέγχεται ή το περιβάλλον μπορεί είναι πολύ απρόβλεπτο. Σε αυτές τις περιπτώσεις, καταφεύγουμε σε ενεργό θερμικό έλεγχο κλειστού βρόχου. Ο ενεργός θερμικός έλεγχος κλειστού βρόχου χρησιμοποιεί υγρά, θερμαντήρες, αντλίες και άλλες συσκευές για την κίνηση και την εξαγωγή θερμότητας. Στη συνέχεια, θα δούμε μεθόδους εξωτερικού θερμικού ελέγχου.

### Εξωτερικός θερμικός έλεγχος.

Η πρόκληση του εξωτερικού θερμικού ελέγχου είναι η διαχείριση της ροής θερμότητας για ένα διαστημικό σκάφος. Ας ξεκινήσουμε με το πρόβλημα της εισόδου θερμότητας. Γνωρίζουμε ότι οι κύριες εξωτερικές πηγές θερμότητας είναι ο Ήλιος και η Γη. Η πρώτη γραμμή άμυνας μας είναι να ελέγξουμε προσεκτικά την ποσότητα θερμότητας που απορροφάται από τις επιφάνειες των διαστημικών σκαφών. Συνειδητοποιήστε ότι στο κενό του διαστήματος, η πλευρά που βλέπει στον Ήλιο ζεσταίνεται πάρα πολύ και η πλευρά που είναι σε σκιά είναι πολύ κρύα. Ένας από τους απλούστερους τρόπους εξισορρόπησης αυτής της διαφοράς θερμοκρασίας είναι η αργή περιστροφή του διαστημικού σκάφους γύρω από έναν άξονα κάθετο προς τον Ήλιο. Σε αυτήν τη λειτουργία «μπάρμπεκιου», κάθε επιφάνεια διαστημικού σκάφους θερμαίνεται εναλλάξ όταν βλέπει τον Ήλιο και στη συνέχεια ψύχεται όταν αντιμετωπίζει το κρύο του διαστήματος, διατηρώντας μια μέτρια θερμοκρασία επιφάνειας χωρίς καυτά σημεία. Το διαστημικό σκάφος Apollo χρησιμοποίησε αυτήν τη μέθοδο μέχρι τη Σελήνη και πίσω. Αυτή είναι μια μέθοδος ενεργού θερμικού ελέγχου της εισερχόμενης θερμότητας. Η λειτουργία «μπάρμπεκιου» μπορεί να βοηθήσει στην εξισορρόπηση της θερμότητας που χτυπά την επιφάνεια. Η επόμενη πρόκληση είναι να ελέγξετε το ποσό που απορροφάται. Όπως έχουμε δει, από το υλικό εξαρτάται η απορρόφηση, η ανάκλαση και η μετάδοση της προσπίπτουσας ακτινοβολίας. Αλλάζοντας τον τύπο των επιφανειακών επιχρισμάτων στο διαστημικό σκάφος, μπορούμε να ελέγξουμε τη συνολική απορροφητικότητα και την εκπομπή του, άρα και τη θερμοκρασία ισορροπίας του. Μπορούμε να αλλάξουμε την αναλογία απορροφούμενης θερμότητας προς την εκπεμπόμενη ( $\alpha/\epsilon$ ) επιλέγοντας προσεκτικά τα υλικά για να διατηρηθεί η θερμοκρασία της επιφάνειας στο επιθυμητό επίπεδο.

Αντί να επικαλύψουμε την μεταλλική επιφάνεια της δομής του διαστημικού σκάφους, τοποθετούμε διάφορους τύπους μόνωσης πολλαπλών στρώσεων (MLI) πάνω στη δομή. Το MLI αποτελείται από εναλλασσόμενα φύλλα πολυμερούς υλικού, όπως Mylar ή Kapton. Το Kapton μοιάζει συχνά με χρυσό φύλλο και μοιάζει με τις "διαστημικές κουβέρτες" που πωλούνται σε καταστήματα αθλητικών ειδών για να σας κρατήσουν ζεστούς κατά τη διάρκεια καταστάσεων έκτακτης ανάγκης. Μπορούμε να εφαρμόσουμε το MLI ή απλά κολλητικές ταινίες Mylar ή Kapton σε επιφάνειες για να μεταβάλλουμε τη

ποσότητα θερμότητας που απορροφάται από διαφορετικές περιοχές και για να μονώσουμε τα υποσυστήματα κάτω από αυτές.



**Σχήμα 202: Θερμική κουβέρτα προστασίας MLI στο εξωτερικό του Upper Atmospheric Research Satellite (UARS)**

Συνήθως, μπορούμε να ικανοποιήσουμε σχεδόν το 85% των απαιτήσεων θερμικού ελέγχου ενός διαστημικού σκάφους με παθητικά μέσα, επιλέγοντας απλώς τα σωστά επιφανειακά επιχρίσματα και μόνωση. Το Σχήμα 202 δείχνει το MLI που χρησιμοποιείται για θερμικό έλεγχο στο εξωτερικό του Upper Atmospheric Research Satellite (UARS).

Εξετάσαμε τον έλεγχο της ροής θερμότητας που εισέρχεται στο διαστημικό σκάφος. Τώρα ας σκεφτούμε πώς θα ελέγξουμε τη ροή που εξέρχεται από το διαστημικό σκάφος. Στο διάστημα, είναι δυνατή η χρήση της αγωγιμότητας ή συναγωγής για την εξαγωγή θερμότητας, αλλά όχι πολύ βολική. Για παράδειγμα, θα μπορούσαμε να μεταφέρουμε τη θερμότητα σε κάποιο ρευστό, όπως νερό, και στη συνέχεια να το απορρίψουμε στη θάλασσα. Το Space Shuttle χρησιμοποιεί αυτήν τη μέθοδο για την απομάκρυνση της υπερβολικής θερμότητας με μια συσκευή που ονομάζεται εξατμιστής. Οι αντλίες νερού γύρω από τα καυτά υποσυστήματα, τα κρύνουν με συναγωγή, και στη συνέχεια εξαερίζονται στη θάλασσα. Δυστυχώς, αυτή η μέθοδος λειτουργεί μόνο εφόσον υπάρχει επιπλέον νερό επί του σκάφους. Αυτός είναι ένας τύπος ενεργού θερμικού ελέγχου που, για μεγάλες αποστολές, δεν είναι πρακτικός.

Έτσι, η πιο αποτελεσματική μακροπρόθεσμη μέθοδος για την απομάκρυνση θερμότητας είναι με ακτινοβολία. Για την απομάκρυνση της ακτινοβολίας, πρέπει να σχεδιάσουμε ειδικές επιφάνειες στο διαστημικό σκάφος με χαμηλή απορροφητικότητα και πολύ υψηλή εκπομπή (χαμηλό α/ε). Αυτές οι ειδικές επιφάνειες εκπέμπουν εύκολα οποιαδήποτε θερμότητα συγκεντρωμένη κοντά τους. Αυτές οι επιφάνειες ονομάζονται ακτινοβολητές (radiators). Οι ακτινοβολητές είναι παρόμοιοι με τα "παράθυρα θερμότητας" που επιτρέπουν σε θερμά εξαρτήματα στο εσωτερικό ενός διαστημικού σκάφους να εκπέμπουν τη θερμότητα τους στο κρύο του διαστήματος. Συχνά, ένας ακτινοβολητής είναι απλώς ένα τμήμα επικάλυψης γυαλιού πάνω από ένα ιδιαίτερα ζεστό τμήμα του διαστημικού σκάφους. Αυτό αυξάνει σημαντικά την εκπομπή αυτού του τμήματος του διαστημικού σκάφους, έτσι ώστε περισσότερη θερμότητα να απομακρύνεται. Οι ακτινοβολητές στο Space Shuttle είναι αρκετά εμφανείς στο εσωτερικό των θυρών ωφέλιμου φορτίου, όπως φαίνεται στο Σχήμα 203.

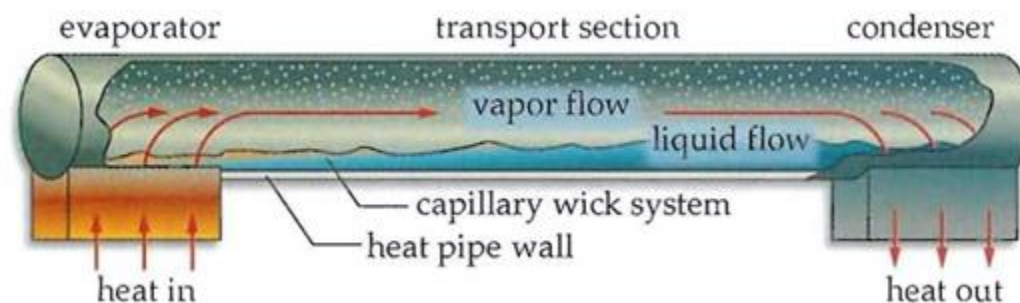


Σχήμα 203: Ακτινοβολητές (radiators) του Διαστημικού Λεωφορείου

### Εσωτερικός θερμικός έλεγχος.

Μέσα στο διαστημόπλοιο έχουμε διαφορετικά προβλήματα. Συχνά το πρόβλημα δεν είναι ότι υπάρχει πολύ ή λίγη θερμότητα, αλλά αντίθετα ότι πρέπει να υπάρχει η σωστή θερμότητα στο σωστό μέρος. Κάθε υποσύστημα έχει διαφορετικές θερμικές απαιτήσεις και πρέπει να τα διατηρούμε όλα «ευχαριστημένα». Ορισμένα τμήματα, όπως προωθητικές γραμμές και δεξαμενές, πρέπει να παραμείνουν ζεστά για να αποφευχθεί το πάγωμα τους. Άλλα, όπως τα ωφέλιμα φορτία υψηλής ισχύος, χρειάζονται ενεργή ψύξη. Η πολυπλοκότητα των τεχνικών εσωτερικού θερμικού ελέγχου εξαρτάται από δύο πράγματα - πόσο γρήγορα πρέπει να μετακινήσουμε τη θερμότητα και πόσο θερμότητα πρέπει να κινήσουμε. Για να αφαιρέσετε μέτριες ποσότητες θερμότητας από τα διαστημικά σκάφη όταν ο χρόνος δεν είναι κρίσιμος, ο ευκολότερος τρόπος είναι απλά να δημιουργήσετε μια διαδρομή θερμικής αγωγιμότητας από το θερμό στοιχείο σε ένα παθητικό εξωτερικό ακτινοβολητή.

Αυτή η διαδρομή μπορεί να είναι τόσο απλή όσο η σύνδεση των δύο τμημάτων με ένα κομμάτι θερμικά αγωγίμου μετάλλου. Αυτή είναι μια άλλη μορφή παθητικού θερμικού ελέγχου. Καθώς αυξάνεται η ποσότητα της θερμότητας και γίνεται ολοένα και πιο επείγον να την αφαιρέσουμε, χρειαζόμαστε πιο πολύπλοκες, ενεργές μεθόδους θερμικού ελέγχου. Ένα από τα απλούστερα είναι η χρήση σωλήνων θερμότητας. Οι σωλήνες θερμότητας είναι σωλήνες κλειστοί και στα δύο άκρα, γεμάτοι με ένα υγρό, όπως η αμμωνία, όπως φαίνεται στο Σχήμα 204. Όταν το ένα άκρο του σωλήνα είναι κοντά σε πηγή θερμότητας, το υγρό απορροφά αυτή τη θερμότητα και εξατμίζεται. Η πίεση του αερίου ωθεί τον θερμαινόμενο ατμό στο ψυχρό άκρο του σωλήνα όπου η θερμότητα περνά από τον σωλήνα μέσω αγωγιμότητας. Καθώς ο ατμός χάνει τη θερμότητα του, επανασυμπυκνώνεται σε υγρό. Μετά το υγρό ρέει προς τα πίσω.



Σχήμα 204: Σωλήνας θερμότητας (Heat Pipe)

Οι σωλήνες θερμότητας είναι μια απλή τεχνική, ενεργού θερμικού ελέγχου ανοιχτού βρόχου. Το μεγάλο πλεονέκτημα ψύξης προέρχεται από την θερμότητα που απορροφάται όταν τα υγρά εξατμίζονται. Τι εννοούμε με αυτό; Εάν θερμαίνετε νερό στη σόμπα, σε τι θερμοκρασία μπορεί να φτάσει; Περίπου 100 °C. Ανεξάρτητα από το πόση ώρα θερμαίνεται, μπορεί να φτάσει μόνο σε αυτήν τη θερμοκρασία - το σημείο βρασμού του H<sub>2</sub>O. Όσο προσθέτετε περισσότερη θερμότητα στο νερό, αλλάζει φάση (εξατμίζεται) από υγρό σε αέριο (ατμός). Ο ατμός δεν περιορίζεται στους 100 °C. Μπορεί να γίνει πολύ πιο ζεστός και έτσι, μπορεί να αποθηκεύσει περισσότερη θερμότητα. Η λανθάνουσα εξάτμιση της θερμότητας είναι η αρχή της αποθήκευσης επιπλέον θερμότητας σε ένα υγρό καθώς αλλάζει φάση. Καθώς το υγρό σε ένα σωλήνα θερμότητας εξατμίζεται, απορροφά μεγάλη ποσότητα θερμότητας λόγω αυτού του φαινομένου.

Μια άλλη απλή μέθοδος για την απομάκρυνση της θερμότητας είναι η χρήση παραφίνης ή κάποιου άλλου υλικού αλλαγής φάσης με σχετικά χαμηλό σημείο τήξης ώστε να αφαιρεθεί η θερμότητα από ένα εξάρτημα κατά τη διάρκεια της μέγιστης θερμικής ζήτησης. Καθώς η παραφίνη απορροφά θερμότητα, λιώνει. Όταν το εξάρτημα δεν χρησιμοποιείται πλέον και σταματά να παράγει θερμότητα, η λιωμένη παραφίνη άγει ή εκπέμπει αυτήν τη θερμότητα σε άλλα μέρη του διαστημικού σκάφους. Τελικά, το σύστημα θερμικού ελέγχου πρέπει να αποβάλει αυτή τη θερμότητα με ακτινοβολία. Καθώς η παραφίνη ψύχεται, στερεοποιείται και είναι έτοιμη για χρήση κατά τον επόμενο κύκλο αιχμής. Αυτή η μέθοδος θερμικού ελέγχου τείνει να είναι πολύ αξιόπιστη επειδή δεν έχει κινούμενα μέρη και η παραφίνη ουσιαστικά δεν φθείρεται ποτέ. Αυτό που κάνει αυτή τη μέθοδο τόσο αποτελεσματική είναι η ίδια αρχή που καθιστά τον πάγο ένα καλό υλικό για να βάλεις στην κατάψυξη - λανθάνουσα θερμότητα τήξης. Η λανθάνουσα θερμότητα τήξης είναι η ίδια βασική ιδέα με τη λανθάνουσα θερμότητα της εξάτμισης, αλλά χρησιμοποιεί τήξη αντί για βρασμό. Καθώς ο πάγος λιώνει στο ψυγείο σας, παίρνει τη θερμότητα από τις σόδες σας. Εφαρμόσαμε αυτήν την αρχή στο Κεφάλαιο 10 για να αφαιρέσουμε τη θερμότητα από το διαστημικό σκάφος όταν επανέρχεται στην ατμόσφαιρα.



**Σχήμα 205: Δορυφόρος DSP για την παρακολούθηση εκτοξεύσεων και μεγάλων εκρήξεων (Ασφάλεια). Χρησιμοποιεί αισθητήρες υπέρυθρων που απαιτούν ψύξη**

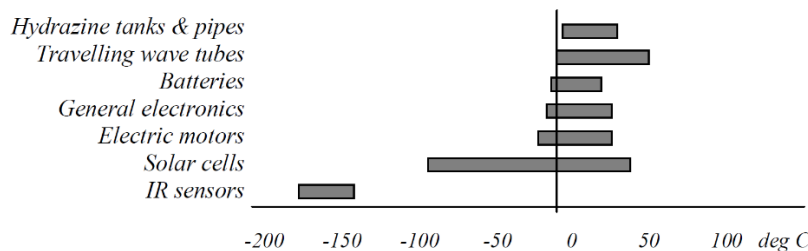
Σε πολλές περιπτώσεις, οι σωλήνες θερμότητας ή η παραφίνη δεν αρκούν, γι 'αυτό πρέπει να καταφύγουμε σε πιο σύνθετες μεθόδους κλειστού βρόχου, θερμικού ελέγχου. Αυτό ισχύει ιδιαίτερα για τους αισθητήρες υπέρυθρων (IR), που χρησιμοποιούνται σε ορισμένες αποστολές τηλεανίχνευσης, όπως το διαστημικό σκάφος του Defense Support Program που φαίνεται στο σχήμα 205. Επειδή τέτοιοι αισθητήρες είναι ευαίσθητοι σε ελάχιστες αλλαγές στη θερμοκρασία όπως μια εκτόξευση πυραύλου που φαίνεται από τα 36.000 χλμ. (22.370 μίλια) πρέπει να υπερψύχονται στους 70 K (- 200 °C) ή λιγότερο. Παλαιότερα συστήματα χρησιμοποιούσαν υγρό ήλιο αποθηκευμένο σε αντίστοιχο των μεγάλων φιαλών θερμού που ονομάζονται φιάλες Dewar. Αυτή η μέθοδος είχε περιορισμένη διάρκεια ζωής. Αφού το υγρό

ήλιο εξατμιζόταν, η αποστολή τελείωνε. Τα σύγχρονα συστήματα χρησιμοποιούν υγρό ήλιο, αλλά το ψύχουν ενεργά επί τόπου, χρησιμοποιώντας κρυογονικές αντλίες παρόμοιες με τις αντλίες που βρίσκονται στα οικιακά ψυγεία. Οι πρόοδοι στο σχεδιασμό και την ανάλυση αυτών των εξαρτημάτων έχουν μειώσει δραστικά το μέγεθός τους, ενώ αυξάνουν τη διάρκεια ζωής τους σε πάνω από δέκα χρόνια, κάνοντας τη μακροπρόθεσμη IR τηλεπισκόπηση πιο πρακτική και οικονομικά αποδοτική.

### 14.3 Σχεδιασμός υποσυστήματος Θερμικού Ελέγχου (ΥΘΕ) για Δορυφορικές αποστολές

Όσο αφορά την θερμική κατάσταση, λειτουργία δορυφόρων, ο μηχανισμός μετάδοσης θερμότητας δεν μπορεί να είναι η αγωγή (conduction) ή η συναγωγή (convection) αφού δεν έχουμε αέρα στο διάστημα (κενό), αφού όπως γνωρίζουμε η μετάδοση θερμότητας με αγωγή ή συναγωγή επιτυγχάνεται πάντοτε διαμέσου κάποιου υλικού/μέσου (medium). Είναι προφανές ότι η μετάδοση θερμότητας επιτυγχάνεται με ένα νέο/τρίτο μηχανισμό που ονομάζεται ΑΚΤΙΝΟΒΟΛΙΑ (radiation).

Τα περισσότερα υλικά και στοιχεία διαστημικών υποσυστημάτων έχουν αναπτυχθεί για εφαρμογές στην Γη και η ανθεκτικότητά τους σε θερμοκρασίες που δεν υπάρχουν στην Γη είναι περιορισμένη. Για την θερμική προστασία και έλεγχο κατασκευών για το διάστημα είναι απαραίτητο, ειδικά για ευαίσθητα στην θερμοκρασία τεχνολογίες και υποσυστήματα όπως οι συσσωρευτές, καύσιμα (υδραζίνη) να γνωρίζουμε τα όρια θερμοκρασίας που λειτουργούν αλλά και που επηρεάζεται η λειτουργία και απόδοσή τους. Στο σχήμα 206 φαίνονται τα προτεινόμενα όρια θερμοκρασίας για την λειτουργία διαφόρων τεχνολογιών και συστημάτων για το διάστημα, όπως τα προτείνουν οι κατασκευαστές τους αλλά και με την εμπειρία χρήσης σε διαστημικές αποστολές.



**Σχήμα 206:** όρια θερμοκρασίας για την λειτουργία διαφόρων τεχνολογιών και συστημάτων για το διάστημα

Η σχεδίαση συστημάτων θερμικής προστασίας και ελέγχου βασίζεται σε πολλούς παράγοντες:

- Τροχιά, θερμικό περιβάλλον
- Διαστημικά όργανα
- Περιορισμοί στην κατανάλωση ισχύος, μέγιστη κατανάλωση ισχύος (peak power)
- Προώθηση (electric propulsion, high ΔV)
- Κόστος, αρχιτεκτονική αποστολής (ενεργή/παθητική θερμική προστασία)

Για ένα δορυφόρο σε τροχιά γνωρίζουμε τις θερμικά φορτία που ασκούνται (Σχήμα 197) τα οποία μας επιτρέπουμε να περιγράψουμε την θερμική κατάσταση του δορυφόρου, εφαρμόζοντας την καταστατική εξίσωση για τη θερμική ισορροπία ενός δορυφόρου, η οποία είναι:

$$\text{Απορροφούμενη θερμική ισχύς} = \text{Ακτινοβολούμενη θερμική ισχύς} + (mc) \frac{dT}{dt}$$

ή



$$Q_{in} = Q_{out} + mc \frac{dT}{dt}$$

όπου, η θερμική ισχύς που απορροφάται ( $Q_{in}$ ) περιλαμβάνει:

$$Q_{\eta\lambda\iota\kappa\alpha\kappa\eta\varsigma\alpha\kappa\tau\iota\nu\beta\omicron\lambda\iota\alpha\varsigma} = \alpha_s \varphi_{\eta\lambda. \alpha\kappa\tau.} A_{\pi\rho\omicron\beta}$$

$$Q_{\alpha\nu\alpha\kappa\lambda} = f(\alpha_s, \varphi_{\eta\lambda. \alpha\kappa\tau.}, A_{\epsilon\pi\iota\varphi. \kappa\alpha\tau\epsilon\upsilon\theta\nu\nu\sigma\eta \eta\lambda\iota\omicron\nu \kappa. \alpha})$$

$$Q_{\gamma\eta\varsigma-IR} = \epsilon_{IR} \varphi_{\gamma\eta\varsigma} F_{\delta\omicron\rho\nu\varphi-\gamma\eta\varsigma} A_{\epsilon\pi\iota\varphi} [\alpha_{IR} = \epsilon_{IR}]$$

$$Q_{\epsilon\sigma\omega\tau} = \text{ισχύς από τό εσωτερικό του δορυφόρου}$$

$$\text{Η θερμική ισχύς που ακτινοβολήθηκε (} Q_{out} \text{)} = \epsilon_{IR} A_{\epsilon\pi\iota\varphi} \sigma T^4$$

"(mc)" είναι η θερμική ικανότητα/χωρητικότητα (μάζα x ειδική θερμική ικανότητα) του δορυφόρου.

Σε θερμική ισορροπία (μέγιστη ή ελάχιστη θερμοκρασία),  $dT/dt = 0$

### Παράδειγμα 14-1 Sputnik

Μας ζητάνε να προβλέψουμε τη θερμοκρασία ενός σφαιρικού διαστημικού σκάφους - π.χ. "Sputnik-1/Σπούτνικ-1" θεωρώντας ότι:

- Ύψος δορυφόρου,  $h = 227 \text{ km}$ , Ακτίνα γης,  $R = 6378 \text{ km}$
- Γυαλισμένη σφαίρα αλουμινίου ακτίνας  $29 \text{ cm}$  ( $\alpha_s = 0.2$ ;  $\epsilon_{IR} = 0.05$ )
- Θεωρήστε  $Q_{\alpha\nu\alpha\kappa\lambda} = Q_{\gamma\eta\varsigma-IR}$ ,  $Q_{\epsilon\sigma\omega\tau} = 5 \text{ W}$  και  $\varphi_{\eta\lambda. \alpha\kappa\tau.} = 1353 \text{ Wm}^{-2}$

Λύση

$$Q_{\eta\lambda\iota\kappa\alpha\kappa\eta\varsigma\alpha\kappa\tau\iota\nu\beta\omicron\lambda\iota\alpha\varsigma} = \alpha_s \varphi_{\eta\lambda. \alpha\kappa\tau.} A_{\pi\rho\omicron\beta} = 0.2 \times 1353 \times \pi(0.29)^2 = 71.5 \text{ W}$$

$$Q_{\gamma\eta\varsigma-IR} = \epsilon_{IR} \varphi_{\gamma\eta\varsigma} F_{\delta\omicron\rho\nu\varphi-\gamma\eta\varsigma} A_{\epsilon\pi\iota\varphi} = 0.05 \times 89 \times 4\pi(0.29)^2 = 4.7 \text{ W}$$

$$Q_{in} = 71.5 + 4.7 + 4.7 + 5 = 85.9 \text{ W}$$

$$Q_{out} = 0.05 \times 89 \times 4\pi(0.29)^2 = 4.7 \text{ W}$$

$$Q_{out} = \epsilon_{IR} A_{\epsilon\pi\iota\varphi} \sigma T^4 = 0.05 \times 4\pi \times (0.29)^2 \times 5.67 \times 10^{-8} \times T^4 \Rightarrow T^4 = \frac{85.9}{3 \times 10^{-9}} \Rightarrow T =$$

$$411 \text{ K } (138^\circ \text{ C})$$

Επειδή  $dT/dt = 0$  (δεν έχουμε έκλειψη) @  $T_{\max} \Rightarrow Q_{out} = Q_{in}$

**Παράδειγμα 14-2**

Πριν από τη δοκιμή θερμικού κενού για τον δορυφόρο FireSat, οι μηχανικοί θέλουν να ελέγξουν τον παθητικό θερμικό σχεδιασμό για το διαστημικό σκάφος. Η δομή έχει σχήμα κύβου, με ακμή 0.3m , με ηλιακούς συλλέκτες στις τέσσερις πλευρές. Οι προδιαγραφές του κατασκευαστή για τα πάνελ μας λένε ότι η διαπερατότητα τους είναι μηδέν  $\tau = 0$ , η ανακλαστικότητα τους  $\rho = 0.05$  και η απορροφητικότητα τους  $\alpha = 0.95$ . Η εκπομπή των πάνελ είναι 0.85. Τα πάνω και τα κάτω τετράγωνα τμήματα του διαστημικού σκάφους καλύπτονται με μόνωση πολλαπλών στρωμάτων (MLI) παρέχοντας αποτελεσματική εκπομπή ίση με 0 και απορροφητικότητα 0 (τέλειος μονωτής). Ξέρουμε ότι το διαστημικό σκάφος χρειάζεται ισχύς ίση με 11.5W για να λειτουργήσει. Κατά τη διάρκεια εργασιών του ωφέλιμου φορτίου, καταναλώνεται επιπλέον ισχύς αιχμής 20 W. Προσδιορίστε τη θερμοκρασία ισορροπίας για το διαστημικό σκάφος με πλήρη ηλιακή ακτινοβολία σε ένα ηλιακό πάνελ κατά τη διάρκεια εργασιών ωφέλιμου φορτίου και σε έκλειψη (χωρίς λειτουργία ωφέλιμου φορτίου κατά την έκλειψη). Μπορείτε να αγνοήσετε την λάμψη της γης ( $237\text{W}/\text{m}^2$ ) στο πάνελ που βλέπει προς τη γη, δεδομένου ότι καλύπτεται από MLI.

Δεδομένα:

πλάτος διαστημικού σκάφους = 0.3 m

ύψος διαστημικού σκάφους = 0.3 m

αριθμός πάνελ = 4

πάνελ  $\rho = 0.05$

πάνελ  $\alpha = 0.095$

πάνελ  $\varepsilon = 0.85$

MLI  $\varepsilon = 0$

ηλιακή ροή/είσοδος =  $1358 \text{ W}/\text{m}^2$

Η σταθερά του Stefan-Boltzmann

$$\sigma = 5.67 \times 10^{-8} \frac{\text{W}}{\text{m}^2\text{K}^4}$$

MLI  $\alpha = 0$

Ισχύς ωφέλιμου φορτίου = 20 W

Ισχύς υποσυστημάτων = 11.5 W

Βρείτε:

θερμοκρασία ισορροπίας διαστημικού σκάφους κατά τη διάρκεια εργασιών ωφέλιμου φορτίου σε πλήρη ηλιακή ακτινοβολία και χωρίς εργασίες ωφέλιμου φορτίου σε εκλείψεις.

**Λύση**

1) Βρείτε τη συνολική περιοχή και την ηλιακή περιοχή εισόδου των πλασιών

Συνολικό εμβαδό συστοιχίας

$$= (\text{πλάτος διαστημικού σκάφους})(\text{ύψος διαστημικού σκάφους})(\text{αριθ. πάνελ}) \\ = 0.3 \times 0.3 \times 4 = 0.36 \text{ m}^2$$

$$\text{Επιφάνεια που εκτίθεται στον ήλιο} = \text{Συνολικό εμβαδό συστοιχίας} / 4 = \frac{0.36}{4} \text{ m}^2 = 0.09 \text{ m}^2$$

2) Βρείτε την ολική ενέργεια που προέρχεται από τον Ήλιο κατά τη διάρκεια των εργασιών ωφέλιμου φορτίου:

$$q_{\text{εισ}\eta\lambda\iota\omicron\upsilon} = (\text{Επιφάνεια που βρίσκεται στον ήλιο})(\text{ηλιακή είσοδος})(\text{απορροφητικότητα πάνελ}) \\ = 0.09 \times 1358 \times 0.95 = 116.11 \text{ W}$$

$$q_{\text{εσωτ}_{\eta\lambda\iota\omicron\nu}} = \text{ισχύς υποσυστήματος} + \text{ισχύς ωφέλιμου φορτίου} = 11.5 + 20 = 31.5 \text{ W}$$

$$q_{\eta\lambda\iota\omicron\nu} = q_{\text{εισ}_{\eta\lambda\iota\omicron\nu}} + q_{\text{εσωτ}_{\eta\lambda\iota\omicron\nu}} = 116.11 + 31.5 = 147.61 \text{ W}$$

3) Εξισώνουμε τα:

$$q_{\eta\lambda\iota\omicron\nu} = q_{\text{εξόδου}}$$

$$q_{\text{εξόδου}} = \sigma (\text{εκπομπή πάνελ})(\text{εμβαδόν συστοιχίας})T^4$$

$$T_{\eta\lambda} = \left( \frac{q_{\eta\lambda\iota\omicron\nu}}{\sigma (\text{εκπομπή πάνελ})(\text{εμβαδόν συστοιχίας})} \right)^{\frac{1}{4}} = \left( \frac{147.61}{5.67 \times 10^{-8} \times 0.85 \times 0.36} \right)^{\frac{1}{4}} = 303.71 \text{ K}$$

$$T = T_{\eta\lambda} - 273.15 \text{ K} = 30.56 \text{ }^{\circ}\text{C}$$

4) Εξισώνουμε:

$$q_{\text{εξόδου}} = q_{\text{εσωτ}_{\acute{\epsilon}\kappa\lambda\epsilon\iota\psi\eta\varsigma}} = \text{ισχύς υποσυστήματος} = 11.5 \text{ W}$$

$$T_{\acute{\epsilon}\kappa\lambda\eta\psi\eta\varsigma} = \left( \frac{q_{\text{εξόδου}}}{\sigma (\text{εκπομπή πάνελ})(\text{εμβαδόν συστοιχίας})} \right)^{\frac{1}{4}} = \left( \frac{11.5}{5.67 \times 10^{-8} \times 0.85 \times 0.36} \right)^{\frac{1}{4}} = 160.45 \text{ K}$$

$$T = T_{\acute{\epsilon}\kappa\lambda\eta\psi\eta\varsigma} - 273.15 \text{ K} = -112.7 \text{ }^{\circ}\text{C}$$

### Ερμηνεία αποτελεσμάτων

Μεταξύ πλήρους φωτός του ήλιου με λειτουργίες ωφέλιμου φορτίου και έκλειψης, το διαστημικό σκάφος θα βιώσει μια ευρέως μεταβαλλόμενη θερμοκρασία ισορροπίας μεταξύ 303K και 160K. Ευτυχώς, αυτά αντιπροσωπεύουν της ακραίες τιμές της θερμοκρασίας. Στην πραγματικότητα, η πραγματική θερμοκρασία του διαστημικού σκάφους θα παραμείνει κάπου ανάμεσα σε αυτά τα άκρα. Ωστόσο, από την ανάλυση, φαίνεται ότι μπορεί να υπάρχει μια τάση για το διαστημικό σκάφος να βρίσκεται στην ψυχρή πλευρά, ανάλογα με το πραγματικό «μέγεθος» κάθε έκλειψης. Αυτό μπορεί να απαιτεί ιδιαίτερη προσοχή σε συγκεκριμένα τμήματα του διαστημικού σκάφους, ιδιαίτερα εκείνα που είναι ευαίσθητα στο υπερβολικό κρύο.

## Βιβλιογραφία

- J. Sellers, W. Astore, R. Griffin, W. Larson, 'Understanding Space: An Introduction to Astronautics', 3<sup>rd</sup> Edition, Space Technology Series, Mc Graw Hill, 2014, ISBN 0073407753
- J. R. Wertz, D. F. Everett, J. J. Puschell, 'Space Mission Engineering: The New SMAD (Space Technology Library, Vol. 28, 2014, ISBN 1881883159
- Σ. Κρμιζής, Μ. Προβατάς, 'Όλα σε μια Ζωή', Εκδόσεις Παπαδόπουλος, 2020, ISBN 978-960-484-543-9
- Σ. Κρμιζής 'Ταξίδι στο Ηλιακό Σύστημα – Από τον Ερμή στον Πλούτωνα σε 50 χρόνια', Εκδόσεις Παπαδόπουλος, 2020, ISBN 978-960-569-744-0
- U. Walter, 'Astronautics, The Physics of Space Flight', 3<sup>rd</sup> Edition, 2018, Springer, ISBN 3319743721
- OECD (2014), The Space Economy at a Glance 2014, OECD Publishing, <https://www.oecd-ilibrary.org/sites/eb5e9fd1-el/index.html?itemId=/content/component/eb5e9fd1-el>
- Φυσική Β Λυκείου , Link:<http://ebooks.edu.gr/modules/ebook/show.php/DSGL-B134/513/3336,13455/>
- A. Πομόνη. «Μηχανική Ρευστομηχανική. Ενότητα 6». Έκδοση: 1.0. Πάτρα 2015. Διαθέσιμο από τη δικτυακή διεύθυνση: <https://eclass.upatras.gr/courses/PHY1901/>
- G. P. Sutton, O. Biblarz, Rocket Propulsion Elements, 8th Edition, John Wiley & Sons Inc., New York 2010
- P. Sforza, Theory of Aerospace Propulsion, 1st Edition, Butterworth-Heinemann, London 2011
- Κ. Γ. Κολοβός, 'Κινητήρες πυραύλων και προωθητικά πυραυλικών Συστημάτων', ΕΛΛΗΝΙΚΟ ΚΕΝΤΡΟ ΕΛΕΓΧΟΥ ΟΠΛΩΝ «ΑΘΗΝΑ» - [www.armscontrol.info](http://www.armscontrol.info)
- A. Πολυζάκης, 'Αεροδιαστημικά Προωθητικά Συστήματα', Εκδόσεις PowerHeatCool, Έκδοση 1<sup>η</sup>, 2019, ISBN: 978-618-83590-5-5T
- Peter Berlin, Satellite Platform Design, Lulea, 2005, ISBN 9163149176
- Maral, G. & Bousquet, M. (2012). Δορυφορικές Επικοινωνίες: Συστήματα Τεχνικές και Τεχνολογία (5η Έκδοση). Θεσσαλονίκη: Εκδ. Τζιόλα.
- Pratt, T., Bostian, C. & Allnutt, J. (2003). Δορυφορικές Επικοινωνίες (2η Έκδοση). Αθήνα: Εκδ. Παπασωτηρίου.
- Evans, B. G. (2008). Satellite Communication Systems (3rd Edition). UK: IET.
- Σίμος, Η, 'Εισαγωγή στις Τηλεπικοινωνίες', σύνδεσμος: <http://eclass.teipir.gr/openelective/modules/document/file.php/ENGI101/01%20Εισαγωγή%20στη%20Δι%20αμόρφωση%20Πλάτους%20%28Amplitude%20modulation%2C%20AM%29.pdf>
- Βουγιούκας, Δ., 'Δορυφορικές Επικοινωνίες - Τεχνολογίες, Συστήματα και Εφαρμογές', ISBN: 978-960-603-284-4

**Σύντομο βιογραφικό - Καθ. Βάιος Λάππας**

Ο Καθ. Βάιος Λάππας είναι απόφοιτος Μηχ. Αεροναυπηγός (B. Eng) του Ryerson University (Toronto, Canada) και Μηχ. Διαστημικής (MSc) του International Space University (Strasbourg, France). Πήρε το Διδακτορικό του από το Πανεπιστήμιο του Surrey (UK) το 2002. Έχει διατελέσει Lecturer, Senior Lecturer, Reader και Professor in Space Vehicle Control στο Πανεπιστήμιο του Surrey, όπου συμμετείχε ως Co/Principal Investigator σε ερευνητικά προγράμματα και διαστημικές αποστολές με χρηματοδότηση των Airbus Defense and Space, European Space Agency, NASA, European Commission (FP7). Μετέχει σε τεχνικές επιτροπές (Small Satellites, GNC, Deployable Structures) του American Institute of Aeronautics and Astronautics, είναι Associate Editor του Journal of Aerospace Engineering, Journal of Spacecraft & Rockets και μετείχε στην επιτροπή Space Advisory Group (SAG) της Ευρωπαϊκής Επιτροπής για θέματα έρευνας και ανάπτυξης του Διαστήματος από το 2011-2015. Συμμετέχει ως εθνικός εκπρόσωπος, στον τομέα συστημάτων ελέγχου και πλοήγησης, στον Ευρωπαϊκό Οργανισμό Άμυνας (European Defence Agency). Από το 2015 διδάσκει ως καθηγητής Αεροδιαστημικής στο Πανεπιστήμιο του Cranfield (Cranfield University), στα μεταπτυχιακά προγράμματα Αυτόνομων Συστημάτων (MSc in Autonomous Vehicles, Dynamics and Control) και Αστροναυτικής/Διαστημικών Συστημάτων (MSc in Astronautics) αλλά και μετέχει ενεργά σε χρηματοδοτούμενα ερευνητικά προγράμματα της Διαστημικής Υπηρεσίας του ΗΒ, ΕΟΔ, Πολεμικής Αεροπορίας των ΗΠΑ και άλλων φορέων. Από το Ιανουάριο του 2015 εργάζεται στο Εργαστήριο Εφαρμοσμένης Μηχανικής του Παν/ίου Πατρών στο Τμήμα Μηχανολόγων/Αεροναυπηγών και ασχολείται με την έρευνα και ανάπτυξη συστημάτων και τεχνολογίας του Διαστήματος, αυτόνομων συστημάτων αεροδιαστημικής και μη επανδρωμένων αεροσκαφών, χρηματοδοτούμενα από τον Ευρωπαϊκό Οργανισμό Διαστήματος, Ευρωπαϊκή Ένωση (Horizon 2020) και τον Ευρωπαϊκό Οργανισμό Άμυνας. Μετέχει στην ομάδα διδασκόντων του διαπανεπιστημιακού μεταπτυχιακού Διαστημικής Τεχνολογίας, Εφαρμογών και Υπηρεσιών (<http://www.star.uoa.gr/>) του Πανεπιστημίου Πατρών και Εθνικού Καποδιστριακού Πανεπιστημίου Αθηνών (ΕΚΠΑ) από την δημιουργία του (2019). Από το Οκτώβριο του 2019, αποτελεί μέλος της ομάδας διδασκόντων (Θέση N407) στο νέο τμήμα Αεροδιαστημικής Επιστήμης και Τεχνολογίας (ΑΕΤ) του Εθνικού Καποδιστριακού Πανεπιστημίου Αθηνών (<http://www.aerospace.uoa.gr/>), από τον Ιούνιο του 2021 ως Καθηγητής πρώτης βαθμίδας και τον Δεκέμβριο του 2021 ως Πρόεδρος του Τμήματος Αεροδιαστημικής Επιστήμης και Τεχνολογίας .

