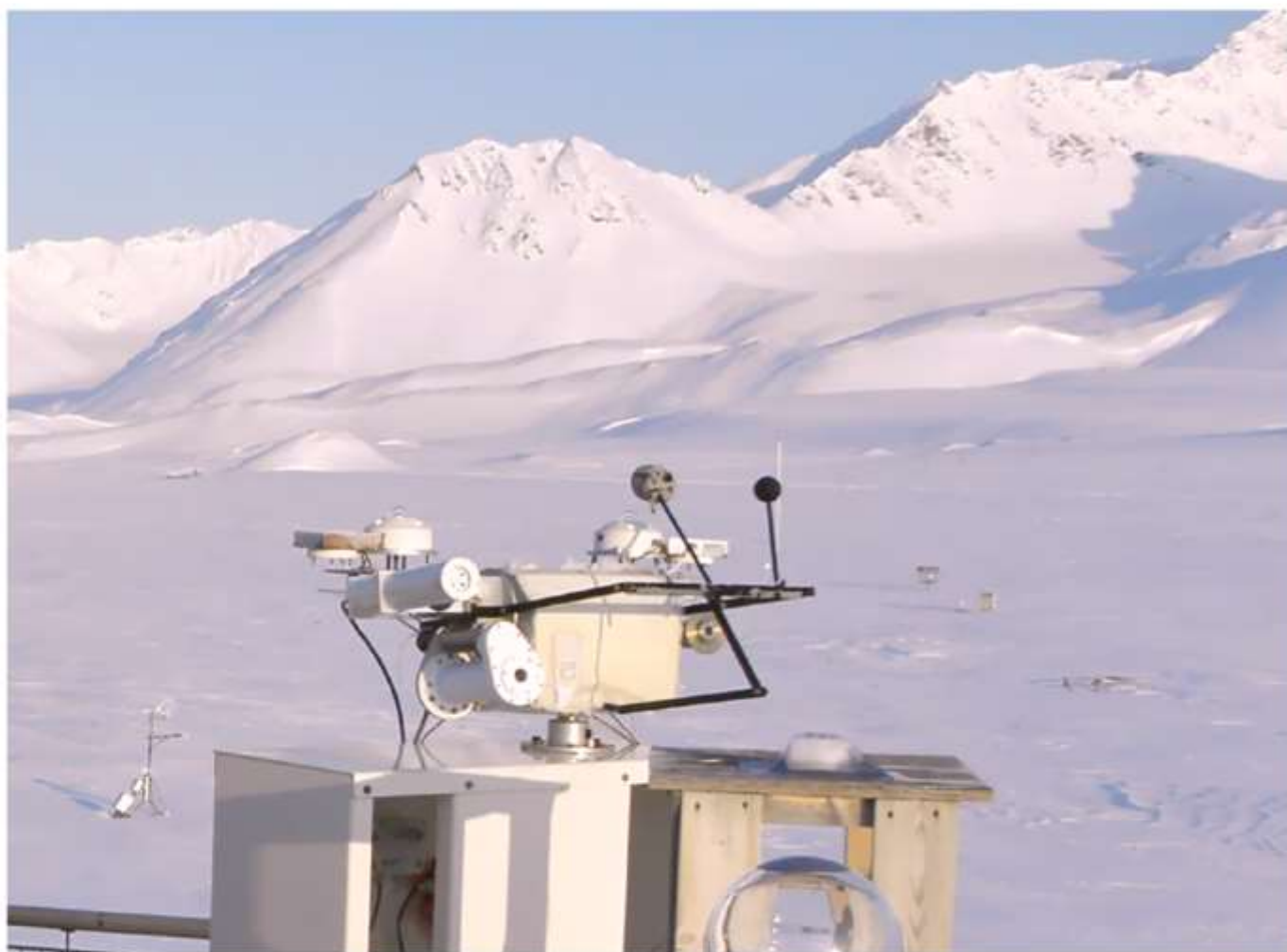


Δημήτρης Μελάς, Αλκιβιάδης Μπάης, Δημήτρης Μπαλής

# ΑΤΜΟΣΦΑΙΡΙΚΗ ΤΕΧΝΟΛΟΓΙΑ



Ελληνικά Ακαδημαϊκά Ηλεκτρονικά  
Συγγράμματα και Βοηθήματα  
[www.kallipos.gr](http://www.kallipos.gr)

**HEALLINK**  
Σύνδεσμος Ελληνικών Ακαδημαϊκών Βιβλιοθηκών



ΕΠΙΧΕΙΡΗΣΙΑΚΟ ΠΡΟΓΡΑΜΜΑ  
ΕΥΣΤΑΘΕΙΑ ΚΑΙ ΔΙΑ ΔΙΟΧΗ ΜΑΘΗΣΗ  
Πολύπτυχο για Ανώτατη Εκπαίδευση  
ΥΠΟΥΡΓΕΙΟ ΠΑΙΔΕΙΑΣ ΚΑΙ ΘΡΗΣΚΕΥΜΑΤΩΝ  
ΕΙΔΙΚΗ ΥΠΗΡΕΣΙΑ ΔΙΑΧΕΙΡΙΣΗΣ



Με τη συγχρηματοδότηση της Ελλάδας και της Ευρωπαϊκής Ένωσης

ΔΗΜΗΤΡΗΣ ΜΕΛΑΣ  
Καθηγητής Α.Π.Θ.

ΑΛΚΙΒΙΑΔΗΣ ΜΠΑΗΣ  
Καθηγητής Α.Π.Θ.

ΔΗΜΗΤΡΗΣ ΜΠΑΛΗΣ  
Αναπληρωτής Καθηγητής Α.Π.Θ.

# *Ατμοσφαιρική Τεχνολογία*



Ελληνικά Ακαδημαϊκά Ηλεκτρονικά  
Συγγράμματα και Βοηθήματα  
[www.kallipos.gr](http://www.kallipos.gr)

## Ατμοσφαιρική Τεχνολογία

### *Συγγραφή*

Δημήτρης Μελάς

Αλκιβιάδης Μπάης

Δημήτρης Μπαλής

### *Κριτικός αναγνώστης*

Ευάγγελος Γερασόπουλος

### *Συντελεστές έκδοσης*

Γλωσσική Επιμέλεια: Ελένη Τζιάφα

Τεχνική Επεξεργασία: Νίκος Σιώμος

ISBN: 978-960-603-279-0

Copyright © ΣΕΑΒ, 2015



Το παρόν έργο αδειοδοτείται υπό τους όρους της άδειας Creative Commons Αναφορά Δημιουργού - Μη Εμπορική Χρήση - Όχι Παράγωγα Έργα 3.0. Για να δείτε ένα αντίγραφο της άδειας αυτής επισκεφτείτε τον ιστότοπο <https://creativecommons.org/licenses/by-nc-nd/3.0/gr/>

Εικόνα εξώφυλλου: Ακτινομετρικά όργανα στον αρκτικό ερευνητικό σταθμό του Norwegian Polar Institute (78° 55' N, Ny Alesund, Norway)

ΣΥΝΔΕΣΜΟΣ ΕΛΛΗΝΙΚΩΝ ΑΚΑΔΗΜΑΪΚΩΝ ΒΙΒΛΙΟΘΗΚΩΝ

Εθνικό Μετσόβιο Πολυτεχνείο

Ηρώων Πολυτεχνείου 9, 15780 Ζωγράφου

[www.kallipos.gr](http://www.kallipos.gr)



## ΠΙΝΑΚΑΣ ΠΕΡΙΕΧΟΜΕΝΩΝ

<b>ΠΙΝΑΚΑΣ ΣΥΝΤΟΜΕΥΣΕΩΝ - ΑΚΡΩΝΥΜΙΑ.....</b>	<b>9</b>
<b>ΠΡΟΛΟΓΟΣ.....</b>	<b>10</b>
<b>ΚΕΦΑΛΑΙΟ 1: ΒΑΣΙΚΕΣ ΑΡΧΕΣ ΤΩΝ ΜΕΤΡΗΣΕΩΝ.....</b>	<b>12</b>
1.1 Εισαγωγή.....	12
1.1.1 Παλαιές και νέες τεχνικές.....	12
1.1.2 Αντιπροσωπευτικότητα μέτρησης.....	13
1.1.3 Έλεγχος/διασφάλιση ποιότητας.....	14
1.1.4 Μεταδεδομένα.....	15
1.1.5 Επιτόπιες μετρήσεις και τηλεπισκόπηση.....	16
1.2 Χαρακτηριστικά αισθητήρων.....	16
1.2.1 Γενικά στοιχεία μέτρησης.....	16
1.2.2 Στατικά χαρακτηριστικά των αισθητήρων.....	19
1.2.3 Δυναμικά χαρακτηριστικά των αισθητήρων.....	21
<b>ΚΕΦΑΛΑΙΟ 2: ΘΕΡΜΟΚΡΑΣΙΑ.....</b>	<b>23</b>
2.1 Γενικά για τη θερμοκρασία.....	23
2.2 Σημεία αναφοράς και κλίμακες θερμοκρασίας.....	24
2.3 Μετεωρολογικά θερμοόμετρα.....	25
2.3.1 Θερμόμετρα που βασίζονται στη θερμοκή διαστολή.....	25
2.3.2 Θερμόμετρα ηλεκτρικής αντίστασης.....	27
2.3.3 Θερμοζεύγη.....	29
2.3.4 Πυρόμετρα (θερμόμετρα ακτινοβολίας).....	29
2.4 Σφάλματα και πηγές σφαλμάτων στη μέτρηση της θερμοκρασίας.....	30
2.4.1 Σφάλματα λόγω θερμοκής αδράνειας.....	30
2.4.2 Σφάλματα λόγω ακτινοβολίας.....	32
2.4.3 Σφάλματα λόγω επαφής.....	33
<b>ΚΕΦΑΛΑΙΟ 3: ΑΤΜΟΣΦΑΙΡΙΚΗ ΥΓΡΑΣΙΑ.....</b>	<b>35</b>
3.1 Γενικά για την ατμοσφαιρική υγρασία.....	35
3.2 Παράμετροι προσδιορισμού υγρασίας.....	35
3.3 Ψυχρόμετρα.....	37
3.4 Υγρόμετρα τριχός.....	39
3.5 Φασματοσκοπικά υγρόμετρα.....	40
3.6 Αρχές λειτουργίας άλλων υγρομέτρων.....	42
<b>ΚΕΦΑΛΑΙΟ 4: ΑΝΕΜΟΣ.....</b>	<b>43</b>
4.1 Γενικά για τον άνεμο.....	43
4.2 Κλίμακες και μονάδες.....	44
4.3 Υπολογισμός της κατακόρυφης κατανομής του ανέμου.....	45
4.4 Χαρακτηριστικά ανεμομέτρων.....	45
4.5 Ανεμόμετρα.....	46
4.6 Ανεμοδείκτες.....	49
<b>ΚΕΦΑΛΑΙΟ 5: ΑΤΜΟΣΦΑΙΡΙΚΗ ΠΙΕΣΗ.....</b>	<b>51</b>
5.1 Γενικά για την ατμοσφαιρική πίεση.....	51
5.2 Μονάδες πίεσης.....	52
5.3 Μέτρηση της ατμοσφαιρικής πίεσης.....	53

5.3.1	Υδραργυρικό βαρόμετρο .....	53
5.3.2	Ανεροειδές (μεταλλικό) βαρόμετρο.....	54
5.3.3	Ηλεκτρονικά βαρόμετρα.....	55
<b>ΚΕΦΑΛΑΙΟ 6: ΜΕΤΡΗΣΗ ΤΟΥ ΥΕΤΟΥ .....</b>		<b>57</b>
6.1	Εισαγωγή.....	57
6.1.1	Γενικά για τον υετό.....	57
6.1.2	Ιστορικά στοιχεία.....	57
6.1.3	Μετεωρολογικές και υδρολογικές απαιτήσεις.....	58
6.2	Μέθοδοι μέτρησης.....	60
6.3	Τοποθέτηση και έκθεση.....	60
6.4	Επίδραση του ανέμου.....	61
6.5	Άλλοι παράγοντες που επιδρούν στις μετρήσεις.....	62
6.6	Αναλογικά βροχόμετρα.....	63
6.7	Καταγραφικά βροχόμετρα.....	64
6.8	Μετρήσεις με ραντάρ.....	67
6.9	Μετρήσεις από δορυφόρους.....	70
6.9.1	Γενικά.....	70
6.9.2	Τροχιές δορυφόρων.....	71
6.9.3	Δορυφορικές παρατηρήσεις του υετού.....	72
<b>ΚΕΦΑΛΑΙΟ 7: ΜΕΤΡΗΣΗ ΤΗΣ ΑΚΤΙΝΟΒΟΛΙΑΣ .....</b>		<b>75</b>
7.1	Ακτινομετρικά μεγέθη.....	75
7.2	Γενικά για όργανα μέτρησης της ακτινοβολίας.....	77
7.2.1	Συλλέκτης της ακτινοβολίας.....	78
7.2.1.1	Σφάλματα λόγω γωνιακής απόκρισης.....	83
7.2.2	Διάταξη φασματικής απόκρισης.....	85
7.2.3	Διατάξεις ανίχνευσης και καταγραφής.....	86
7.2.3.1	Θερμικές Διατάξεις.....	86
7.2.3.2	Φωτοανιχνευτές.....	88
7.2.4	Βαθμονόμηση.....	90
7.3	Φασματοφωτόμετρα.....	93
7.3.1	Προσδιορισμός της φασματικής κλίμακας.....	96
7.3.2	Σφάλματα στη λειτουργία των φασματοφωτομέτρων.....	97
7.3.2.1	Σκεδαζόμενο φως.....	97
7.3.2.2	Θερμοκρασιακές μεταβολές.....	98
7.3.2.3	Διακριτική ικανότητα.....	99
7.3.3	Απόλυτη βαθμονόμηση φασματοφωτομέτρων.....	100
7.4	Ακτινόμετρα.....	100
7.4.1	Απόλυτη βαθμονόμηση ακτινομέτρων.....	103
7.4.2	Τύποι μετρήσεων με ακτινόμετρα.....	105
7.5	Παράγοντες που επηρεάζουν τα όργανα ακτινοβολίας.....	107
7.5.1	Διαπερατότητα.....	107
7.5.2	Θερμοκρασία.....	108
7.5.2.1	Σταθεροποίηση της θερμοκρασίας λειτουργίας.....	108
7.5.2.2	Διόρθωση του σήματος λόγω μεταβολών της θερμοκρασίας.....	108
7.6	Τοποθέτηση και συντήρηση.....	109
<b>ΚΕΦΑΛΑΙΟ 8: ΜΕΤΡΗΣΕΙΣ ΠΟΙΟΤΗΤΑΣ ΤΟΥ ΑΕΡΑ.....</b>		<b>112</b>
8.1	Σύστημα Αέριας Ρύπανσης.....	112
8.2	Μονάδες μέτρησης των συγκεντρώσεων των ρύπων στον αέρα.....	113

<b>8.3</b>	Ταξινόμηση – Επεξεργασία – Παρουσίαση μετρήσεων.....	115
<b>8.3.1</b>	Γενικά.....	115
<b>8.3.2</b>	Συλλογή μετρήσεων.....	115
<b>8.3.3</b>	Έλεγχος και αξιοπιστία των μετρήσεων.....	116
<b>8.3.4</b>	Βαθμονόμηση οργάνων.....	116
<b>8.3.5</b>	Επεξεργασία και παρουσίαση δεδομένων αέριας ρύπανσης.....	117
<b>8.3.5.1</b>	Σκοπός.....	117
<b>8.3.5.2</b>	Χρονική κλίμακα επεξεργασίας.....	117
<b>8.3.5.3</b>	Στατιστική επεξεργασία μετρήσεων.....	118
<b>8.3.5.4</b>	Παρουσίαση των μετρήσεων.....	118
<b>8.4</b>	Σημαντικότεροι ρύποι του αέρα.....	119
<b>8.4.1</b>	Διοξείδιο του θείου (SO <sub>2</sub> ).....	119
<b>8.4.2</b>	Οξείδια του αζώτου (NO <sub>x</sub> ).....	120
<b>8.4.3</b>	Όζον (O <sub>3</sub> ).....	120
<b>8.4.4</b>	Μονοξείδιο του άνθρακα.....	120
<b>8.4.5</b>	Υδρογονάνθρακες πλην μεθανίου.....	120
<b>8.4.6</b>	Αιωρούμενα σωματίδια.....	120
<b>8.5</b>	Μέτρηση του όζοντος.....	121
<b>8.6</b>	Μέτρηση των οξειδίων του αζώτου.....	123
<b>8.7</b>	Μετρήσεις διοξειδίου του θείου.....	124
<b>8.7.1</b>	Μέθοδος με αναλυτή υπεριώδους φθορισμού.....	124
<b>8.8</b>	Μέτρηση του μονοξειδίου του άνθρακα.....	125
<b>8.9</b>	Τεχνολογία μέτρησης των αιωρούμενων σωματιδίων.....	127
<b>8.9.1</b>	Μέτρηση της συγκέντρωσης αιωρούμενων σωματιδίων ΑΣ10 και ΑΣ2.5 με τη χρήση ακτινοβολίας β.....	127
<b>8.9.2</b>	Συσκευές συλλογής με φίλτρο.....	128
<b>8.9.3</b>	Συσκευή συλλογής ΑΣ10 υψηλής παροχής.....	128
<b>8.9.4</b>	Αιθαλόμετρο.....	129
<b>8.9.5</b>	Νεφελόμετρο.....	129
<b>8.9.6</b>	Μετρητής συμπύκνωσης σωματιδίων (Condensation Particle Counter).....	130
<b>8.9.7</b>	Φασματογράφος μεγέθους των σωματιδίων (Scanning Mobility Particle Size Spectrometer – SMPS).....	130

## **ΚΕΦΑΛΑΙΟ 9: ΜΕΤΡΗΣΕΙΣ ΑΝΩΤΕΡΗΣ ΑΤΜΟΣΦΑΙΡΑΣ ΚΑΙ ΜΕΤΡΗΣΕΙΣ**

<b>ΚΑΘ' ΥΨΟΣ</b> .....	<b>132</b>	
<b>9.1</b>	Ραδιοβολίδα (radiosonde).....	132
<b>9.1.1</b>	Γενικά.....	132
<b>9.1.2</b>	Ιστορικά στοιχεία.....	134
<b>9.1.3</b>	Εξαρτήματα της ραδιοβολίδας.....	134
<b>9.2</b>	Δέσμιο αερόστατο (tethered sonde).....	138
<b>9.3</b>	Οζοντοβολίδα (ozonesonde).....	139
<b>9.3.1</b>	Γενικά.....	139
<b>9.3.2</b>	Αρχή Λειτουργίας.....	140
<b>9.3.3</b>	Χημικές αντιδράσεις στον αισθητήρα όζοντος.....	141
<b>9.4</b>	Προσδιορισμός της συγκέντρωσης του όζοντος.....	143
<b>9.5</b>	Τεχνολογίες Επίγειας Τηλεπισκόπησης.....	144
<b>9.5.1</b>	Ακουστικό ραντάρ (SODAR).....	145
<b>9.5.2</b>	Doppler LIDAR.....	148

<b>ΚΕΦΑΛΑΙΟ 10: ΑΤΜΟΣΦΑΙΡΙΚΗ ΤΗΛΕΠΙΣΚΟΠΗΣΗ ΜΕ ΑΚΤΙΝΕΣ LASER</b>	<b>151</b>
10.1 Γενικά.....	151
10.2 Αρχή λειτουργίας του LIDAR.....	151
10.3 Γενική λύση της εξίσωσης του lidar και μέθοδος αντιστροφής του σήματος lidar κατά τη μέθοδο Klett.....	155
10.4 Περιγραφή διάταξης lidar	156
10.5 Σύγχρονες εφαρμογές της τεχνικής lidar.....	158
<b>ΚΕΦΑΛΑΙΟ 11: ΜΕΤΡΗΣΗ ΤΗΣ ΑΤΜΟΣΦΑΙΡΙΚΗΣ ΣΤΗΛΗΣ ΑΕΡΙΩΝ.....</b>	<b>161</b>
11.1 Εφαρμογές της διαφορικής οπτικής απορρόφησης.....	162
11.1.1 Βασικές αρχές.....	162
11.1.2 Μέθοδος DOAS σε ζεύγη μηκών κύματος.....	163
11.1.2.1 Προσδιορισμός της σταθεράς Fo.....	167
11.1.2.2 Διαδικασία εκτέλεσης των μετρήσεων.....	168
11.1.3 Μέθοδος DOAS σε φασματικές μετρήσεις.....	169
11.1.3.1 Διαδικασία εκτέλεσης των μετρήσεων.....	173
11.1.3.2 Μετρήσεις της άμεσης ηλιακής ακτινοβολίας.....	173
11.1.3.3 Μετρήσεις της ακτινοβολίας λυχνίας.....	174
11.1.4 Πλεονεκτήματα και μειονεκτήματα των συστημάτων DOAS.....	176
<b>ΑΠΟΔΟΣΗ ΕΠΙΣΤΗΜΟΝΙΚΩΝ ΟΡΩΝ.....</b>	<b>179</b>



## ΠΙΝΑΚΑΣ ΣΥΝΤΟΜΕΥΣΕΩΝ - ΑΚΡΩΝΥΜΙΑ

CALIPSO	Cloud-Aerosol Lidar and Infrared Pathfinder Satellite Observation
CCD	Charge Coupled Device
CNES	Centre National d'Etudes Spatiales
DOAS	Differential optical absorption spectroscopy
ECMWF	European Centre for Medium-Range Weather Forecasts
EEA	European Environmental Agency
E.P.A	Environmental Protection Agency
ESA	European Space Agency
EU	European Union
FWHM	Full Width at Half Maximum
GAW	Global Atmosphere Watch
GMT	Greenwich Mean Time
GPM	Global Precipitation Measurement
hdf	Hierarchical Data Format
JAXA	Japan Aerospace Exploration Agency
Laser	Light Amplification by Stimulated Emission of Radiation
Lidar	Light detection and ranging
LST	Local Standard Time
NASA	National Aeronautics and Space Administration
NetCDF	Network Common Data Form
NIST	National Institute of Standards and Technology
NPL	National Physical Laboratory
PMT	Photomultiplier Tube
ppm	Parts Per Million
ppb	Parts Per Billion
PTB	Physikalisch-Technische Bundesanstalt
QA/QC	Quality Assurance/Quality Control
Radar	RAdio Detection and Ranging
Sodar	Sound Detection and Ranging
TRMM	Tropical Rainfall Measuring Mission
UTC	Coordinated Universal Time
UV-A	Ultraviolet A
UV-B	Ultraviolet B
WHO	World Health Organization
WMO	World Meteorological Organization
xml	Extensible Markup Language
ΠΟΥ	Παγκόσμιος Οργανισμός Υγείας
E.E.	Ευρωπαϊκή Ένωση

## ΠΡΟΛΟΓΟΣ

Η μέτρηση αποτελεί αναπόσπαστο μέρος της σύγχρονης επιστήμης. Οι μετρήσεις θεωρούνται μια προνομιακή πηγή γνώσης και αποτελούν τον ακρογωνιαίο λίθο της επιστημονικής έρευνας. Η ίδια η Φυσική είναι ουσιαστικά μια πειραματική επιστήμη, με στόχο να προάγει τη γνώση και να βελτιώσει τις θεωρίες για τα παρατηρούμενα φαινόμενα, και η Ατμοσφαιρική επιστήμη δεν αποτελεί εξαίρεση. Κατά συνέπεια, τα όργανα και οι μετρήσεις αποτελούν ένα θεμελιώδες τμήμα της προπτυχιακής και μεταπτυχιακής εκπαίδευσης των Φυσικών γενικότερα, αλλά και αυτών που ασχολούνται με το Ατμοσφαιρικό Περιβάλλον, ειδικότερα.

Το φάσμα των διαθέσιμων φυσικών περιβαλλοντικών δεδομένων συνεχίζει να αυξάνεται, καθώς αναπτύσσονται όλο και πιο προηγμένες τεχνολογίες μέτρησης. Ενώ, όμως, υπάρχει σήμερα μια σχετική αφθονία δεδομένων στον τομέα των Ατμοσφαιρικών επιστημών, είναι απίθανο οι επιστήμονες οι οποίοι ανέπτυξαν τις διατάξεις μέτρησης να ασχοληθούν οι ίδιοι στη συνέχεια με την ανάλυση των αποτελεσμάτων. Αυτή η τάση έχει ως συνέπεια να γίνεται μια βασική διάκριση κατά την προσέγγιση των μετρήσεων. Στην πρώτη προσέγγιση, η εξοικείωση με τις μετρητικές διατάξεις και την πειραματική αβεβαιότητα είναι θεμελιώδους σημασίας, ενώ η δεύτερη προσέγγιση βασίζεται στη βολική αλλά ανεπαρκώς ενημερωμένη συλλογή διαθέσιμων δεδομένων, όπου η ευθύνη για την ποιότητά τους έχει εκχωρηθεί σε άλλους ή είναι εντελώς άγνωστη. Είναι προφανές ότι οι συγγραφείς αυτού του βιβλίου υιοθετούν την πρώτη προσέγγιση.

Το βιβλίο βασίστηκε σε υπάρχουσες Πανεπιστημιακές Σημειώσεις, οι οποίες χρησιμοποιούνταν στη διδασκαλία του θεωρητικού τμήματος του εργαστηριακού μαθήματος της Ατμοσφαιρικής Τεχνολογίας, στην κατεύθυνση Φυσικής Περιβάλλοντος του Τμήματος Φυσικής του Αριστοτέλειου Πανεπιστημίου Θεσσαλονίκης. Το βιβλίο απευθύνεται, κυρίως, σε προπτυχιακούς σπουδαστές των Πανεπιστημίων και των Τεχνολογικών Εκπαιδευτικών Ιδρυμάτων, στα προγράμματα των οποίων υπάρχουν μαθήματα που σχετίζονται με τη Φυσική της Ατμόσφαιρας και του Περιβάλλοντος. Πρόκειται για ένα εισαγωγικό μάθημα και αναγκαστικά περιλαμβάνει ένα ευρύ φάσμα οργάνων και αρχών και όχι μόνον εξειδικευμένες τεχνικές έρευνας. Για την κατανόηση του υλικού που περιλαμβάνεται σε αυτό το βιβλίο δεν είναι απαραίτητες κάποιες προαπαιτούμενες γνώσεις, αλλά είναι χρήσιμο ένα βασικό υπόβαθρο Φυσικής, συμπεριλαμβανομένης της Φυσικής της Ατμόσφαιρας και του Περιβάλλοντος, της Μετεωρολογίας, της Θερμοδυναμικής, των Ηλεκτρονικών, αλλά και της Στατιστικής.

Η ύλη οργανώνεται σε έντεκα αυτοτελή, ως επί το πλείστον, κεφάλαια, τα οποία αποτελούν αυτόνομα μαθησιακά αντικείμενα και μπορούν να μελετηθούν ξεχωριστά. Για τον σκοπό αυτό καταβλήθηκε προσπάθεια για τον περιορισμό, κατά το δυνατό, της γνώσης που προαπαιτείται για την κατανόηση κάθε κεφαλαίου-μαθησιακού αντικειμένου, χωρίς, ωστόσο, να διαταραχθεί η συνέχεια του κειμένου.

Το σύγγραμμα αυτό κυκλοφορεί για πρώτη φορά και είναι βέβαιο ότι περιέχει πολλές ασάφειες, παραλείψεις, λάθη και γλωσσικές ασυνταξίες. Οποιαδήποτε κριτική η οποία θα μπορούσε να συμβάλλει στη βελτίωσή του είναι ευπρόσδεκτη.

### Ευχαριστίες

Στο σημείο αυτό, θα θέλαμε να ευχαριστήσουμε θερμά όλους όσους συνέβαλαν στα διάφορα στάδια της συγγραφής αυτού του βιβλίου: τον Διευθυντή Ερευνών του Εθνικού Αστεροσκοπείου Αθηνών, Δρ. Ευάγγελο Γερασόπουλο, ο οποίος αποδέχθηκε

ευγενικά την κριτική ανάγνωση του κειμένου και βοήθησε σημαντικά με τις εύστοχες παρατηρήσεις του στη βελτίωση της ποιότητας του συγγράμματος. Πολύτιμοι συντελεστές της προσπάθειας ήταν ο Νίκος Σιώμος, η Κωνσταντίνα Τόλια και η Χριστίνα Γκριμότση, οι οποίοι ανέλαβαν την τεχνική επιμέλεια του βιβλίου, καθώς και η Ελένη Τζιάφα, η οποία ανέλαβε τη γλωσσική επιμέλεια του συγγράμματος. Τα κεφάλαια που είχε συγγράψει ο Δρ. Γιάννης Ζιώμας, Καθηγητής ΕΜΠ, σε παλαιότερη έκδοση των αντίστοιχων Πανεπιστημιακών Σημειώσεων, αποτέλεσαν έναν πολύτιμο οδηγό στο παρόν σύγγραμμα. Το ίδιο σημαντική ήταν η βοήθεια από τις σημειώσεις που είχαν γράψει ο Κώστας Ελευθεριάδης, Διευθυντής Ερευνών στο ΕΚΕΦΕ Δημόκριτος και ο Κώστας Κουρτίδης, Αναπληρωτής Καθηγητής στο Δημοκρίτειο Πανεπιστήμιο Θράκης.

Είναι εξαιρετικά δύσκολο να ευχαριστήσουμε ονομαστικά όλους όσους συνέβαλλαν με σχόλια και παρατηρήσεις στη βελτίωση αυτού του συγγράμματος: αν και δεν μπορούμε να τους αναφέρουμε ονομαστικά, απευθύνουμε τις ευχαριστίες μας σε όλους τους συναδέλφους και συνεργάτες στο Εργαστήριο Φυσικής της Ατμόσφαιρας του ΑΠΘ, αλλά και τους φοιτητές που διδάχτηκαν το μάθημα της Ατμοσφαιρικής Τεχνολογίας στο Τμήμα Φυσικής του ΑΠΘ και οι οποίοι προσέφεραν με τη σειρά τους μια πολύτιμη ανατροφοδότηση.

Θα ήταν παράλειψή μας να μην ευχαριστήσουμε τον Σύνδεσμο Ελληνικών Ακαδημαϊκών Βιβλιοθηκών για την οικονομική υποστήριξη της προσπάθειας, αλλά και τη διοικητική και τεχνική τους συνδρομή.

Τέλος, ευχαριστούμε τις συζύγους μας, Έφη, Κλαίρη και Εύα, οι οποίες, όπως πάντα, μας στήριξαν με αγάπη.

Δημήτρης Μελάς, Άλκης Μπάης, Δημήτρης Μπαλής

# ΚΕΦΑΛΑΙΟ 1: ΒΑΣΙΚΕΣ ΑΡΧΕΣ ΤΩΝ ΜΕΤΡΗΣΕΩΝ

## Σύνοψη

Στο κεφάλαιο αυτό εισάγονται κάποιες βασικές έννοιες και μέθοδοι οι οποίες είναι χρήσιμες για την εμπέδωση της ύλης των κεφαλαίων που ακολουθούν. Γίνεται επίσης μια πολύ σύντομη, εισαγωγική αναφορά σε πολύ σημαντικές έννοιες της επιστήμης των μετρήσεων, όπως είναι η αντιπροσωπευτικότητα των μετρήσεων και ο έλεγχος/διασφάλιση της ποιότητας.

## 1.1 Εισαγωγή

### Η ανάγκη για μετρήσεις

«Λέω συχνά ότι, όταν μπορείς να μετρήσεις αυτό για το οποίο μιλάς και να το εκφράσεις με αριθμούς, τότε γνωρίζεις κάτι γι' αυτό: αλλά όταν δεν μπορείς να το μετρήσεις, όταν δεν μπορείς να το εκφράσεις σε αριθμούς, η γνώση σου είναι πενιχρή και ανεπαρκής.  
Μπορεί να είναι η αρχή της γνώσης, αλλά δεν έχεις φθάσει στις σκέψεις σου στο επίπεδο της επιστήμης, οποιοδήποτε και αν είναι το θέμα».  
Λόρδος Kelvin, 1883

Εφόσον πρόκειται για μετεωρολογικές, κλιματολογικές ή περιβαλλοντικές μελέτες, οι μετρήσεις είναι ζωτικής σημασίας. Η γνώση για το τι συνέβη στο παρελθόν, αλλά και της παρούσας κατάστασης, καθώς και η κατανόηση των διεργασιών που εμπλέκονται, μπορεί να επιτευχθεί με την ανάλυση μετρήσεων. Αυτή η γνώση είναι απαραίτητη και για την πρόγνωση των μελλοντικών συμβάντων και, κατόπιν, για τον έλεγχο της ορθότητας των προγνώσεων. Οι μετρήσεις είναι ο ακρογωνιαίος λίθος όλων αυτών.

Αυτά τα οποία θέλουμε να μετρήσουμε ονομάζονται μεταβλητές ή παράμετροι. Οι πιο συνηθισμένες ατμοσφαιρικές μεταβλητές είναι η θερμοκρασία, η υγρασία, η πίεση, η ταχύτητα και η διεύθυνση του ανέμου, η βροχόπτωση και η χιονόπτωση, η ηλιακή και γήινη ακτινοβολία, καθώς και τα επίπεδα συγκεντρώσεων των ρύπων (ποιότητα του αέρα). Για εξοικίωση με τη Μετεωρολογία και τις σημαντικές μετεωρολογικές μεταβλητές προτείνονται τα βιβλία των Σαχσαμάνογλου και Μακρογιάννη (1998) και Ζιακόπουλου (2008).

#### 1.1.1 Παλαιές και νέες τεχνικές

Ο σημαντικότερος περιορισμός των παλαιότερων οργάνων μέτρησης είναι ότι στηρίζονται κυρίως σε μηχανικές τεχνικές μέτρησης και χρειάζονται χειριστές (παρατηρητές) για την πραγματοποίηση των μετρήσεων. Αυτό περιορίζει τη χρήση τους, τόσο χρονικά όσο και γεωγραφικά. Για παράδειγμα, σε μη κατοικημένες περιοχές, όπως οι έρημοι, οι πολιτικές περιοχές και το μεγαλύτερο μέρος των ωκεανών, πραγματοποιούνται ελάχιστες μετρήσεις, ενώ ακόμη και στο περιορισμένο τμήμα της επιφάνειας του πλανήτη για το οποίο υπάρχουν διαθέσιμες μετρήσεις, η χρονική πυκνότητά τους είναι περιορισμένη.

Αντίθετα, τα νέα όργανα μέτρησης χρειάζονται την παρέμβαση κάποιου χειριστή μόνο σε αραιά χρονικά διαστήματα, συνήθως όχι περισσότερο από μία φορά τον μήνα. Ταυτόχρονα, η ανάπτυξη τεχνικών τηλεμεταφοράς και τηλεπισκόπησης επιτρέπει την πραγματοποίηση μετρήσεων, ακόμη και σε περιοχές όπου η πρόσβαση των ανθρώπων είναι πολύ δύσκολη. Τα νέα όργανα καταγράφουν τις μετρήσεις τους σε ψηφιακή μορφή, διευκολύνοντας την αποθήκευση, μεταφορά και επεξεργασία τους. Με τη χρήση της τηλεμεταφοράς (η οποία σήμερα γίνεται και με τη χρήση κινητών τηλεφώνων) δεν είναι απαραίτητη η επίσκεψη στον σταθμό μέτρησης για τη συλλογή των μετρήσεων, οι οποίες είναι διαθέσιμες σε πραγματικό χρόνο στον σταθμό συλλογής τους. Όλα αυτά, βέβαια, έχουν ως αποτέλεσμα τη μείωση του κόστους των μετρήσεων, κυρίως λόγω του περιορισμού του απαιτούμενου χρόνου εργασίας.

Τα καινούργια όργανα μέτρησης έχουν, συνήθως, καλύτερα τεχνικά χαρακτηριστικά (όπως ακρίβεια και απόκριση) σε σχέση με παλαιότερες τεχνικές. Ως παράδειγμα μπορεί να αναφερθεί ότι τα ηλεκτρικά θερμόμετρα έχουν μικρότερη χρονική σταθερά σε σύγκριση με τα υδραργυρικά θερμόμετρα, τα οποία χρησιμοποιούνταν παλαιότερα. Παράλληλα, αυτό αποτελεί εμπόδιο σε ορισμένες περιπτώσεις, όσον αφορά την αντικατάσταση των παλαιότερων οργάνων με νεότερα, γιατί, παρά τη βελτίωση της ακρίβειας των μετρήσεων, χάνεται η συνέχεια των παλαιών χρονοσειρών. Αυτός είναι ένας από τους λόγους για τους οποίους οι παλαιότερες μέθοδοι μέτρησης παραμένουν. Ένας άλλος λόγος είναι το γεγονός ότι πολλά από τα παλαιότερα όργανα χρησιμοποιούνται ως μέθοδοι αναφοράς, π.χ. τα υδραργυρικά βαρόμετρα. Για τους λόγους αυτούς, συνυπάρχουν σήμερα τόσο παλαιότερες όσο και νέες τεχνικές μέτρησης. Στα επόμενα κεφάλαια θα ασχοληθούμε και με τις δύο αυτές κατηγορίες οργάνων.

Υπάρχει σήμερα στη διεθνή βιβλιογραφία ένας σημαντικός αριθμός βιβλίων που εστιάζει στην περιγραφή τόσο των παλαιότερων όσο και των σύγχρονων τεχνικών μέτρησης. Αξίζει να αναφερθούν τα βιβλία των Brock and Richardson (2001), DeFelice (1998), Emeis (2010), Fritschen and Gay (1979), Heard (2007), Lenschow (1986), Meteorological Office (2008), Strangeways (2003), Wang and Felton (1975) και WMO (2008). Τα βιβλία αυτά αποτελούν πολύτιμη πηγή για όσους επιθυμούν να εμβαθύνουν στο αντικείμενο.

### 1.1.2 Αντιπροσωπευτικότητα μέτρησης

Ο όρος αντιπροσωπευτικότητα (representativeness) χρησιμοποιείται στην περιβαλλοντική μετεωρολογία για να δηλώσει κατά πόσο η μέτρηση μίας παραμέτρου γίνεται με όργανα, τα οποία αφενός διαθέτουν την απαιτούμενη ακρίβεια και ευαισθησία και αφετέρου έχουν τοποθετηθεί σε τέτοιο σημείο, ώστε να είναι χρήσιμα για τον συγκεκριμένο σκοπό για τον οποίο πραγματοποιούνται. Για τον λόγο αυτό, η αντιπροσωπευτικότητα δεν είναι σταθερή ιδιότητα μιας ορισμένης μέτρησης, αλλά προκύπτει από τη συνεκτίμηση των οργάνων μέτρησης, το χρονικό διάστημα της μέτρησης και την έκθεση, σε σύγκριση με τις απαιτήσεις μιας συγκεκριμένης εφαρμογής. Για παράδειγμα, μετρήσεις της περιφερειακής ρύπανσης θα πρέπει τυπικά να είναι αντιπροσωπευτικές μιας περιοχής μερικών δεκάδων χιλιομέτρων γύρω από τον σταθμό. Ωστόσο, όταν πρόκειται για τοπική ή αστική κλίμακα, η υπό εξέταση περιοχή έχει διαστάσεις λίγων χιλιομέτρων. Ένα χαρακτηριστικό παράδειγμα είναι οι μετρήσεις του ανέμου, οι οποίες πραγματοποιούνται κοντά σε μια βιομηχανική εγκατάσταση για τον υπολογισμό της οριζόντιας μεταφοράς του θυσάνου στην ατμόσφαιρα. Οι μετρήσεις θα πρέπει να πληρούν τα παρακάτω χαρακτηριστικά, προκειμένου να θεωρηθούν αντιπροσωπευτικές για τον συγκεκριμένο σκοπό για τον οποίο πραγματοποιούνται:

- Να γίνονται σε σημεία τα οποία βρίσκονται μακριά από τυχόν εμπόδια, τα οποία μπορεί να διαταράξουν το πεδίο ανέμων. Αυτός ο κανόνας είναι γενικός και αφορά, πλην πολύ ειδικών περιπτώσεων, όλες τις μετρήσεις ανέμου στην ατμόσφαιρα.
- Η μέτρηση του ανέμου θα πρέπει να γίνεται κατά κανόνα στο ίδιο ύψος στο οποίο βρίσκεται ο κεντρικός άξονας του θυσάνου. Για πρακτικούς λόγους, ο κανόνας αυτός παραβιάζεται στις περισσότερες περιπτώσεις, όπου, συνήθως, το ύψος μέτρησης του ανέμου είναι τα 10 m. Σε αυτές τις περιπτώσεις, χρησιμοποιούνται συνήθως ημι-εμπειρικές σχέσεις για τον υπολογισμό της κατακόρυφης κατανομής του ανέμου. Η προσέγγιση αυτή μπορεί να γίνει αποδεκτή μόνο στην περίπτωση που οι μετρήσεις πραγματοποιούνται σε περιοχή χωρίς έντονο ανάγλυφο και ομοιογενή χαρακτηριστικά εδάφους, τα οποία δεν ευνοούν την ανάπτυξη τοπικών κυκλοφοριών.
- Το ανεμόμετρο που θα χρησιμοποιηθεί πρέπει να έχει χαμηλό κατώφλι ( $0.5 \text{ ms}^{-1}$ ) και να έχει καλή ακρίβεια, ιδιαίτερα σε χαμηλές ταχύτητες ανέμου, οι οποίες παρουσιάζουν και το μεγαλύτερο ενδιαφέρον σε θέματα ατμοσφαιρικής ρύπανσης.
- Η ταχύτητα του ανέμου θα πρέπει να αποθηκεύεται ως μέση τιμή μίας χρονικής περιόδου, η οποία είναι ίση ή ακέραιο υποπολλαπλάσιο της χρονικής κλίμακας για την οποία ενδιαφερόμαστε. Για παράδειγμα, αν η μελέτη της διασποράς αφορά ωριαίες τιμές, τότε οι τιμές του ανέμου θα πρέπει να αφορούν μέσες τιμές αντιστοίχων χρονικών περιόδων. Όσον αφορά τη διεύθυνση του ανέμου, συλλέγονται, συνήθως, στιγμιαίες τιμές.

Πολύ συχνά αντιμετωπίζουμε το πρόβλημα ότι δεν υπάρχουν διαθέσιμα στην περιοχή στην οποία πραγματοποιούμε μια μελέτη τα απαραίτητα μετεωρολογικά στοιχεία, και, συνεπώς, είμαστε αναγκασμένοι να χρησιμοποιήσουμε μετρήσεις που πραγματοποιήθηκαν σε γειτονική περιοχή. Το ερώτημα που προκύπτει είναι κατά πόσο οι μετρήσεις αυτές είναι αντιπροσωπευτικές για την περιοχή που αποτελεί το αντικείμενο του ενδιαφέροντός μας. Τα κριτήρια που χρησιμοποιούνται σε αυτή την περίπτωση είναι πολλά και, γενικά, απαιτείται κάποια εμπειρία στην εφαρμογή τους. Το πρώτο πράγμα που θα πρέπει να εξετάσει κανείς είναι κατά πόσο είχαν εκτελεστεί παλαιότερα ταυτόχρονες μετρήσεις στις δύο περιοχές. Η συγκρισιμότητα των δύο χρονοσειρών μπορεί να δώσει την απάντηση στο προηγούμενο ερώτημα. Γενικά, όμως, δεν υπάρχει αυτή η πολυτέλεια και η αντιπροσωπευτικότητα των μετρήσεων θα πρέπει να κριθεί χρησιμοποιώντας άλλα κριτήρια, όπως:

- την απόσταση ανάμεσα στις δύο περιοχές,
- τα παρεμβαλλόμενα εμπόδια, όπως λόφοι, ορεινοί όγκοι κτλ.,
- την τοπογραφία των δύο περιοχών,
- την ίδια την παράμετρο: π.χ. ο άνεμος είναι πιο ευαίσθητος σε τοπικές επιδράσεις,
- τα χαρακτηριστικά της επιφάνειας της γης, π.χ. τραχύτητα, βλάστηση κτλ.,
- το ύψος μέτρησης.

### 1.1.3 Έλεγχος/διασφάλιση ποιότητας

Προκειμένου να είναι χρήσιμα, τα δεδομένα τα οποία συλλέγονται στους σταθμούς μέτρησης της ποιότητας αέρα θα πρέπει να πληρούν κάποια πρότυπα αξιοπιστίας και α-

κρίβειας. Η εξασφάλιση αυτών των προϋποθέσεων απαιτεί την εφαρμογή ορισμένων διαδικασιών, οι οποίες είναι γνωστές με τα αρχικά QA/QC (Quality Assurance/Quality Control, διασφάλιση ποιότητας / έλεγχος ποιότητας).

Ο έλεγχος ποιότητας ορίζεται ως το σύστημα των επιχειρησιακών διαδικασιών, οι οποίες θα ακολουθούνται σε συνεχή βάση κατά τη διάρκεια της λειτουργίας του σταθμού, ώστε να εξασφαλίζουν ότι η διαδικασία μέτρησης λειτουργεί σωστά. Αυτές οι διαδικασίες περιλαμβάνουν:

- περιγραφή των μεθόδων που χρησιμοποιήθηκαν για τη συλλογή και ανάλυση,
- περιοδική βαθμονόμηση των οργάνων,
- επιθεώρηση της θέσης μέτρησης,
- έλεγχο των δεδομένων,
- επαλήθευση των δεδομένων,
- προληπτική συντήρηση,
- τεκμηρίωση των ενεργειών για την εξασφάλιση της ποιότητας των μετρήσεων.

Από την άλλη πλευρά, η διασφάλιση ποιότητας περιλαμβάνει τις διαδικασίες που πραγματοποιούνται περισσότερο σε περιστασιακή βάση και οι οποίες παρέχουν τη διασφάλιση ότι η διαδικασία των μετρήσεων παράγει δεδομένα του τύπου και της ποιότητας που χρειάζονται για τον σκοπό για τον οποίο πραγματοποιούνται.

Η διασφάλιση ποιότητας περιλαμβάνει εξωτερικούς ελέγχους (audits), οι οποίοι ασκούνται, συνήθως, από άτομα που δεν συμμετέχουν στις συνήθεις επιχειρησιακές διαδικασίες. Οι εξωτερικοί έλεγχοι περιλαμβάνουν τα παρακάτω:

- αξιολόγηση της εφαρμογής των διαδικασιών του ελέγχου ποιότητας (system audits). Η αξιολόγηση περιλαμβάνει μια συστηματική επιτόπια εξέταση των εγκαταστάσεων, του εξοπλισμού, της εκπαίδευσης του προσωπικού, την καταγραφή, την επαλήθευση και την αναφορά του συστήματος.
- εκτίμηση της απόδοσης των οργάνων μέτρησης (performance audits).

#### **1.1.4 Μεταδεδομένα**

Παρά το γεγονός ότι γίνεται προσπάθεια να εξασφαλισθεί η αξιοπιστία των μετρήσεων μέσα από την τυποποίηση, σε πολλές περιπτώσεις οι τοπικές συνθήκες και περιστάσεις μπορούν να προκαλέσουν αποκλίσεις από τις προτεινόμενες διατάξεις μέτρησης. Για παράδειγμα, σε περιοχές με πολύ χιόνι τα όργανα τοποθετούνται υψηλότερα, ώστε να είναι χρήσιμα τόσο το χειμώνα όσο και το καλοκαίρι (WMO, 2008).

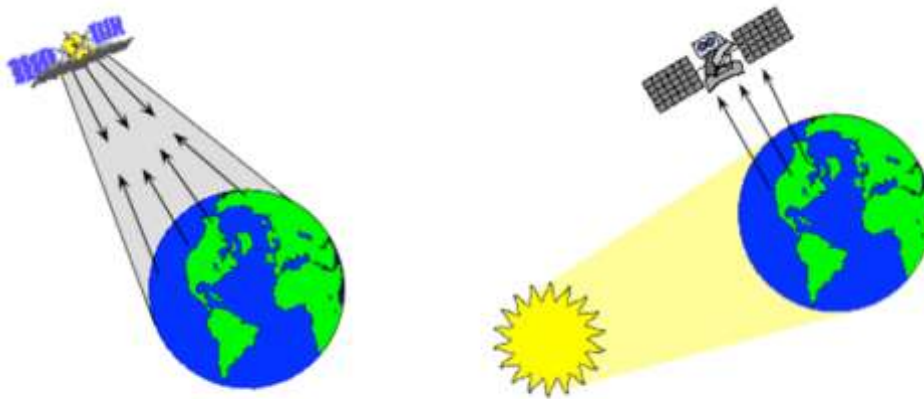
Οι χρήστες των ατμοσφαιρικών μετρήσεων χρειάζεται να γνωρίζουν την πραγματική κατάσταση και έκθεση του εξοπλισμού και, πιθανόν, τις συνθήκες των μετρήσεων. Αυτό έχει ιδιαίτερη σημασία σε εφαρμογές όπως η παρακολούθηση της ποιότητας του αέρα, όπου, για παράδειγμα, η ακριβής θέση του σταθμού είναι καθοριστικής σημασίας για τον προσδιορισμό της χρονικής τάσης των επιπέδων ρύπανσης. Τα μεταδεδομένα είναι δεδομένα σχετικά με τα δεδομένα, τα οποία είναι απαραίτητα να τηρούνται σε κάθε σταθμό μέτρησης. Τα μετα-δεδομένα αφορούν τη συνολική επιχείρηση και συντήρηση του σταθμού και περιλαμβάνουν πληροφορίες για όποιες αλλαγές έχουν λάβει χώρα, όπως η βαθμονόμηση και η συντήρηση, καθώς και αυτές που αφορούν την έκθεση των

μετρήσεων. Τα μεταδεδομένα είναι ιδιαίτερα χρήσιμα για δεδομένα ευαίσθητα στην έκθεση του εξοπλισμού, όπως είναι οι συγκεντρώσεις των ρύπων, ο υετός και ο άνεμος.

### 1.1.5 Επιτόπιες μετρήσεις και τηλεπισκόπηση

Γενικά, μπορούμε να ταξινομήσουμε τις μετρήσεις σε δύο ευρείες κατηγορίες:

1. Άμεσες ή επιτόπιες μετρήσεις, στις οποίες ο αισθητήρας είναι τοποθετημένος στο σημείο όπου γίνονται οι μετρήσεις. Παραδείγματα επιτόπιων μετρήσεων είναι η μέτρηση της θερμοκρασίας με υδραργυρικό ή θερμόμετρο αντίστασης, του ανέμου με ανεμόμετρο κυπέλου ή της συγκέντρωσης του όζοντος με αναλυτή.
2. Τηλεπισκόπηση, στην οποία ο αισθητήρας βρίσκεται μακριά από την περιοχή μέτρησης. Η μέτρηση βασίζεται σε ανίχνευση κυμάτων, τα οποία δημιουργήθηκαν ή τροποποιήθηκαν από τα μετρούμενα μεγέθη στην περιοχή μέτρησης. Οι συσκευές τηλεπισκόπησης χωρίζονται σε δύο κατηγορίες (Σχήμα 1.1):
  - Τις συσκευές ενεργούς τηλεπισκόπησης, οι οποίες παράγουν τα δικά τους κύματα. Το μετρητικό σύστημα εκπέμπει ακτινοβολία, η οποία κατευθύνεται στον στόχο που διερευνάται. Η ακτινοβολία ανακλάται από αυτόν τον στόχο και ανιχνεύεται και μετριέται από τον αισθητήρα.
  - Τις συσκευές παθητικής τηλεπισκόπησης, οι οποίες ανιχνεύουν την ακτινοβολία που προέρχεται από φυσικές πηγές, όπως είναι η ακτινοβολία της γης, της ατμόσφαιρας ή του ήλιου. Η ηλιακή ακτινοβολία είτε ανακλάται, όπως στην περίπτωση του ορατού τμήματος του φάσματος, είτε απορροφάται και επανεκπέμπεται, όπως συμβαίνει με το υπέρυθρο.



Σχήμα 1.1 Ενεργή (αριστερά) και παθητική (δεξιά) δορυφορική τηλεπισκόπηση.

## 1.2 Χαρακτηριστικά αισθητήρων

### 1.2.1 Γενικά στοιχεία μέτρησης

Προκειμένου να πραγματοποιήσουμε μετεωρολογικές μετρήσεις, χρειαζόμαστε τουλάχιστον τις παρακάτω τρεις συνιστώσες:



1. Έναν ανιχνευτή ή αισθητήρα: συνήθως πρόκειται για μια συσκευή, της οποίας τα φυσικά χαρακτηριστικά (μέγεθος, αντίσταση κτλ.) αλλάζουν, ως συνάρτηση της μεταβλητής που μετρείται. Στα κεφάλαια που ακολουθούν περιγράφεται ένας μεγάλος αριθμός αισθητήρων που χρησιμοποιούνται για ατμοσφαιρικές εφαρμογές. Το σήμα από τον αισθητήρα είναι αναλογικό.
2. Έναν ψηφιοποιητή: η μετατροπή αναλογικού σε ψηφιακό (A/D) μετατρέπει το αναλογικό σήμα από τον αισθητήρα σε ψηφιακή πληροφορία. Η μετατροπή αυτή είναι απαραίτητη, προκειμένου να μπορέσει το σύστημα συλλογής δεδομένων να επεξεργαστεί ή να αποθηκεύσει τα σήματα.
3. Ένα σύστημα συλλογής/καταγραφής δεδομένων: ανάλογα με τις ανάγκες, πρόκειται συνήθως για έναν ηλεκτρονικό υπολογιστή (PC) ή έναν ηλεκτρονικό καταγραφέα δεδομένων (data logger). Παλιότερα, η καταγραφή των δεδομένων γινόταν κυρίως σε χαρτί. Τα συμβατικά καταγραφικά αντικαταστάθηκαν σταδιακά από ηλεκτρονικούς καταγραφείς ενώ τα τελευταία χρόνια χρησιμοποιούνται ευρέως συστήματα ελέγχου και συλλογής δεδομένων που βασίζονται σε ηλεκτρονικούς υπολογιστές. Πιο συγκεκριμένα η συλλογή/καταγραφή των δεδομένων γίνεται:
  - Σε ηλεκτρονικό υπολογιστή: Όπως προαναφέρθηκε, προκειμένου να μπορεί η μέτρηση να καταγραφεί στον ηλεκτρονικό υπολογιστή, πρέπει η έξοδος του οργάνου μέτρησης, το οποίο συνήθως είναι ένα αναλογικό ηλεκτρικό σήμα (ρεύμα ή τάση), να μετατραπεί σε ψηφιακό. Αυτό επιτυγχάνεται με τη προσθήκη μιας κάρτας μετατροπής αναλογικού σήματος σε ψηφιακό. Κατόπιν, με τη χρήση κατάλληλου λογισμικού (software), είναι δυνατή η συνεχής συλλογή και αποθήκευση των μετρήσεων σε μορφή αναγνώσιμη και επεξεργάσιμη. Έχει ληφθεί ιδιαίτερη μέριμνα κατά τον σχεδιασμό τους, ώστε τα συστήματα αυτά να είναι ιδιαίτερα φιλικά στον χειρισμό τους, εύχρηστα, με ευέλικτη δομή, μεγάλη δυνατότητα δικτύωσης και δυνατότητες λειτουργίας, ακόμη και κάτω από δύσκολες συνθήκες.
  - Σε ηλεκτρονικούς καταγραφείς δεδομένων (data loggers): Οι καταγραφείς δεδομένων είναι μικρές φορητές διατάξεις, οι οποίες μετατρέπουν και αυτές το σήμα σε ψηφιακό και το αποθηκεύουν σε μια ενσωματωμένη μονάδα μνήμης. Έχουν σχετικά περιορισμένη χωρητικότητα (σε σχέση με έναν ηλεκτρονικό υπολογιστή) οπότε η αυτονομία τους εξαρτάται από το χρονικό βήμα καταχώρησης των μετρήσεων, καθώς και από το πλήθος των προς αποθήκευση παραμέτρων. Χρησιμοποιούνται κυρίως σε σταθμούς με περιορισμένες απαιτήσεις σε χωρητικότητα και επεξεργασία στοιχείων. Για την ανάγνωση των στοιχείων που αποθηκεύονται σε έναν καταγραφέα δεδομένων απαιτείται ένας ηλεκτρονικός υπολογιστής, όπου μεταφέρονται τα στοιχεία, και στη συνέχεια το κατάλληλο λογισμικό για τη μετατροπή τους σε αναγνώσιμη και επεξεργάσιμη μορφή.

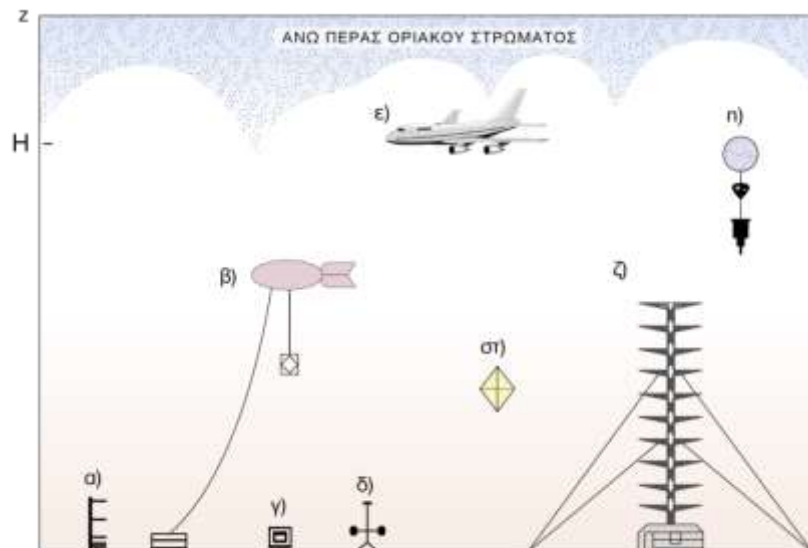
Το κύριο πλεονέκτημα αυτών των συσκευών είναι η μικρή και συμπαγής συσκευασία, η οποία τους επιτρέπει να καταλαμβάνουν μικρό χώρο, να μεταφέρονται εύκολα και να μπορούν να τοποθετηθούν σε δυσπρόσιτα σημεία. Επίσης, οι ηλεκτρονικοί καταγραφείς έχουν χαμηλές ενεργειακές απαιτήσεις και μπορούν, σε ορισμένες περιπτώσεις, να λειτουργήσουν και μήνες χωρίς φόρτιση των μπαταριών τους.

- Σε συμβατικά καταγραφικά: Τα συμβατικά καταγραφικά αποτελούνται, συνήθως, από μια γραφίδα συνδεδεμένη ηλεκτρικά με την έξοδο του οργάνου ή μηχανικά με μία ακίδα και ένα μηχανισμό προώθησης του χαρτιού καταγραφής με σταθερό ρυθμό. Πάνω στο χαρτί, το οποίο είναι ειδικά διαγραμμισμένο, καταγράφεται η κίνηση της γραφίδας, η οποία είναι ανάλογη του σήματος που λαμβάνει από το όργανο μέτρησης. Η χρήση τους περιορίζεται πλέον σε παλιούς σταθμούς και συνδέονται συνήθως με όργανα παλιάς τεχνολογίας.
- Τηλεμεταφορά δεδομένων: Η ανάπτυξη των ενσύρματων (διαδίκτυο) και ασύρματων επικοινωνιών (κινητή τηλεφωνία, δορυφορικές συνδέσεις) καθιστά δυνατή την αποστολή σε πραγματικό χρόνο των μετρήσεων από το όργανο μέτρησης σε μονάδα αποθήκευσης που βρίσκεται σε μεγάλη απόσταση από τον σταθμό μέτρησης. Χρησιμοποιείται κυρίως για σταθμούς με δυσχερή πρόσβαση ή για δεδομένα τα οποία χρησιμοποιούνται επιχειρησιακά.

Το παραπάνω πακέτο μέτρησης θα πρέπει, κατά περίπτωση, να συμπληρώνεται από τα παρακάτω:

- Μία πλατφόρμα μέτρησης για την τοποθέτηση των αισθητήρων και, ενδεχομένως, των υπόλοιπων εξαρτημάτων. Οι κυριότερες πλατφόρμες μέτρησης παρουσιάζονται παρακάτω.
- Έναν βαθμονομητή: Οι αισθητήρες χρειάζονται περιοδική ή συνεχή βαθμονόμηση, ως απαραίτητο τμήμα της διαδικασίας διασφάλισης της ποιότητας των μετρήσεων που πραγματοποιούνται.

Οι μετεωρολογικές παράμετροι παρουσιάζουν μεγάλες μεταβολές μέσα στο ατμοσφαιρικό οριακό στρώμα, ανάλογα με το ύψος. Προκειμένου να μετρήσουμε σε διάφορα ύψη, χρησιμοποιούμε διάφορες πλατφόρμες μέτρησης, επάνω στις οποίες εγκαθίστανται τα όργανα μέτρησης. Οι κυριότερες πλατφόρμες μέτρησης παρουσιάζονται σε σχηματική μορφή στο σχήμα 1.2 (Stull, 1988).



**Σχήμα 1.2** Πλατφόρμες μέτρησης στο ατμοσφαιρικό οριακό στρώμα: α) χαμηλός ιστός, β) δέσιμο αερόστατο, γ) μετεωρολογικός κλωβός, δ) φορητός σταθμός, ε) αεροπλάνο, στ) μπαλόνι, ζ) μετεωρολογικός πύργος και η) ραδιοβολίδα.

Η επιλογή της πλατφόρμας πρέπει να λαμβάνει υπόψη πολλές διαφορετικές παραμέτρους, όπως την τοποθεσία και το ύψος των μετρήσεων, το αν η πλατφόρμα θα πρέπει να είναι σταθερή ή κινητή, το κόστος και την έκθεση. Όλες οι πλατφόρμες αλληλεπιδρούν με την ατμόσφαιρα και επηρεάζουν, σε μικρότερο ή μεγαλύτερο βαθμό, την έκθεση των οργάνων. Το πρόβλημα είναι, συνήθως, μεγαλύτερο κατά τη μέτρηση του ανέμου, λόγω της διαταραχής του πεδίου των ανέμων από την πλατφόρμα μέτρησης.

### 1.2.2 Στατικά χαρακτηριστικά των αισθητήρων

Τα χαρακτηριστικά του αισθητήρα μπορεί να ταξινομηθούν είτε ως στατικά είτε ως δυναμικά (Αργυρίου, 2004, Brock & Richardson, 2001). Τα στατικά χαρακτηριστικά των αισθητήρων αναφέρονται στην κατάσταση κατά την οποία έχει επέλθει ισορροπία μεταξύ του αισθητήρα και του μετρούμενου μεγέθους. Για να επιτευχθεί κάτι τέτοιο, πρέπει το μετρούμενο μέγεθος είτε να είναι σταθερό είτε να μεταβάλλεται πολύ αργά, σε σύγκριση με τη δυνατότητα του αισθητήρα να αντιληφθεί τη μεταβολή αυτή.

- **Ακρίβεια**

Η ακρίβεια είναι η ικανότητα ενός συστήματος να δίνει αποτελέσματα ταυτόσημα με την πραγματική τιμή της μετρήσιμης ποσότητας. Ως ανακρίβεια ορίζεται η απόκλιση της μέτρησης του αισθητήρα από την πραγματική τιμή του εξωτερικού ερεθίσματος. Είναι το αθροιστικό αποτέλεσμα άλλων χαρακτηριστικών, όπως της υστέρησης και των σφαλμάτων βαθμονόμησης. Μπορεί να εκφραστεί ως απόλυτη τιμή του σφάλματος μέτρησης, ως ποσοστό της κλίμακας εισόδου ή ως ποσοστό της κλίμακας εξόδου.

- **Πιστότητα**

Με τον όρο πιστότητα αποδίδεται ο αγγλικός όρος “accuracy”. Η πιστότητα δε σχετίζεται με τον αριθμό των δεκαδικών ψηφίων με τον οποίο μπορεί να γίνει η μέτρηση, αλλά με το κατά πόσο το αποτέλεσμα που δίνει ο αισθητήρας πλησιάζει τη φυσική πραγματικότητα, μέσα σε ένα λογικό εύρος τιμών. Η πιστότητα δίνεται συνήθως ως ποσοστό επί του εύρους λειτουργίας του αισθητήρα. Αν, για παράδειγμα, ένας αισθητήρας πίεσης, περιοχής λειτουργίας 0-10 bar έχει πιστότητα  $\pm 1,0\%$  της πλήρους κλίμακας, τότε το μέγιστο σφάλμα του αισθητήρα θα είναι ίσο με 0,1 bar. Για τον λόγο αυτό, θα πρέπει το εύρος λειτουργίας των αισθητήρων να είναι όσο το δυνατόν εγγύτερα στο εύρος των μετρούμενων τιμών, ώστε να εξασφαλίζεται η μέγιστη δυνατή πιστότητα των μετρήσεων. Αν, δηλαδή, έχουμε μια εφαρμογή, στην οποία οι πιέσεις μεταβάλλονται στο διάστημα 0-1 bar, είναι λάθος να επιλέξουμε αισθητήρα περιοχής λειτουργίας 0-10 bar.

- **Ευαισθησία**

Η ευαισθησία (sensitivity) ορίζεται ως ο λόγος της μεταβολής της εξόδου προς την αντίστοιχη μεταβολή εισόδου. Οι μονάδες στις οποίες εκφράζεται η ευαισθησία ποικίλουν, ανάλογα με τη μετρούμενη ποσότητα και τη φύση του αισθητήρα.

Η ευαισθησία ενός αισθητήρα ορίζεται, επίσης, ως η παράγωγος της συνάρτησης μεταφοράς ως προς τη μετρήσιμη φυσική ποσότητα για μια ορισμένη τιμή της ποσότητας αυτής. Για μια γραμμική συνάρτηση μεταφοράς η ευαισθησία του αισθητήρα είναι γραμμική. Ένας αισθητήρας με ιδανικά χαρακτηριστικά έχει μεγάλη και σταθερή ευαισθησία.

- **Διακριτική Ικανότητα**

Ορίζεται ως η ελάχιστη μεταβολή της μετρήσιμης φυσικής ποσότητας που χρειάζεται για να παρατηρηθεί ανιχνεύσιμη μεταβολή στο σήμα εξόδου. Η ελάχιστη μεταβολή της μετρήσιμης ποσότητας από το μηδέν ορίζεται ως όριο της διακριτικής ικανότητας.

- **Κατώφλι**

Αν το σήμα εισόδου ενός αισθητήρα αυξάνεται σταδιακά ξεκινώντας από μηδενική τιμή, αυτό θα πρέπει να λάβει μία ορισμένη –μη μηδενική– τιμή πριν ο αισθητήρας δώσει κάποιο μη μηδενικό σήμα εξόδου. Αυτή η ελάχιστη τιμή του σήματος εισόδου ονομάζεται κατώφλι του αισθητήρα. Το κατώφλι συνήθως δίνεται ως απόλυτη τιμή αλλά σε κάποιες περιπτώσεις μπορεί να εκφραστεί και ως ποσοστό του εύρους εξόδου του αισθητήρα.

Σαν ένα παράδειγμα για την έννοια της τιμής κατωφλίου μπορούμε να αναφέρουμε τα ανεμόμετρα κυπέλου και προπέλας. Η μέτρηση με αυτά τα ανεμόμετρα βασίζεται στην κινητική ενέργεια του αέρα η οποία εξαρτάται από το τετράγωνο της ταχύτητας του ανέμου. Όταν η ταχύτητα του ανέμου είναι πολύ χαμηλή δεν υπάρχει αρκετή δύναμη για να υπερνικήσει την εσωτερική τριβή του οργάνου. Υπάρχει λοιπόν μια τιμή της ταχύτητας του ανέμου (κατώφλι), κάτω από την οποία το ανεμόμετρο δεν θα γυρίζει.

- **Εύρος**

Το εύρος τιμών ενός αισθητήρα είναι το διάστημα τιμών μέσα στο οποίο μπορεί να μεταβάλλεται η είσοδος του αισθητήρα (μετρούμενη φυσική μεταβλητή), ώστε ο αισθητήρας να δίνει αξιόπιστες μετρήσεις.

- **Νεκρή ζώνη**

Ως νεκρή ζώνη (dead-band) αναφέρεται το εύρος τιμών του σήματος εισόδου, για το οποίο δεν προκαλείται αλλαγή στο σήμα εξόδου. Σε αυτό το εύρος το σήμα στην έξοδο διατηρεί μία σταθερή τιμή, η οποία είναι, συνήθως, το μηδέν. Οι νεκρές ζώνες προκαλούνται, κυρίως, εξαιτίας της υστέρησης ή της στατικής τριβής.

- **Υστέρηση**

Η υστέρηση (hysteresis) εκφράζει την απόκλιση της τιμής εξόδου για συγκεκριμένη τιμή του σήματος εισόδου, όταν η κατεύθυνση της μεταβολής στην είσοδο αντιστραφεί. Για παράδειγμα, όπως συμβαίνει σε έναν αισθητήρα μετατόπισης όταν το αντικείμενο κινείται αρχικά δεξιόστροφα και μετά αριστερόστροφα. Το σφάλμα που παράγεται με αυτόν τον τρόπο επηρεάζει την ακρίβεια της συσκευής. Παράγοντες που προκαλούν φαινόμενα υστέρησης είναι, συνήθως, η τριβή, η μηχανική τάση και οι αλλαγές στη δομή των χρησιμοποιούμενων υλικών.

- **Ολίσθηση**

Ολίσθηση (drift) είναι η αργή μεταβολή του σήματος εξόδου του αισθητήρα, ενώ το μετρούμενο φυσικό μέγεθος παραμένει σταθερό. Μπορεί να οφείλεται σε παράγοντες, όπως η θερμοκρασία λειτουργίας, υγρασία κτλ. Στους αισθητήρες που χρησιμοποιούνται σε ατμοσφαιρικές μετρήσεις σημαντικότερη είναι η μακροχρόνια ολίσθηση, η οποία είναι η μεταβολή των χαρακτηριστικών του αισθητήρα με την πάροδο μεγάλου χρονικού διαστήματος και μπορεί να οφείλεται στην γήρανση των υλικών κατασκευής και σε άλλους παράγοντες, όπως, η διάβρωση τμημάτων του αισθητήρα, η ρύπανση του αισθητήρα κτλ.

- **Επαναληψιμότητα/Αναπαραγωγιμότητα**

Η επαναληψιμότητα μιας συσκευής είναι ο βαθμός στον οποίο αυτή παράγει το ίδιο αποτέλεσμα, όταν σε διαφορετικές χρονικές στιγμές τροφοδοτείται με την ίδια ακριβώς είσοδο. Δεν θα πρέπει να συγχέεται με τον όρο ακρίβεια, διότι ένας αισθητήρας μπορεί να έχει υψηλή επαναληψιμότητα και να δίνει παρόμοια έξοδο όταν μετρά πολλές φορές μία συγκεκριμένη είσοδο, αλλά, εάν υπάρχει σημαντικό σφάλμα στην έξοδο, τότε η έξοδος δεν είναι ακριβής.

Ο όρος αναπαραγωγιμότητα χρησιμοποιείται ως συμπληρωματικός του όρου επαναληψιμότητα, όπου η μεν επαναληψιμότητα αναφέρεται σε σταθερές συνθήκες μέτρησης, η δε αναπαραγωγιμότητα σε μεταβαλλόμενες συνθήκες μέτρησης.

- **Σφάλματα βαθμονόμησης**

Τα σφάλματα βαθμονόμησης οφείλονται στην κακή βαθμονόμηση του αισθητήρα. Έτσι, αν η βαθμονόμηση δεν γίνει αναλυτικά (για κάθε σημείο της συνάρτησης μεταφοράς), αλλά για λίγα μόνο αντιπροσωπευτικά σημεία, προκύπτει ένα συστηματικό σφάλμα. Τα σφάλματα βαθμονόμησης μπορεί, επίσης, να σχετίζονται με την ανακρίβεια στη γνώση της μετρήσιμης φυσικής ποσότητας κατά τη βαθμονόμηση ή τη λανθασμένη καταγραφή της απόκρισης του αισθητήρα στην αλλαγή αυτής της ποσότητας.

- **Συστηματικό σφάλμα**

Ως συστηματικό σφάλμα (bias) ορίζεται ένα σταθερό σφάλμα, το ίδιο για όλο το εύρος του αισθητήρα, το οποίο, συνήθως, μπορεί να μηδενιστεί μέσω βαθμονόμησης. Χαρακτηριστικό παράδειγμα συστηματικού σφάλματος εμφανίζεται στις οικιακές ζυγαριές, οι οποίες μπορεί να δείχνουν μη μηδενική ένδειξη, ακόμη και χωρίς φορτίο. Αυτή η μη μηδενική ένδειξη αποτελεί το συστηματικό σφάλμα, το οποίο πρέπει να αφαιρέσουμε από την ένδειξη που παίρνουμε κατά τη μέτρηση, ώστε να προκύψει η πραγματική τιμή.

### 1.2.3 Δυναμικά χαρακτηριστικά των αισθητήρων

Η απόκριση ενός αισθητήρα σε ένα μεταβλητό σήμα εισόδου είναι διαφορετική από την απόκριση σε ένα σταθερό σήμα εισόδου. Η απόκριση χαρακτηρίζεται από μια δυναμική συμπεριφορά που δεν μπορεί να περιγραφεί ικανοποιητικά από τα στατικά χαρακτηριστικά που προαναφέρθηκαν. Ο λόγος γι' αυτήν τη δυναμική συμπεριφορά είναι η παρουσία εξαρτημάτων που συσσωρεύουν ενέργεια, όπως μάζες, πυκνωτές, επαγωγικά ή θερμικά στοιχεία κ.ά. Τα δυναμικά χαρακτηριστικά ενός αισθητήρα προσδιορίζονται εξετάζοντας την απόκρισή του σε διάφορες κυματομορφές του σήματος εισόδου.

Ένα όργανο λέγεται μηδενικής τάξης (zero order instrument), όταν η απόκρισή του είναι απόλυτα άμεση με τη μεταβολή του φυσικού μεγέθους. Όταν το μετρούμενο μέγεθος μεταβληθεί βηματικά και η ένδειξη του οργάνου χρειάζεται κάποιο χρόνο για να σταθεροποιηθεί, τότε το όργανο λέγεται πρώτης τάξης.

## Βιβλιογραφία

### Ελληνική

Αργυρίου Α. (2004). *Αισθητήρες ημιαγωγών, Αισθητήρες θερμικοί, μηχανικοί, μαγνητικοί, αισθητήρες ακτινοβολίας και χημικοί αισθητήρες*. Σημειώσεις για το Διαπτυ-

ματικό Πρόγραμμα Μεταπτυχιακών Σπουδών στην Ηλεκτρονική & Επεξεργασία της Πληροφορίας, Πανεπιστήμιο Πατρών, Πάτρα.

Σαχσαμάνογλου, Χ. και Μακρογιάννης, Τ. (1998). *Γενική Μετεωρολογία*. Εκδόσεις Ζήτη, 374 σελίδες.

Ζιακόπουλος Δ. (2008) Καιρός: Ο γιος της Γης και του Ήλιου. ΤΟΜΟΣ ΙΙ, *Η Γνώση*. Ιδιωτική Έκδοση, 259 σελίδες.

### Αγγλική

Brock, F. V. and S. J. Richardson (2001). *Meteorological Measurement Systems*, Oxford University Press, ISBN 0-19-513451-6

DeFelice, T. P. (1998). *An Introduction to Meteorological Instrumentation and Measurement*. Prentice Hall, Upper Saddle River, NJ, 229 p.

Emeis, St. (2010). *Measurement Methods in Atmospheric Sciences*, In situ and remote. Bornträger

Fritschen, L.J., Gay L.W. (1979). *Environmental Instrumentation*, 216 p., Springer, New York

Heard, D.E. (2007). *Analytical Techniques for Atmospheric Measurement*, pp. 1-510. Blackwell Publishing.

Lenschow, D.H. (ed.) (1986). *Probing the Atmospheric Boundary Layer*, 269 p., American Meteorological Society, Boston MA.

Meteorological Office (publ.) (1980). *Handbook of Meteorological Instruments*, 8 vols., Her Majesty's Stationery Office, London.

Strangeways IC. (2003). *Measuring the natural environment* (2nd edn). Cambridge University Press: Cambridge, UK.

Stull, R. B.: 1988, *An Introduction to Boundary Layer Meteorology*. pp. 504-506. Atmospheric Sciences Library, Kluwer Academic Publishers, Dordrecht, The Netherlands, 666 pp.

Wang, J.Y., Felton, C.M.M. (1975/76). *Instruments for Physical Environmental measurements*, 2 vol., 801 p., Kendall/Hunt Publ. Comp., Dubuque Iowa.

World Meteorological Organization, (2008). *Guide to Meteorological Instruments and Methods of Observation* (Updated in 2010), WMO-No. 8, Geneva.

## ΚΕΦΑΛΑΙΟ 2: ΘΕΡΜΟΚΡΑΣΙΑ

### Σύνοψη

Στο κεφάλαιο αυτό παρατίθενται οι σημαντικότερες μέθοδοι για την μέτρηση της θερμοκρασίας του αέρα. Προηγείται μια σύντομη ιστορική αναδρομή στην εξέλιξη της μέτρησης της θερμοκρασίας του αέρα και περιγράφονται συνοπτικά οι διαφορετικές κλίμακες της θερμοκρασίας. Κατόπιν παρουσιάζονται τα θερμοόμετρα που βασίζονται στη θερμική διαστολή (με σημαντικότερο το υδραργυρικό θερμοόμετρο), τα θερμοόμετρα ηλεκτρικής αντίστασης, τα θερμοζεύγη και τα πυρόμετρα. Τελικά, παρατίθενται οι σημαντικότερες πηγές σφαλμάτων στη μέτρηση της θερμοκρασίας.

### 2.1 Γενικά για τη θερμοκρασία

Η θερμοκρασία είναι ένα σχετικά αυθαίρετο μέτρο της θερμότητας, το οποίο αντιπροσωπεύει τη μέση κινητική ενέργεια των μορίων του αέρα (δηλαδή, οι υψηλότερες θερμοκρασίες υποδηλώνουν ταχύτερη κίνηση των μορίων) (Serway and Jewett, 2012). Από την κινητική θεωρία των αερίων, η θερμοκρασία  $T$  (σε K) λαμβάνεται από την εξίσωση:

$$\frac{4}{\pi} k_B T = \frac{1}{2} \overline{M v_a^2} \quad (2-1)$$

όπου  $k_B$  είναι η σταθερά του Boltzmann ( $1.3807 \times 10^{-23} \text{ kg m}^2 \text{ s}^{-2} \text{ K}^{-1} \text{ μόριο}^{-1}$ ),  $\overline{M}$  είναι η μέση μάζα ενός μορίου αέρα ( $4.8096 \times 10^{-26} \text{ kg μόριο}^{-1}$ ) και  $\overline{v_a^2}$  είναι η μέση θερμική ταχύτητα ενός μορίου αέρα ( $\text{m s}^{-1}$ ).

Η θερμοκρασία της ατμόσφαιρας είναι από τους πλέον καθοριστικούς ατμοσφαιρικούς παράγοντες, τόσο από μετεωρολογική όσο και από βιολογική άποψη (Ζιακόπουλος, 2008). Έτσι, λοιπόν, η θερμοκρασία ήταν ένα από τα πρώτα ατμοσφαιρικά μεγέθη που μετρήθηκαν και σημαντικός αριθμός οργάνων έχει σχεδιαστεί και κατασκευαστεί για τον σκοπό αυτό. Αξίζει να αναφέρουμε το περίφημο θερμοόμετρο του Galileo, το οποίο στηριζόταν στην αρχή του Αρχιμήδη και στο γεγονός ότι, με την αύξηση θερμοκρασίας, τα υγρά διαστέλλονται ταχύτερα από τα στερεά. Η λειτουργία του θερμομέτρου στηριζόταν στα πειράματα του Galileo, αλλά η κατασκευή έγινε από τον Ferdinand II, τον Δούκα της Τοσκάνης.

Το θερμοόμετρο αποτελείται από ένα γυάλινο σωλήνα, ο οποίος περιέχει οινόπνευμα. Μέσα στο υγρό υπάρχει ένας αριθμός από γυάλινες σφαίρες με διαφορετική πυκνότητα. Αυτές επιπλέουν όταν η θερμοκρασία είναι χαμηλή, αλλά, όταν η θερμοκρασία αυξάνεται, μειώνεται η πυκνότητα του οινοπνεύματος και βυθίζονται οι γυάλινες σφαίρες, η μία μετά την άλλη. Κατ' αυτόν τον τρόπο υπολογίζεται η θερμοκρασία, σύμφωνα με τον αριθμό των σφαιρών που έχει βυθιστεί.

Αυτό το θερμοόμετρο πρωτοκατασκευάστηκε περίπου το 1641 και, ακόμη και σήμερα, υπάρχουν στο εμπόριο ελαφρά διαφοροποιημένες κατασκευές, οι οποίες, βέβαια, χρησιμοποιούνται περισσότερο για διακοσμητικούς σκοπούς και λιγότερο για τη μέτρηση της θερμοκρασίας.



**Εικόνα 2.1** Μοντέρνα θερμόμετρα του Galileo (αριστερά) και μεγέθυνση του περιεχομένου ενός απ' αυτά (δεξιά).

## 2.2 Σημεία αναφοράς και κλίμακες θερμοκρασίας

Τα θερμόμετρα βαθμονομούνται σε ορισμένα σταθερά ή θεμελιώδη σημεία. Αυτά αποτελούνται από κάποιες καταστάσεις ισορροπίας, οι οποίες είναι εύκολο να αναπαραχθούν, και των οποίων οι θερμοκρασίες έχουν προσδιοριστεί με άμεσες μεθόδους. Τα παρακάτω θεμελιώδη σημεία χρησιμοποιούνται, μεταξύ άλλων, στη μετεωρολογία:

Η φάση ισορροπίας ανάμεσα σε στερεό και υγρό  $H_2O$  (θερμοκρασία του πάγου που λειώνει):

- $T_r = 0.00 \text{ }^\circ\text{C}$

Η φάση ισορροπίας ανάμεσα σε υγρό και αέριο  $H_2O$  (νερό και υδρατμοί) σε πίεση  $p$  (mm Hg):

- $T_r = 100.00 \text{ }^\circ\text{C} + 0.0367 (p-760) - 0.000023 (p-760)^2$

Η φάση ισορροπίας ανάμεσα σε στερεό και αέριο  $CO_2$  σε πίεση  $p$  (mm Hg):

- $T_r = -78.5 \text{ }^\circ\text{C} + 0.01595 (p-760) - 0.000011 (p-760)^2$

Εκτός από τον αισθητήρα, η μέτρηση της θερμοκρασίας απαιτεί την ύπαρξη και κάποιας κλίμακας. Στην πορεία της εξέλιξης των θερμομέτρων έχουν παρουσιαστεί πολλές κλίμακες. Οι περισσότερες από αυτές δεν ήταν ακριβείας και χρησιμοποιήθηκαν για ένα περιορισμένο χρονικό διάστημα. Σήμερα, χρησιμοποιούνται, κυρίως, τρεις κλίμακες:

- η κλίμακα Celsius, η οποία παρουσιάστηκε το 1742,
- η κλίμακα Fahrenheit (1714) και
- η κλίμακα Kelvin (1850).

Ο Anders Celsius παρουσίασε το 1742 μία εκατονταβάθμια κλίμακα μέτρησης της θερμοκρασίας, στην οποία το σημείο βρασμού του ύδατος ήταν στους  $0^\circ\text{C}$ , ενώ το νερό πάγωνε στους  $100^\circ\text{C}$  (Strangeways, 2003). Αργότερα, η κλίμακα αυτή αντιστράφηκε και χρησιμοποιείται σήμερα ευρύτατα. Στην κλίμακα Fahrenheit, το σημείο βρασμού του ύ-



δατος είναι στους 212°F, ενώ το νερό παγώνει στους 32°F. Τέλος, η κλίμακα Kelvin ή κλίμακα του απολύτου μηδενός, έχει το σημείο πήξης του νερού στους 273,15 K και το σημείο βρασμού στους 373,15 K. Απόλυτο μηδέν είναι η θερμοκρασία στην οποία όλες οι κινήσεις των μορίων έχουν σταματήσει. Αξίζει να σημειωθεί ότι η κλίμακα Kelvin, σε αντίθεση με τις κλίμακες Celsius και Fahrenheit, δεν χρησιμοποιεί βαθμούς.

Οι τρεις κλίμακες συνδέονται με τις παρακάτω σχέσεις:

$$\frac{C^{\circ}}{5} = \frac{F^{\circ} - 32}{9} \quad (2-2)$$

$$C^{\circ} = K - 273.15 \quad (2-3)$$

Σήμερα είναι σε ισχύ η Διεθνής Θερμοκρασιακή Κλίμακα του 1990 (ITS-90) και η θερμοκρασία της οποίας υποδηλώνεται με T90. Για το εύρος των μετεωρολογικών θερμοκρασιών (-80 - +60 °C) αυτή η κλίμακα βασίζεται σε μία γραμμική σχέση με την ηλεκτρική αντίσταση της πλατίνας και το τριπλό σημείο του ύδατος, το οποίο ορίζεται στους 273,16 Kelvin.

## 2.3 Μετεωρολογικά θερμόμετρα

Η θερμοκρασία μετριέται μέσω της αλλαγής κάποιας ιδιότητας του χρησιμοποιούμενου αισθητήρα (Αργυρίου, 2004). Γι' αυτό τον σκοπό, χρησιμοποιούνται, μεταξύ άλλων, τα παρακάτω:

- α) θερμική διαστολή, δηλαδή μεταβολή του μήκους ή του όγκου του αισθητήρα λόγω θερμικών αλλαγών (υγρά θερμόμετρα, μεταλλικά θερμόμετρα)
- β) ηλεκτρική αντίσταση (θερμοαντιστάσεις, θερμοημιαγωγοί)
- γ) θερμοηλεκτρικό φαινόμενο (θερμοζεύγη).

### 2.3.1 Θερμόμετρα που βασίζονται στη θερμική διαστολή

Η πιο διαδεδομένη μέθοδος μέτρησης της θερμοκρασίας βασίζεται στη θερμική διαστολή των υγρών και στερεών. Είναι πασίγνωστα τα θερμόμετρα υγρού, τα οποία χρησιμοποιούν υδράργυρο ή αλκοόλη μέσα σε γυάλινο σωλήνα. Η λειτουργία τους στηρίζεται στο ότι η μεταβολή του όγκου του περιεχομένου υγρού είναι πολύ μεγαλύτερη από τη μεταβολή του όγκου του περιβάλλοντος γυαλιού, δηλ. :

$$\alpha = \alpha_{Hg} - \alpha_{\gamma\alpha\lambda\iota} \quad (2-4)$$

που α είναι ο συντελεστής αισθητής διαστολής και  $\alpha_{Hg}$ ,  $\alpha_{\gamma\alpha\lambda\iota}$  είναι οι αντίστοιχοι συντελεστές για τον υδράργυρο ή την αλκοόλη ( $\approx 0.000182$ /βαθμό ή  $0.00106$ /βαθμό, αντίστοιχα) και το γυάλι (0.000018-0.000027/βαθμό). Δυστυχώς, και οι δύο συντελεστές μεταβάλλονται με τη θερμοκρασία, οπότε η βαθμονόμηση των υδραργυρικών θερμομέτρων θα πρέπει να γίνεται σε σημεία των οποίων η απόσταση δεν ξεπερνά τους 20°C. Αντίστοιχα, η απόσταση των σημείων βαθμονόμησης των θερμομέτρων οινοπνεύματος δεν πρέπει να ξεπερνά τους 10°C.

Η αιθυλική αλκοόλη (οινόπνευμα) παγώνει στους -114.6 °C, ενώ το σημείο βρασμού του είναι στους 78 °C. Οι αντίστοιχες θερμοκρασίες για τον υδράργυρο είναι -38,9 °C

και 357 °C. Γι' αυτόν το λόγο, τα οινοπνευματικά θερμόμετρα χρησιμοποιούνται περισσότερο για χαμηλές θερμοκρασίες, ενώ δεν μπορούν να χρησιμοποιηθούν για υψηλές θερμοκρασίες. Τα θερμόμετρα υγρού χρησιμοποιούνται για τις μετρήσεις της άμεσης, της μέγιστης και της ελάχιστης θερμοκρασίας. Για τη μέτρηση της άμεσης και της μέγιστης θερμοκρασίας, χρησιμοποιούνται, συνήθως, υδραργυρικά θερμόμετρα. Τα οινοπνευματικά θερμόμετρα χρησιμοποιούνται, κυρίως, για τη μέτρηση χαμηλών θερμοκρασιών, καθώς και της ελάχιστης θερμοκρασίας.

Αν και το θερμόμετρο μπορεί να κατασκευαστεί με συνηθισμένο γυαλί, είναι πλεονεκτικό να χρησιμοποιηθεί βοριοπυριτικό γυαλί (borosilicate glass) το οποίο έχει την έγκριση για χρήση σε θερμόμετρα. Το γυάλινο δοχείο γίνεται όσο το δυνατόν λεπτότερο, έτσι ώστε και να έχει την απαιτούμενη αντοχή αλλά και να διευκολύνει την αγωγή της θερμότητας προς και από το δοχείο και το περιεχόμενό του.

Στα *θερμόμετρα ελαχίστου*, το δοχείο έχει ειδικό σχήμα, ώστε να μειωθούν τα λάθη λόγω αδράνειας. Μέσα στη στήλη οινοπνεύματος του σωλήνα υπάρχει ένας ελαφρός δείκτης από σμάλτο (Σχήμα 2.1α). Όταν η θερμοκρασία ελαττώνεται, το οινόπνευμα συστέλλεται και παρασύρει τον δείκτη. Αντίθετα, όταν η θερμοκρασία αυξάνει ξανά, το οινόπνευμα διαστέλλεται, αλλά ο δείκτης παραμένει εκεί όπου σημειώθηκε η ελάχιστη θερμοκρασία. Μετά την ανάγνωση της ελάχιστης θερμοκρασίας, γυρίζουμε το θερμόμετρο ανάποδα, με το δοχείο ψηλά. Λόγω του βάρους του, ο δείκτης επανέρχεται στην κορυφή της στήλης του οινοπνεύματος.



**Σχήμα 2.1α** Τμήματα ενός θερμόμετρου υγρού. Στο επάνω σχήμα εμφανίζεται λεπτομέρεια από θερμόμετρο ελαχίστου στην οποία φαίνεται ο δείκτης ελάχιστης θερμοκρασίας.



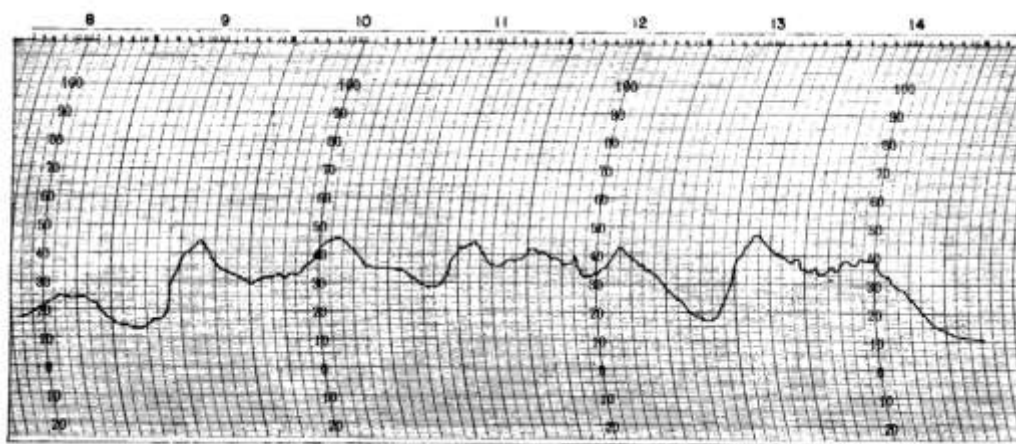
**Σχήμα 2.1β** Θερμόμετρο μεγίστου με στένωμα (αριστερά), δοχείο υδράργυρου και στένωμα του σωλήνα σε ένα διαφορετικού σχήματος θερμόμετρο μεγίστου (δεξιά).

Τα *μειστοβάθμια* θερμόμετρα έχουν ένα στένωμα στον σωλήνα κοντά στο δοχείο υδράργυρου (σχήμα 2.1β). Όταν αυξάνεται η θερμοκρασία, ο υδράργυρος διέρχεται από το στένωμα του σωλήνα, ενώ, με την ελάττωση της θερμοκρασίας, το στένωμα εμποδίζει τον υδράργυρο να επιστρέψει στο δοχείο. Με αυτόν τον τρόπο είναι δυνατόν να γίνει

κατευθείαν ανάγνωση της μέγιστης θερμοκρασίας για το διάστημα που μεσολαβεί από την προηγούμενη επαναφορά του θερμομέτρου. Μετά την ανάγνωση της μέγιστης θερμοκρασίας και για την επαναφορά του υδράργυρου στο δοχείο, «τινάζουμε» το θερμομετρο προς τα κάτω. Τα ιατρικά θερμομέτρα είναι κατά βάση ίδια με τα μεγιστοβάθμια θερμομέτρα. Λόγω της ειδικής σχεδίασης του σωλήνα, τα ιατρικά θερμομέτρα είναι πιο ευαίσθητα σε μικρές αλλαγές της θερμοκρασίας.

Τα μεγιστοβάθμια θερμομέτρα τοποθετούνται στον μετεωρολογικό κλωβό, με τέτοιο τρόπο, ώστε το δοχείο να βρίσκεται 6 έως 7 εκατοστά χαμηλότερα από την άλλη άκρη του θερμομέτρου.

Η λειτουργία των *διμεταλλικών θερμομέτρων* βασίζεται, συνήθως, στις διαφορές της θερμικής διαστολής μεταξύ δύο διαφορετικών μετάλλων (DeFelice, 1998). Λόγω μεταβολής της θερμοκρασίας, το διπλό μεταλλικό στοιχείο μεταβάλλει την καμπυλότητά του. Με τη βοήθεια μοχλών και αρθρώσεων, η μεταβολή αυτή μεταφέρεται είτε σε έναν ορατό δείκτη που κινείται σε μία βαθμολογημένη κλίμακα είτε σε μία πένα που γράφει πάνω σε μία χάρτινη ταινία στερεωμένη σε κύλινδρο που περιστρέφεται με ωρολογιακό μηχανισμό. Ο *θερμογράφος* είναι ένα καταγραφικό θερμομετρο, το οποίο βασίζεται στην παραπάνω αρχή. Ο ωρολογιακός μηχανισμός του θερμογράφου είναι, συνήθως, εβδομαδιαίας περιστροφής, οπότε έχουμε ως αποτέλεσμα το εβδομαδιαίο διάγραμμα της θερμοκρασίας (Σχήμα 2.2). Η χρονική σταθερά του θερμογράφου είναι περίπου 20-30 δευτερόλεπτα, ενώ η μέγιστη ακρίβεια είναι περίπου 0,2-0,3 °C για θερμοκρασίες άνω των 0 °C και 0,3-0,5 °C για θερμοκρασίες κάτω των 0 °C.



Σχήμα 2.2 Εβδομαδιαίο διάγραμμα θερμογράφου.

### 2.3.2 Θερμόμετρα ηλεκτρικής αντίστασης

*α. Μεταλλικές θερμοαντιστάσεις:* Η μέτρηση της θερμοκρασίας με θερμοαντιστάσεις στηρίζεται στη μεταβολή της ηλεκτρικής αντίστασης ενός υλικού σε συνάρτηση με αντίστοιχες μεταβολές θερμοκρασίας. Τα περισσότερα μεταλλικά θερμομέτρα ηλεκτρικής αντίστασης είναι κατασκευασμένα από πλατίνα, νικελ ή χαλκό (Brock and Richardson, 2001, Emeis, 2010). Στα περισσότερα θερμομέτρα ακριβείας χρησιμοποιείται πλατίνα, λόγω των εξαιρετικών της ιδιοτήτων: είναι υψηλής ακρίβειας, μεγάλης χημικής αδράνειας, υψηλής σταθερότητας βαθμονόμησης, εξαιρετικά μικρής αδράνειας και μπορεί να παραχθεί σε υψηλό βαθμό καθαρότητας.

Στα πραγματικά μέταλλα η αύξηση της θερμοκρασίας έχει ως αποτέλεσμα την αύξηση της ηλεκτρικής τους αντίστασης. Η ηλεκτρική αντίσταση  $R_T$  ενός υλικού σε ορισμένη θερμοκρασία  $T$  δίνεται από τη σχέση:

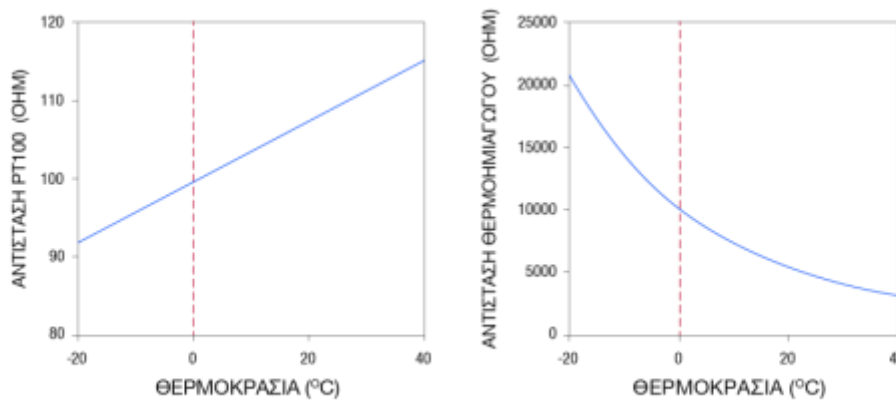
$$R_T = R_0(1 + aT + bT^2) \quad (2-5)$$

όπου  $R_0$  είναι η αντίσταση σε ορισμένη θερμοκρασία αναφοράς (συνήθως  $0^\circ\text{C}$ ) και  $a$ ,  $b$  είναι συντελεστές, οι οποίοι, όπως και το  $R_0$ , προσδιορίζονται σε συγκεκριμένα σταθερά σημεία. Για τις περιοχές θερμοκρασιών που συναντάμε στη Μετεωρολογία, και μόνο ο γραμμικός όρος της εξίσωσης (2-3) δίνει ικανοποιητικά αποτελέσματα. Ο συντελεστής  $a$  για πλατίνα έχει συνήθως τιμές  $0,00385 - 0,00392 \text{ }^\circ\text{C}^{-1}$ .

**β. Θερμοημιαγωγοί (thermistors):** Οι ημιαγωγοί είναι πολύ πιο ευαίσθητοι στις μεταβολές θερμοκρασίας από τα μέταλλα (Σχήμα 2.3), γεγονός που χρησιμοποιήθηκε για την κατασκευή θερμομέτρων ηλεκτρικής αντίστασης. Σε αυτά τα θερμομέτρα οι αισθητήρες της θερμοκρασίας είναι ημιαγωγοί, συνήθως από οξειδία μετάλλων τα οποία λαμβάνουν συνήθως τη μορφή μικρών δίσκων, ράβδων ή σφαιρών και έχουν συχνά γυάλινη επίστρωση. Στους ημιαγωγούς, σε αντίθεση με τα πραγματικά μέταλλα, η αντίσταση ελαττώνεται με την αύξηση της θερμοκρασίας (εκτός λίγων εξαιρέσεων). Η εξίσωση της αντίστασης ενός θερμοημιαγωγού σε κάποια θερμοκρασία  $T$  έχει, συνήθως, εκθετική μορφή (WMO, 2008). Μια αρκετά συνηθισμένη σχέση είναι η παρακάτω:

$$R_T = R_0 e^{k\left(\frac{1}{T} - \frac{1}{T_0}\right)} \quad (2-6)$$

όπου  $R_T$  είναι η αντίσταση σε θερμοκρασία  $T$  (K),  $R_0$  η αντίσταση σε θερμοκρασία  $T_0$  (K). Η θερμοκρασία  $T_0$  είναι συνήθως  $298,16 \text{ K}$  και ο συντελεστής  $k$  ισούται περίπου με  $4.000$ .



**Σχήμα 2.3** Η επίδραση της θερμοκρασίας στην αντίσταση ενός στοιχείου Pt100 και ενός θερμοημιαγωγού.

Οι θερμοημιαγωγοί (Εικόνα 2.2) είναι πολύ χρήσιμοι για ατμοσφαιρικές μετρήσεις, ιδιαίτερα σε χαμηλές θερμοκρασίες. Η ευαισθησία τους (η μεταβολή της αντίστασης ανά βαθμό) είναι 10-20 φορές μεγαλύτερη από αυτή των μεταλλικών αγωγών. Για παράδειγμα, ένας τυπικός θερμοημιαγωγός έχει μια αντίσταση η οποία μεταβάλλεται με ένα παράγοντα 100-200 σε ένα διάστημα θερμοκρασιών από  $-40$  σε  $40 \text{ }^\circ\text{C}$ .

Η ακρίβεια βαθμονόμησης είναι περίπου  $0,1\text{ }^{\circ}\text{C}$ , ενώ η χρονική σταθερά τους είναι, συνήθως, μεγαλύτερη από 1 δευτερόλεπτο.



**Εικόνα 2.2** Θερμο-ημιαγωγός.

### 2.3.3 Θερμοζεύγη

Στο σημείο συγκόλλησης δύο ανόμοιων μετάλλων αναπτύσσεται μία διαφορά δυναμικού, η οποία μεταβάλλεται με τη θερμοκρασία. Εάν, λοιπόν, ένα ηλεκτρικό κύκλωμα απαρτίζεται από δύο διαφορετικά μέταλλα και οι δύο κόμβοι βρίσκονται σε διαφορετική θερμοκρασία, τότε, μέσα από το κύκλωμα, διέρχεται ηλεκτρικό ρεύμα. Η αναπτυσσόμενη ηλεκτρεγερτική δύναμη  $E$  είναι ανάλογη της διαφοράς θερμοκρασίας των δύο κόμβων:

$$E = a(T_m - T_r) + b(T_m - T_r)^2 \quad (2-7)$$

Ο ένας κόμβος ονομάζεται *σημείο μέτρησης* ( $m$ ), ενώ ο άλλος ονομάζεται *σημείο αναφοράς* ( $r$ ). Για τη μέτρηση της απόλυτης τιμής της θερμοκρασίας θα πρέπει το σημείο αναφοράς να έχει σταθερή θερμοκρασία [π.χ. να βρίσκεται βυθισμένο σε ένα μείγμα νερού και πάγου ( $0^{\circ}\text{C}$ )]. Συνήθως, όμως, τα θερμοζεύγη χρησιμοποιούνται για τη μέτρηση της *διαφοράς θερμοκρασίας* ανάμεσα σε δύο σημεία. Χαρακτηριστικό παράδειγμα εφαρμογής τους είναι ο προσδιορισμός της κατακόρυφης θερμοβαθμίδας στο στρώμα επιφανείας της ατμόσφαιρας.

Τα πλεονεκτήματα που παρουσιάζουν τα θερμοζεύγη είναι, κυρίως, η ικανοποιητική ακρίβεια, η δυνατότητα χρήσης τους για μεγάλο εύρος θερμοκρασιών, η εύκολη τοποθέτησή τους και το χαμηλό κόστος τους. Η χρονική σταθερά τους είναι μικρή, συνήθως 0,1-3 δευτερόλεπτα. Ένα μειονέκτημα των θερμοζευγών είναι η πολύ χαμηλή έξοδος, της τάξης των  $40\text{ }\mu\text{V }^{\circ}\text{C}^{-1}$ , η οποία όμως μπορεί σήμερα να μετρηθεί εύκολα με τα σύγχρονα βολτόμετρα. Επίσης, υπάρχει η ανάγκη για συχνή βαθμονόμηση.

Μερικά συνηθισμένα είδη θερμοζευγών είναι τα παρακάτω:

- Τύπου T: Χαλκός και Κωνσταντάνη (κράμα χαλκού και νικελίου).
- Τύπου J: Σίδηρος και Κωνσταντάνη.
- Τύπου T: Νικέλιο (10% χρώμιο) και Κωνσταντάνη.
- Τύπου V: Νικέλιο (10% χρώμιο) και νικέλιο (5% αλουμίνιο και πυρίτιο).

### 2.3.4 Πυρόμετρα (θερμόμετρα ακτινοβολίας)

Αυτά τα θερμόμετρα βασίζονται στην αρχή των Stefan-Boltzmann, σύμφωνα με την οποία ένα σώμα με θερμοκρασία μεγαλύτερη από  $0\text{ K}$ , εκπέμπει ακτινοβολία ανά μονάδα επιφανείας που ισούται με:

$$M_e = \varepsilon \sigma T_s^4 \quad (2-8)$$

όπου  $\varepsilon$  είναι ο συντελεστής εκπομπής ( $0 < \varepsilon < 1$ ),  $\sigma$  η σταθερά Stefan-Boltzmann ( $=5.67 \cdot 10^{-8} \text{ W m}^{-2} \text{ K}^{-4}$ ) και  $T_s$  είναι η απόλυτη θερμοκρασία επιφάνειας (K). Εάν υποθέσουμε ότι η λαμπρότητα (radiance)  $L_e$  υπακούει στο νόμο Lambert, τότε μπορούμε να γράψουμε:

$$L_e = M_e / \pi = \varepsilon \sigma T_s^4 / \pi \quad (2-9)$$

Ο πρακτικός προσδιορισμός της θερμοκρασίας μιας επιφάνειας με πυρόμετρο βασίζεται στον προσδιορισμό της φασματικής λαμπρότητας στο ατμοσφαιρικό παράθυρο (8-12  $\mu\text{m}$ ). Ένα από τα πλεονεκτήματα είναι ότι αυτή η φασματική περιοχή, σε μεγάλο βαθμό, συμπίπτει με το μέγιστο του φάσματος. Η φασματική λαμπρότητα ισούται με:

$$L_{\lambda l}^{\lambda^2} = M_{\lambda l}^{\lambda^2} / M_{\nu a} \text{ από } \lambda l^{\lambda^2} \varepsilon \sigma T_s^4 / d\lambda \quad (2-10)$$

## 2.4 Σφάλματα και πηγές σφαλμάτων στη μέτρηση της θερμοκρασίας

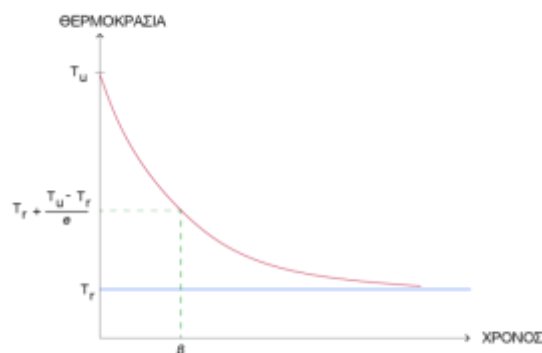
### 2.4.1 Σφάλματα λόγω θερμικής αδράνειας

Κάθε όργανο μέτρησης περιέχει έναν αισθητήρα, ο οποίος αντιδρά σε κάθε αλλαγή της ποσότητας που θα μετρηθεί. Η αντίδραση του αισθητήρα δεν είναι ποτέ ακαριαία, υπάρχει πάντα κάποια αδράνεια. Αυτή η αδράνεια είναι ιδιαίτερα σημαντική στη μετεωρολογία, επειδή οι μετεωρολογικές ποσότητες μεταβάλλονται συνεχώς, τόσο στον χώρο, όσο και στον χρόνο.

Όταν ένα θερμόμετρο με ίδια θερμοκρασία  $T_u$  τοποθετηθεί σε περιβάλλοντα αέρα θερμοκρασίας  $T_r$ , τότε δεν αποκτά τη θερμοκρασία  $T_r$  ακαριαία, αλλά την προσεγγίζει ασυμπτωτικά, με μια ταχύτητα που εξαρτάται τόσο από τις ιδιότητες του θερμομέτρου (υλικό, διαστάσεις) όσο και από τις ιδιότητες του αέρα (ταχύτητα ροής, πυκνότητα κτλ.). Η θερμοκρασία του αισθητήρα μεταβάλλεται με τον χρόνο, σύμφωνα με τη σχέση:

$$\frac{dT}{dt} = -\frac{1}{\beta}(T - T_r) \quad (2-11)$$

όπου  $T$  είναι η θερμοκρασία του αισθητήρα σε χρόνο  $t$  και  $\beta$  είναι η χρονική σταθερά του (Σχήμα 2.4).



**Σχήμα 2.4** Η θερμοκρασία που δείχνει ο αισθητήρας σαν συνάρτηση του χρόνου.  $T_u$  είναι η αρχική θερμοκρασία του αισθητήρα,  $T_r$  η θερμοκρασία του περιβάλλοντα αέρα και  $\beta$  η χρονική σταθερά του αισθητήρα.

Αν η παραπάνω εξίσωση ολοκληρωθεί, υπό την υπόθεση ότι τα  $\beta$  και  $T_r$  είναι σταθερά, λαμβάνεται η παρακάτω εξίσωση:

$$T - T_r = \frac{T_u - T_r}{e^{t/\beta}} \quad (2-12)$$

Σύμφωνα με αυτή την εξίσωση, η διαφορά θερμοκρασίας ανάμεσα στο θερμομετρικό στοιχείο και στο θερμομετρούμενο σώμα μειώνεται εκθετικά με τον χρόνο. Ο βαθμός της αδράνειας ενός αισθητηρίου εκφράζεται, συνήθως, από τη *χρονική σταθερά* του, η οποία αντιπροσωπεύει τον αριθμό δευτερολέπτων, ο οποίος απαιτείται, ώστε η αρχική θερμοκρασιακή διαφορά μεταξύ του θερμομετρικού στοιχείου και του θερμομετρούμενου σώματος,  $T_u - T_r$ , να μειωθεί στο  $1/e$ , δηλ. στο 37%. Ο ακόλουθος πίνακας (Πίνακας 2.1) δείχνει το μέγεθος της χρονικής σταθεράς για διαφορετικούς αισθητήρες θερμότητας σε φυσιολογικές συνθήκες εξαερισμού. Όπως προαναφέρθηκε, η χρονική σταθερά των θερμομέτρων εξαρτάται από την ροή του αέρα και μπορεί οι τιμές σε πραγματικές περιβαλλοντικές συνθήκες να είναι σημαντικά διαφορετικές. Για παράδειγμα, σε συνθήκες άπνοιας η χρονική σταθερά μπορεί να είναι πολύ μεγαλύτερη.

Τα σφάλματα λόγω θερμικής αδράνειας πρέπει να λαμβάνονται υπόψη ανάλογα με την περίπτωση. Για μετεωρολογικές μετρήσεις ρουτίνας δεν είναι πλεονεκτικό να χρησιμοποιούνται θερμοόμετρα με πολύ μικρή χρονική σταθερά. Λόγω των τυρβωδών διακυμάνσεων, η θερμοκρασία του αέρα μπορεί να παρουσιάζει διακυμάνσεις έως και 1-2 °C μέσα σε λίγα δευτερόλεπτα και η στιγμιαία μέτρηση με ένα θερμοόμετρο το οποίο έχει μικρή χρονική σταθερά (~1 s) μπορεί να είναι λιγότερο αντιπροσωπευτική. Σε αυτή την περίπτωση η μέτρηση με ένα θερμοόμετρο με χρονική σταθερά μερικών δεκάδων δευτερολέπτων θα εξομαλύνει αυτές τις πολύ γρήγορες διακυμάνσεις. Από την άλλη πλευρά όταν η χρονική σταθερά είναι πολύ μεγάλη, μπορεί να υπεισέλθουν λάθη στην μέτρηση σε περιπτώσεις που εμφανίζονται αλλαγές στην θερμοκρασία σε αντίστοιχες χρονικές κλίμακες. Για τους παραπάνω λόγους, προτείνεται να χρησιμοποιούνται για μετεωρολογικές μετρήσεις ρουτίνας θερμοόμετρα με χρονική σταθερά περίπου 20 s.

Παρομοίως, ορισμένα θερμοόμετρα σχεδιάζονται έτσι, ώστε να φτάνουν αργά στη θερμοκρασία ισορροπίας. Αυτά τα θερμοόμετρα είναι κατάλληλα για τη μέτρηση της θερμοκρασίας στην περίπτωση όπου η ανάγνωση γίνεται με κάποια καθυστέρηση, όπως συμβαίνει με ορισμένα *θερμοόμετρα εδάφους*, τα οποία θα πρέπει να μετακινηθούν από το έδαφος, όπου γίνεται η μέτρηση, στην ατμόσφαιρα όπου γίνεται η ανάγνωσή τους.

Τέλος, σε ειδικές περιπτώσεις, όταν μας ενδιαφέρουν οι γρήγορες (τυρβώδεις) μεταβολές της θερμοκρασίας (όπως, π.χ., σε μετρήσεις της θερμοκρασίας στο στρώμα επιφανείας της ατμόσφαιρας), θα πρέπει να διαλέγουμε αισθητήρες με πολύ μικρή χρονική σταθερά (όπως είναι τα θερμοστοιχεία).

Αισθητήριο Θερμότητας	Χρονική σταθερά (s)
Θερμόμετρο οιοπνεύματος	80 - 90
Θερμόμετρο υδράργυρου	50 - 60
Μεταλλικό θερμοόμετρο	20 - 30
Θερμοστοιχείο	0.1 - 3

**Πίνακας 2.1** Η χρονική σταθερά διάφορων θερμομέτρων.

### 2.4.2 Σφάλματα λόγω ακτινοβολίας

Όπως προαναφέραμε, η θερμοκρασία του αέρα είναι μια έκφραση της μέσης μοριακής κίνησης στον αέρα. Ένα σώμα, π.χ. ένα θερμόμετρο, το οποίο εκτίθεται στον αέρα, επηρεάζεται από αυτή τη μοριακή κίνηση, αλλά ακόμη και από την ακτινοβολία την οποία απορροφά και εκπέμπει ο αισθητήρας. Προκειμένου να λάβουμε ακριβείς μετρήσεις της θερμοκρασίας του αέρα, θα πρέπει να προστατεύσουμε το θερμόμετρο από την επίδραση της ακτινοβολίας. Οι βασικές προϋποθέσεις για ένα καλό κάλυμμα θερμομέτρου είναι οι παρακάτω:

1. Να παρέχει συνεχή προστασία από την ηλιακή ακτινοβολία.
2. Να μην θερμαίνεται.
3. Να εμποδίζει την ανακλώμενη ακτινοβολία από το να φτάσει στο θερμόμετρο.
4. Να επιτρέπει τον καλό εξαερισμό του αισθητήρα

Τα παραπάνω επιτυγχάνονται, συνήθως, με τη βοήθεια των παρακάτω:

- μετεωρολογικό κλωβό,
- μεταλλικό κάλυμμα.

α) Προκειμένου να προστατευθούν από την ηλιακή ακτινοβολία και τη βροχή, τα θερμόμετρα τοποθετούνται συνήθως σε *μετεωρολογικό κλωβό* (Εικόνα 2.3). Ο μετεωρολογικός κλωβός είναι ξύλινος και τοποθετείται κατά προτίμηση σε έδαφος με γρασίδι σε απόσταση από άλλα αντικείμενα (δέντρα, σπίτια κτλ.), τα οποία μπορούν να επηρεάσουν τη μέτρηση. Το ύψος του κλωβού πρέπει να είναι περίπου 1,2 μέτρα πάνω από το έδαφος. Τα ξύλινα τοιχώματα του κλωβού έχουν τέτοια κατασκευή, ώστε ο αέρας του κλωβού να κυκλοφορεί και να ανανεώνεται ελεύθερα. Η πόρτα τοποθετείται προς Βορρά, έτσι ώστε να μην εισέρχονται οι ακτίνες του ήλιου όταν ανοιχτεί η πόρτα του κλωβού. Ο κλωβός βάφεται άσπρος, ώστε να μειωθεί όσο το δυνατόν η απορρόφηση ακτινοβολίας. Για τον ίδιο λόγο, είναι πολύ σημαντικό να είναι ο κλωβός καθαρός. Παρόλα τα παραπάνω μέτρα, είναι δυνατόν, σε ειδικές συνθήκες (έντονη ακτινοβολία, άπνοια), το λάθος στις μετρήσεις θερμοκρασίας να φθάσει το  $+1,5\text{ }^{\circ}\text{C}$  κατά τη διάρκεια της ημέρας, ενώ την νύχτα το θερμόμετρο μπορεί να δείχνει θερμοκρασία με σφάλμα  $-0,5^{\circ}\text{C}$ .



**Εικόνα 2.3** Μετεωρολογικός κλωβός. Φαίνονται ο θερμογράφος/υγρογράφος, όπως και τα διάφορα θερμόμετρα.



β) Το *μεταλλικό κάλυμμα* (Εικόνα 2.4) χρησιμοποιείται πολλές φορές σε συνδυασμό με τεχνητό εξαερισμό (συνήθως, κάποιο μικρό ανεμιστήρα), ώστε να επιτυγχάνεται το βέλτιστο αποτέλεσμα. Το κάλυμμα αποτελείται, συνήθως, από δύο ομόκεντρους κύλινδρους, ώστε ο εσωτερικός κύλινδρος να έχει τη θερμοκρασία του αέρα, ακόμα και όταν ο εξωτερικός κύλινδρος επηρεάζεται κάπως από την ακτινοβολία. Η επιφάνεια των κυλίνδρων είναι στιλπνή, ώστε να μειωθεί κατά το δυνατόν η απορρόφηση ακτινοβολίας.

### 2.4.3 Σφάλματα λόγω επαφής

Σε πολλές περιπτώσεις, λόγω κακής τοποθέτησης, ο αισθητήρας της θερμοκρασίας έρχεται σε επαφή και με άλλα μέσα, εκτός αυτού του οποίου τη θερμοκρασία θέλουμε να μετρήσουμε. Εάν, λοιπόν, η θερμοκρασία των άλλων μέσων είναι διαφορετική, τότε εισάγεται σοβαρό λάθος στη μέτρηση.



**Εικόνα 2.4** Εξαεριζόμενο κάλυμμα θερμομέτρου (αριστερά). Κάλυμμα για θερμόμετρο/υγρόμετρο με περύγια τα οποία επιτρέπουν τον φυσικό αερισμό του εσωτερικού ακόμης και σε χαμηλές ταχύτητες ανέμου (δεξιά).

## Βιβλιογραφία

### Ελληνική

Αργυρίου Α. (2004). *Αισθητήρες ημιαγωγών, Αισθητήρες θερμικοί, μηχανικοί, μαγνητικοί, αισθητήρες ακτινοβολίας και χημικοί αισθητήρες*. Σημειώσεις για το Διατμηματικό Πρόγραμμα Μεταπτυχιακών Σπουδών στην Ηλεκτρονική & Επεξεργασία της Πληροφορίας, Πανεπιστήμιο Πατρών, Πάτρα.

Ζιακόπουλος Δ. (2008) *Καιρός: Ο γιος της Γης και του Ήλιου*. ΤΟΜΟΣ ΙΙ, *Η Γνώση*. Ιδιωτική Έκδοση, 259 σελίδες.

### Αγγλική

Brock, F. V. and S. J. Richardson (2001). *Meteorological Measurement Systems*, Oxford University Press, ISBN 0-19-513451-6

- DeFelice, T. P. (1998). *An Introduction to Meteorological Instrumentation and Measurement*. Prentice Hall, Upper Saddle River, NJ, 229 p.
- Emeis, St. (2010). *Measurement Methods in Atmospheric Sciences*, In situ and remote. Bornträger
- Serway R.A. και J. W. Jewett (2012).. "*Φυσική για Επιστήμονες και Μηχανικούς: Μηχανική, Ταλαντώσεις και Μηχανικά Κύματα, Θερμοδυναμική, Σχετικότητα*", Επιστημονική Επιμέλεια Ελληνικής Έκδοσης Χ. Βάρβογλης, Εκδόσεις Κλειδάριθμος.
- Strangeways IC. (2003). *Measuring the natural environment* (2nd edn). Cambridge University Press: Cambridge, UK.
- World Meteorological Organization (2008): *Guide to Meteorological Instruments and Methods of Observation* (Updated in 2010), WMO-No. 8, Geneva.

## ΚΕΦΑΛΑΙΟ 3: ΑΤΜΟΣΦΑΙΡΙΚΗ ΥΓΡΑΣΙΑ

### Σύνοψη

Στην αρχή του κεφαλαίου αυτού παρατίθενται μερικά γενικά στοιχεία για την ατμοσφαιρική υγρασία και αναλύονται οι κυριότεροι παράμετροι οι οποίοι χρησιμοποιούνται για τον προσδιορισμό της. Στην συνέχεια παρουσιάζονται οι σημαντικότερες διατάξεις μέτρησης, όπως είναι τα ψυχρόμετρα, τα υγρόμετρα τριχός, τα φασματοσκοπικά υγρόμετρα και τα υγρόμετρα πυκνωτή.

### 3.1 Γενικά για την ατμοσφαιρική υγρασία

Ο ατμοσφαιρικός αέρας περιέχει πάντοτε υδρατμούς, με τους οποίους τροφοδοτείται μέσω της εξάτμισης από την επιφάνεια της γης και, κατά κύριο λόγο, από τις τροπικές και υποτροπικές θάλασσες. Το ποσό των υδρατμών στην ατμόσφαιρα ονομάζεται *υγρασία*. Παρόλο που το ποσοστό υδρατμών στην ατμόσφαιρα είναι μικρό, συγκρινόμενο με το ποσοστό άλλων αερίων, ο ρόλος τους είναι πολύ σημαντικός. Αυτό είναι προφανές κατά τον σχηματισμό νεφών και τον νετό. Ακόμα, οι υδρατμοί είναι θερμοκηπικό αέριο με καθοριστική σημασία για το ισοζύγιο ακτινοβολίας της γης και παίζουν σημαντικό ρόλο στην εμφάνιση διαφόρων διαταράξεων της ατμόσφαιρας, όπως, π.χ. οι τροπικοί κυκλώνες. Γι' αυτόν τον λόγο, η μέτρηση της *υγρασίας του αέρα* συμπεριλαμβάνεται στις τακτικές μετρήσεις των μετεωρολογικών και κλιματολογικών σταθμών.

Στόχος των ατμοσφαιρικών μετρήσεων υγρασίας είναι να προσδιορισθεί το ποσό των υδρατμών στην ατμόσφαιρα κατά βάρος, κατά όγκο, κατά μερική πίεση ή κατά ποσοστό κορεσμού. Η μέτρηση υγρασίας στο πεδίο είναι γενικά προβληματική, ιδιαίτερα σε αυτόματους σταθμούς, όπου υπάρχει ανάγκη για όργανα με χαμηλό κόστος, μεγάλη σταθερότητα και χαμηλή κατανάλωση ενέργειας. Υπάρχουν βασικά δύο είδη αισθητήρων για τη μέτρηση της υγρασίας, τα ψυχρόμετρα και τα υγρόμετρα:

1. Τα ψυχρόμετρα, τα οποία αποτελούνται από δύο θερμομέτρα, το ένα από τα οποία είναι καλυμμένο με ύφασμα που υγραίνεται. Η υγρασία του αέρα υπολογίζεται από τη διαφορά θερμοκρασίας των δύο θερμομέτρων (λεπτομέρειες δίνονται σε επόμενη ενότητα). Τα ψυχρόμετρα είναι δύσκολο να χρησιμοποιηθούν σε επιχειρησιακή βάση, οπότε η χρήση τους σήμερα περιορίζεται, κυρίως, σε διαδικασίες περιστασιακού ελέγχου των υγρομέτρων, όπου χρησιμοποιούνται ως δευτερεύοντα πρότυπα.
2. Τα υγρόμετρα, τα οποία μετρούν τη φυσική επίδραση της υγρασίας σε υλικά, όπως π.χ. οι τρίχες (βλ. επόμενες ενότητες). Άλλο σημαντικό παράδειγμα είναι η αλλαγή στη χωρητικότητα ενός πυκνωτή, η οποία αποτελεί τη βάση για τον προσδιορισμό της υγρασίας του αέρα.

### 3.2 Παράμετροι προσδιορισμού υγρασίας

Ο ατμοσφαιρικός αέρας μπορεί να θεωρηθεί ότι είναι ένα μείγμα αερίων, το οποίο αποτελείται από δύο συστατικά, τον *ξηρό αέρα* και τους *υδρατμούς*. Ο ξηρός αέρας είναι και ο ίδιος ένα μείγμα πολλών αερίων, κατά κύριο λόγο αζώτου και οξυγόνου. Με εξαίρεση ορισμένα αέρια με πολύ μικρές συγκεντρώσεις, η σύσταση του ξηρού αέρα μπορεί να θεωρηθεί σταθερή. Από την άλλη πλευρά, η συγκέντρωση των υδρατμών στην ατμόσφαιρα παρουσιάζει μεγάλες μεταβολές.

Η συγκέντρωση των υδρατμών στην ατμόσφαιρα εκφράζεται με πολλές διαφορετικές μεταβλητές, οι οποίες, γενικά, είναι δύο τύπων:

- μεταβλητές που αποτελούν ένα απόλυτο μέτρο της υγρασίας, οι οποίες εξαρτώνται μόνο από την περιεκτικότητα του αέρα σε υγρασία.
- μεταβλητές που αποτελούν ένα σχετικό μέτρο της υγρασίας, οι οποίες εξαρτώνται τόσο από την περιεκτικότητα σε υγρασία όσο και τη θερμοκρασία του αέρα.

Το ποσό των υδρατμών που μπορεί να περιέχει ο αέρας είναι ορισμένο και εξαρτάται από τη θερμοκρασία του. Η *πίεση των κορεσμένων υδρατμών* ορίζεται ως η πίεση των υδρατμών, όταν αυτοί βρίσκονται σε ισορροπία με μία επίπεδη επιφάνεια νερού της ίδιας θερμοκρασίας. Η πίεση των κορεσμένων υδρατμών πάνω από νερό υπολογίζεται από τη σχέση:

$$e_{sw} = 10^{9.40 - \frac{2353.38}{T}} \quad (3-1)$$

Η πίεση των κορεσμένων υδρατμών πάνω από πάγο υπολογίζεται από τη σχέση:

$$e_{si} = 10^{10.55 - \frac{2667.41}{T}} \quad (3-2)$$

όπου τα  $e_{sw}$  και  $e_{si}$  είναι η πίεση των υδρατμών κόρου εκφρασμένη σε hPa και  $T$  είναι η θερμοκρασία εκφρασμένη σε K.

Η *σχετική υγρασία* δείχνει το βαθμό κορεσμού της ατμόσφαιρας και ορίζεται από τη σχέση:

$$r = 100 \frac{e}{e_s} \quad (3-3)$$

όπου  $r$  είναι η σχετική υγρασία εκφρασμένη επί τοις εκατό,  $e$  είναι η πίεση των υδρατμών και  $e_s$  είναι η πίεση των κορεσμένων υδρατμών.

Η υγρασία του αέρα μπορεί, ακόμα, να προσδιοριστεί με τις παρακάτω παραμέτρους:

Ειδική υγρασία:

$$q = \frac{M_w}{M_a} \approx \frac{0.622e}{p} \quad (3-4)$$

όπου  $M_w$ ,  $M_a$  είναι οι μάζες νερού και ατμοσφαιρικού αέρα αντίστοιχα, σε έναν ορισμένο όγκο  $V$  και  $p$  είναι η πίεση.

Αναλογία μείγματος:

$$m = \frac{\rho_w}{\rho_d} = \frac{0.622e}{p - e} \quad (3-5)$$

όπου  $\rho_w$ ,  $\rho_d$  είναι η πυκνότητα των υδρατμών και ξηρού αέρα αντίστοιχα.

Θερμοκρασία δρόσου:

$$Td = \frac{240.97 \cdot \ln(e/6.1121)}{17.502 - \ln(e/6.1121)} \quad (3-6)$$

όπου η θερμοκρασία δρόσου,  $T_d$ , δίνεται σε βαθμούς Κελσίου και η μερική πίεση των υδρατμών,  $e$ , σε millibars ή hPa.

Στη διεύθυνση <http://www.ringbell.co.uk/info/humid.htm> λειτουργεί ένα διαδικτυακό εργαλείο για τον υπολογισμό και τη μετατροπή μετεωρολογικών μεγεθών, συμπεριλαμβανομένων και των παραπάνω παραμέτρων υγρασίας.

### 3.3 Ψυχρόμετρα

Τα ψυχρόμετρα αποτελούνται από δύο αισθητήρες θερμοκρασίας (συνήθως, δύο κοινά υδραργυρικά θερμοόμετρα). Το ένα μετρά τη θερμοκρασία της ατμόσφαιρας, όπως ένα κανονικό θερμοόμετρο (ξηρό θερμοόμετρο), ενώ το δοχείο του άλλου σκεπάζεται με κάποιο υλικό (συνήθως, ύφασμα από μουσελίνα), το οποίο υγραίνεται με αποσταγμένο νερό (υγρό θερμοόμετρο). Τα δύο θερμοόμετρα δίνουν τη *θερμοκρασία του αέρα* και την *υγρή θερμοκρασία* αντίστοιχα. Στο σύστημα παροχετεύεται ρεύμα αέρα σταθερής ταχύτητας. Η εξάτμιση στο υγρό θερμοόμετρο έχει ως συνέπεια η υγρή θερμοκρασία να είναι, συνήθως, χαμηλότερη από τη θερμοκρασία του αέρα, ενώ το μέγεθος της διαφοράς εξαρτάται από την υγρασία του αέρα. Επομένως, η διαφορά της θερμοκρασίας των δύο θερμομέτρων και η θερμοκρασία του ξηρού θερμομέτρου μας δίνουν τη σχετική υγρασία από ειδικούς πίνακες, παράδειγμα των οποίων παρουσιάζεται στον πίνακα 3.1.

Η σχετική υγρασία μπορεί, ακόμη, να υπολογιστεί από τη σχέση (3-3), όπου η πίεση των κορεσμένων υδρατμών υπολογίζεται από τη σχέση (3-1) ή (3-2) και, στη θέση του  $T$ , χρησιμοποιούμε τη θερμοκρασία του υγρού θερμομέτρου,  $T_w$ , εκφρασμένη σε Kelvin. Η πίεση των υδρατμών υπολογίζεται από τη σχέση:

$$e = e_{sw} - 0.00066(1 + 0.00115T_w)p\Delta T_w \quad (3-7)$$

για νερό και

$$e = e_{si} - 0.00066(1 + 0.00115T_w)p\Delta T_w \quad (3-8)$$

για πάγο.

Το πιο γνωστό ψυχρόμετρο είναι το Assmann (εικόνα 3.1) που χρησιμοποιεί μηχανικό ανεμιστήρα για αερισμό. Η ανάγνωση του ψυχρόμετρου Assmann πρέπει να γίνεται 3 - 5 λεπτά μετά την ύγρανση του θερμομέτρου.



Εικόνα 3.1 Φωτογραφία του ψυχρόμετρου Assmann.

Στις περιπτώσεις που απαιτούνται συνεχείς μετρήσεις χωρίς την παρουσία παρατηρητή, χρησιμοποιούνται ψυχρόμετρα στα οποία τα υδραργυρικά θερμοόμετρα έχουν αντικατα-

σταθεί με θερμομέτρα ηλεκτρικής αντίστασης πλατίνας. Τα θερμομέτρα αυτά είναι μεγάλης ακριβείας.

T (°C)	$\Delta T_w$ (°C)									
	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10
10	88	77	66	56	45	35	26	16	7	-
11	89	78	67	57	47	38	28	19	11	2
12	89	79	68	59	49	40	31	22	14	5
13	89	79	69	60	51	42	33	25	16	9
14	90	80	70	61	52	43	35	27	19	11
15	90	80	71	62	54	45	37	29	22	14
16	90	81	72	63	55	47	39	31	24	17
17	91	82	73	64	56	48	41	33	26	19
18	91	82	73	65	57	50	42	35	28	21
19	91	82	74	66	58	51	44	37	30	24
20	91	83	75	67	59	52	45	38	32	26
21	91	83	75	68	60	53	47	40	34	27
22	92	84	76	69	61	54	48	41	35	29
23	92	84	77	69	62	56	49	43	37	31
24	92	84	77	70	63	57	50	44	38	32
25	92	85	77	71	64	57	51	45	40	34
26	92	85	78	71	65	58	52	46	41	35
27	93	85	78	72	65	59	53	47	42	37
28	93	86	79	72	66	60	54	49	43	38
29	93	86	79	73	67	61	55	50	44	39
30	93	86	80	73	67	61	56	50	45	40
31	93	86	80	74	68	62	57	51	46	41
32	93	87	80	74	68	63	57	52	47	42
33	93	87	81	75	69	63	58	53	48	43
34	93	87	81	75	69	64	59	54	49	44

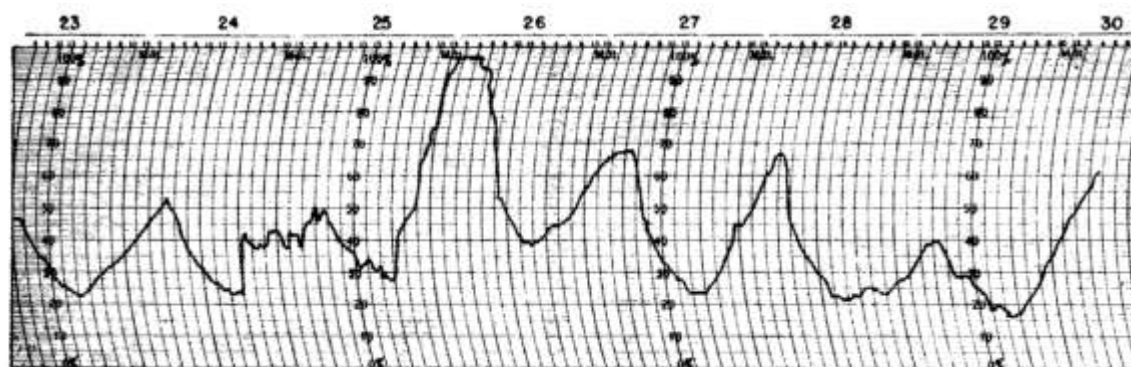
**Πίνακας 3.1** Σχετική υγρασία (%) ως συνάρτηση της διαφοράς της θερμοκρασίας του ξηρού, από το υγρό θερμομέτρο,  $\Delta T_w$ , και της θερμοκρασίας του υγρού θερμομέτρου,  $T_w$



Εικόνα 3.2 Υγρογράφος.

### 3.4 Υγρόμετρα τριχός

Τα υγρόμετρα τριχός ανήκουν στην κατηγορία των μηχανικών υγρομέτρων, στα υλικά των οποίων οι διαστάσεις μεταβάλλονται με την υγρασία και συνδέονται μηχανικά με έναν μετατροπέα ή δείκτη (Defelice, 1998, Strangeways, 2003, WMO, 2008). Τα υγρόμετρα τριχός στηρίζονται στο φαινόμενο της μεταβολής του μήκους ανθρωπίνων ή ζωικών τριχών, ανάλογα με την ποσότητα υδρατμών στην ατμόσφαιρα. Όταν η σχετική υγρασία αλλάζει από 0% σε 100%, η ανθρώπινη τρίχα υπόκειται σε αύξηση του μήκους της κατά 2.0 - 2.5%. Λόγω αυτής της ιδιότητας, η τρίχα χρησιμοποιείται ως αισθητήρας στις περιπτώσεις που χρειαζόμαστε συνεχή καταγραφή της υγρασίας. Οι υγρογράφοι έχουν συνήθως δέσμη τριχών (ξανθού) ανθρώπου, οι οποίες έχουν καθαριστεί από τις σκόνες και το λίπος. Η συρρίκνωση ή η έκταση του στελέχους των τριχών μεγεθύνεται και μεταφέρεται μέσω συστήματος μοχλών σε γραφίδα για την καταγραφή της μέτρησης σε περιστρεφόμενη χάρτινη ταινία. Σε αναλογία με το εβδομαδιαίο διάγραμμα θερμογράφου, προκύπτει και το εβδομαδιαίο διάγραμμα υγρογράφου (σχήμα 3.1).

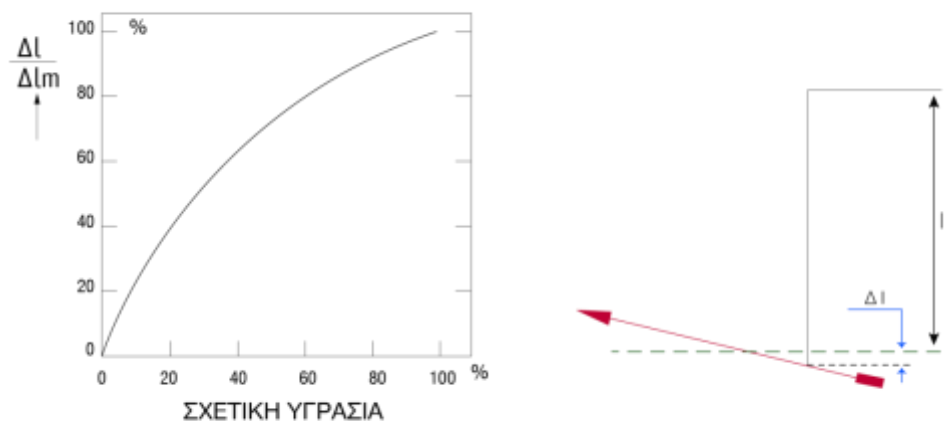


Σχήμα 3.1 Εβδομαδιαίο διάγραμμα υγρογράφου.

Η χρονική σταθερά του υγρόμετρου τριχός μεταβάλλεται τόσο με τη θερμοκρασία όσο και με την υγρασία. Σε πολύ χαμηλές θερμοκρασίες, ο χρόνος ισορροπίας του υγρόμε-

τρον τριχός στις αλλαγές της υγρασίας είναι πολύ μεγάλος. Γι' αυτές τις περιπτώσεις, και προκειμένου να μειωθεί η χρονική σταθερά τους, οι τρίχες υποβάλλονται σε ειδική επεξεργασία. Από την άλλη μεριά, η επεξεργασία κάνει τις τρίχες πιο εύθραυστες.

Εκτός από τρίχες, άλλα υλικά που έχουν χρησιμοποιηθεί στα μηχανικά υγρόμετρα είναι το βαμβάκι, το μετάξι, το νάιλον, το χαρτί και το ξύλο. Βασικά μειονεκτήματα αυτών των αισθητήρων είναι η σημαντική αλλαγή των φυσικών χαρακτηριστικών τους με τον χρόνο, η μεγάλη υστέρηση και, επίσης, η μεγάλη χρονική καθυστέρηση στην απόκριση στις αλλαγές της υγρασίας.



**Σχήμα 3.2** Η επιμήκυνση μιας ανθρώπινης τρίχας ως συνάρτηση της σχετικής υγρασίας (αριστερά) και η αρχή λειτουργίας ενός υδρογράφου (δεξιά).

Θερμοκρασία (°C)	Συνηθισμένη τρίχα	Επεξεργασμένη τρίχα	Ψυχρόμετρο Assman	Φασματοσκοπικό υγρόμετρο
+20	32	10	30-50	λίγα ms
0	75	10	30-50	λίγα ms
-20	440	12	30-50	λίγα ms

**Πίνακας 3.2** Χρονική σταθερά (σε δευτερόλεπτα) των αισθητήρων υγρασίας σε συνθήκες σχετικής υγρασίας 85%.

### 3.5 Φασματοσκοπικά υγρόμετρα

Το κλάσμα της προσπίπτουσας ακτινοβολίας η οποία μεταδίδεται μέσω μιας ατμοσφαιρικής διαδρομής, δίνεται από το νόμο του Beer (Brock and Richardson, 2001):

$$\frac{I}{I_0} = \exp(-k_{\lambda} d_v x) \quad (3-9)$$

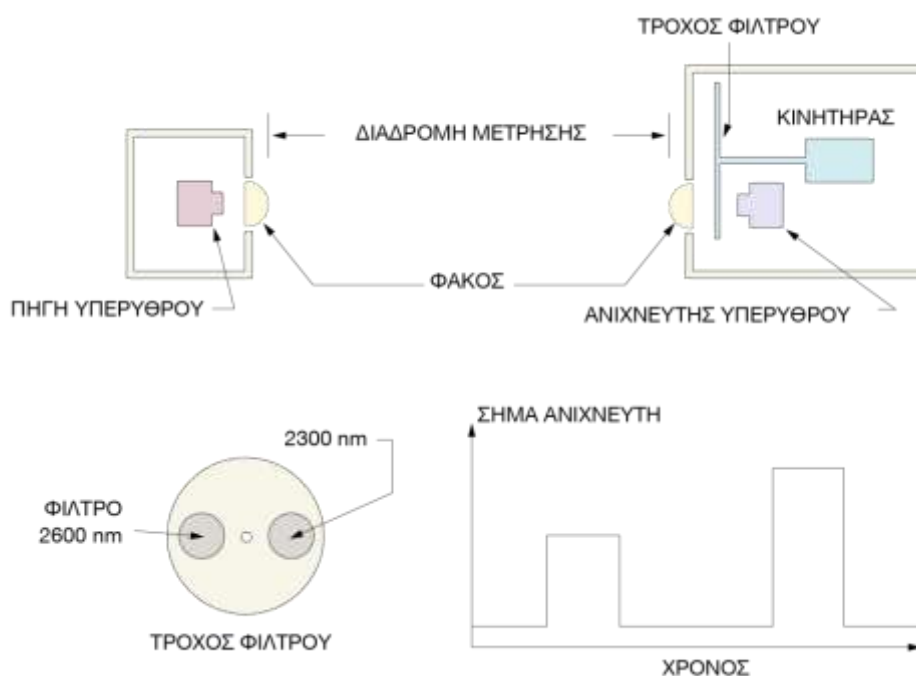
όπου  $I$  είναι η ένταση της ακτινοβολίας μετά τη διέλευση από την ατμόσφαιρα,  $I_0$  είναι η ένταση της πηγής,  $k_{\lambda}$  είναι ο συντελεστής απορρόφησης ( $\text{m}^2\text{kg}^{-1}$ ),  $d_v$  είναι η απόλυτη υγρασία ( $\text{kg m}^{-3}$ ) και  $x$  είναι η διαδρομή μέσα στην ατμόσφαιρα (m).



Οι υδρατμοί απορροφούν μόνο σε συγκεκριμένα μήκη κύματος. Η απορρόφηση αυτή λαμβάνει χώρα, κυρίως, στο υπεριώδες και στο υπέρυθρο. Η γραμμή Lyman-alpha στο υπεριώδες (~121,56 nm) και διάφορα μήκη κύματος στην περιοχή περίπου από τα 1.000 nm μέχρι τα 3.000 nm (π.χ. οι υδρατμοί έχουν ισχυρές γραμμές απορρόφησης στα 2.663 και 2.734 nm) χρησιμοποιούνται ευρέως σε διάφορες κατασκευές φασματοσκοπικών υγρομέτρων.

- Τα υγρόμετρα υπέρυθρου βασίζονται στη σύγκριση της απορρόφησης που υφίσταται μια ακτινοβολία σε ένα μήκος κύματος στο υπέρυθρο, στο οποίο υπάρχει ισχυρή απορρόφηση από τους υδρατμούς, με την απορρόφηση που υφίσταται ακτινοβολία σε άλλο μήκος κύματος, στο οποίο δεν απορροφούν οι υδρατμοί. Έτσι, π.χ. τα υγρόμετρα υπέρυθρου χρησιμοποιούν δύο μήκη κύματος, ένα στην περιοχή απορρόφησης του νερού (~2.600 nm) και ένα στην περιοχή μη απορρόφησης (~2.300 nm). Μια πιθανή τέτοια διάταξη φαίνεται στο σχήμα 3.3.
- Από την άλλη πλευρά, τα υγρόμετρα υπεριώδους βασίζονται μόνο στην ισχυρή απορρόφηση της υπεριώδους ακτινοβολίας από τους υδρατμούς στα 121,56 nm. Το γυαλί και άλλα υλικά είναι αδιαφανή σε αυτό το μήκος κύματος, οπότε, τα παράθυρα των οργάνων κατασκευάζονται από φθοριούχο μαγνήσιο. Δυστυχώς, στο ίδιο μήκος κύματος απορροφούν τόσο το οξυγόνο όσο και το όζον. Η συνεισφορά του όζοντος στην τροπόσφαιρα είναι μικρή, ενώ η απορρόφηση από το οξυγόνο είναι ασθενής και η επίδρασή της μπορεί να ληφθεί υπόψη εφαρμόζοντας μια μικρή διόρθωση.

Τα υγρόμετρα υπέρυθρου είναι εξειδικευμένες συσκευές υψηλού κόστους, οι οποίες χρησιμοποιούνται μόνο σε πολύ ειδικές εφαρμογές.



**Σχήμα 3.3** Σχηματική παρουσίαση της υλοποίησης ενός υγρομέτρου υπέρυθρου.

### 3.6 Αρχές λειτουργίας άλλων υγρομέτρων

α) **Ηλεκτρικά υγρόμετρα:** Τα ηλεκτρικά υγρόμετρα στηρίζονται στη μεταβολή της ηλεκτρικής αγωγιμότητας υδατικών διαλυμάτων ηλεκτρολυτών, λόγω αντίστοιχης μεταβολής της συγκέντρωσης υδρατμών στην ατμόσφαιρα. Η ακρίβεια των ηλεκτρικών υγρομέτρων είναι πολύ καλή και, γι' αυτό τον λόγο, χρησιμοποιούνται ευρέως (WMO, 2008).

β) **Υγρόμετρα πυκνωτή:** Η χωρητικότητα ενός πυκνωτή εξαρτάται από το διηλεκτρικό υλικό που παρεμβάλλεται μεταξύ των οπλισμών του. Τα χαρακτηριστικά του διηλεκτρικού, όμως, εξαρτώνται από την ποσότητα υγρασίας που περιέχει το διηλεκτρικό (υπάρχει επίσης και μια μικρή εξάρτηση από τη θερμοκρασία). Έτσι, λοιπόν, χρησιμοποιώντας κατάλληλο διηλεκτρικό υλικό, είναι δυνατή η κατασκευή ενός πυκνωτή, του οποίου η χωρητικότητα μεταβάλλεται σε συνάρτηση με τη συγκέντρωση των υδρατμών της ατμόσφαιρας (Sonntag, 1994, Emeis, 2010).

Τα υγρόμετρα πυκνωτή έχουν πολύ καλή ακρίβεια και χρησιμοποιούνται σε πλήθος εφαρμογών, ιδιαίτερα τα τελευταία χρόνια.

### Βιβλιογραφία

- Brock, F. V. and S. J. Richardson (2001). *Meteorological Measurement Systems*, Oxford University Press, ISBN 0-19-513451-6
- DeFelice, T. P. (1998). *An Introduction to Meteorological Instrumentation and Measurement*. Prentice Hall, Upper Saddle River, NJ, 229 p.
- Emeis, St. (2010). *Measurement Methods in Atmospheric Sciences*, In situ and remote. Bornträger
- Sonntag, D. (1994). Advancements in the field of hygrometry. *Zeitschrift für Meteorologie*, Volume 3, Number 2, pp. 51-66.
- Strangeways IC. (2003). *Measuring the natural environment* (2nd edn). Cambridge University Press: Cambridge, UK.
- World Meteorological Organization (2008). *Guide to Meteorological Instruments and Methods of Observation* (Updated in 2010), WMO-No. 8, Geneva.

## ΚΕΦΑΛΑΙΟ 4: ΑΝΕΜΟΣ

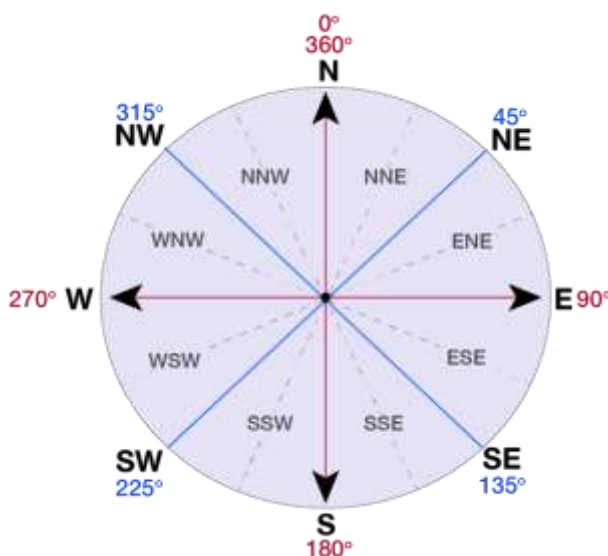
### Σύνοψη

Ο άνεμος αποτελεί την σημαντικότερη μετεωρολογική μεταβλητή σε θέματα ατμοσφαιρικής ρύπανσης. Το κεφάλαιο αυτό εστιάζεται στην παρουσίαση των σημαντικότερων διατάξεων μέτρησης της ταχύτητας και της διεύθυνσης του ανέμου καθώς και των ειδικών χαρακτηριστικών που απαιτούνται για τις διαφορετικές εφαρμογές. Παρουσιάζονται διατάξεις όπως το ανεμόμετρο κυπέλων και ο ανεμοδείκτης οι οποίες χρησιμοποιούνται για τον προσδιορισμό του μέσου ανέμου καθώς και τα ηχητικά και ηλεκτρικά ανεμόμετρα τα οποία χρησιμοποιούνται για τον προσδιορισμό των τυρβωδών διακυμάνσεων του ανέμου.

### 4.1 Γενικά για τον άνεμο

Άνεμο ονομάζουμε την κίνηση του αέρα σε σχέση με την επιφάνεια της γης. Ο άνεμος είναι ένα τρισδιάστατο διάνυσμα αλλά το μέγεθος της κατακόρυφης συνιστώσας του ανέμου είναι πολύ μικρότερο από το αντίστοιχο του οριζόντιου ανέμου, οπότε ο όρος χρησιμοποιείται σχεδόν αποκλειστικά για να δηλώσει τον οριζόντιο άνεμο. Ο κατακόρυφος άνεμος αναφέρεται συνήθως με το πλήρες όνομά του.

Όπως προαναφέρθηκε, ο άνεμος είναι διανυσματικό μέγεθος και, για τον προσδιορισμό του, χρειάζεται να γνωρίζουμε τόσο το μέγεθος (ταχύτητα ανέμου) όσο και τη διεύθυνσή του. Στη Μετεωρολογία η καθορισμένη διεύθυνση του ανέμου είναι αυτή από την οποία φυσά ο άνεμος – ο βόρειος άνεμος φυσά από τον Βορρά και, αντίστοιχα, η θάλασσα αύρα φυσά από τη θάλασσα. Η διεύθυνση του ανέμου ορίζεται γενικά σε μία στροφή ορισμένων μοιρών κατά τη φορά των δεικτών του ρολογιού από τον πραγματικό (γεωγραφικό) Βορρά (Σχήμα 4.1). Για τον συμβολισμό των ανέμων χρησιμοποιούνται στην ελληνική γλώσσα τα γράμματα του ελληνικού αλφάβητου (π.χ. Β = βόρειος, ΒΑ = βορειοανατολικός άνεμος), ενώ στη διεθνή βιβλιογραφία χρησιμοποιούνται τα αντίστοιχα του λατινικού αλφάβητου (π.χ. N = North = βόρειος άνεμος).



**Σχήμα 4.1** Πυξίδα των διευθύνσεων του ανέμου. Η διεύθυνση του ανέμου εκφράζεται είτε σε μοίρες του αζιμουθιακού κύκλου είτε ως σημεία της πυξίδας. Στην τελευταία περίπτωση, χρησιμοποιούνται 16 υποδιαιρέσεις.

## 4.2 Κλίμακες και μονάδες

Ο Ναύαρχος Beaufort καθόρισε πρώτος μία αριθμητική κλίμακα που κυμαίνεται από 0 (ήρεμος) έως 12 (τυφώνας) για να περιγράψει τη δύναμη του ανέμου, σύμφωνα με τα ορατά αποτελέσματά του. Αυτό είναι ένα σημαντικό πλεονέκτημα της κλίμακας Beaufort, γιατί ο προσδιορισμός της ταχύτητας του ανέμου μπορεί να γίνει από ένα έμπειρο παρατηρητή με οπτική αναγνώριση, ακόμη και σε περιπτώσεις κατά τις οποίες δεν υπάρχει διαθέσιμος εξοπλισμός. Ο διαχωρισμός των διαφόρων βαθμίδων της κλίμακας έγινε κατά την περίοδο 1800-1850, ενώ υπάρχουν δύο περιγραφικές ομάδες, μία πάνω από την ξηρά και μία πάνω από τη θάλασσα.

Εκτός από το ιστορικό της ενδιαφέρον, οι διάφοροι βαθμοί της κλίμακας Beaufort χρησιμοποιούνται, ακόμη και σήμερα, σε πολλές ναυτικές χώρες. Η αντίστοιχη ταχύτητα ορίζεται με μια εμπειρική σχέση ανάμεσα στον εκτιμώμενο αριθμό και τη μετρημένη ταχύτητα:

$$V = 0.836\sqrt{B^3} \quad (4-1)$$

όπου  $V$  είναι η ταχύτητα σε μέτρα το δευτερόλεπτο ( $\text{ms}^{-1}$ ) και  $B$  είναι ο αντίστοιχος αριθμός της κλίμακας Beaufort.

Η ανεμομετρική κλίμακα Beaufort και η αντίστοιχη ταχύτητα σε μέτρα το δευτερόλεπτο, παρουσιάζονται στον πίνακα 4.1.

Σήμερα, οι ενδεδειγμένες μονάδες μέτρησης της ταχύτητας του ανέμου είναι τα μέτρα ανά δευτερόλεπτο ( $\text{ms}^{-1}$ ). Παρόλα αυτά, συνεχίζουν να χρησιμοποιούνται σε πολλές περιπτώσεις μονάδες από το παρελθόν, όπως οι κόμβοι (knots), τα Beaufort και τα μίλια ανά ώρα. Οι παρακάτω σχέσεις μπορούν να χρησιμοποιηθούν για τη μετατροπή των μονάδων:

$$1 \text{ ms}^{-1} = 2.237 \text{ μίλια /ώρα} = 3.6 \text{ km/hour} = 3.281 \text{ ft/s} = 1.943 \text{ knots} \quad (4-2)$$

Βαθμοί Beaufort	Ονομασία	Ταχύτητα ανέμου σε 6 m πάνω από το έδαφος ( $\text{ms}^{-1}$ )
0	Νηνεμία	<0.6
1	Υποπνέων	0.6-1.7
2	Ασθενής	1.8-3.3
3	Λεπτός	3.4-5.2
4	Μέτριος	5.3-7.4
5	Λαμπρός	7.5-9.8
6	Ισχυρός	9.9-12.4
7	Σφοδρός	12.5-15.2
8	Ορμητικός	15.3-18.2
9	Θύελλα	18.3-21.5
10	Ισχυρή θύελλα	21.6-25.4
11	Σφοδρή θύελλα	25.5-29.0
12	Τυφώνας	>29.0

**Πίνακας 4.1** Ανεμομετρική κλίμακα Beaufort.

### 4.3 Υπολογισμός της κατακόρυφης κατανομής του ανέμου

Όπως προαναφέρθηκε, σε περιοχές όπου υπάρχουν μεγάλες πηγές ρύπανσης είναι προτιμότερο οι μετρήσεις του ανέμου να γίνονται σε ένα επίπεδο που αντιστοιχεί περίπου στο ύψος εκπομπής των ρύπων. Στις περισσότερες περιπτώσεις, όμως, αυτό δεν είναι δυνατόν, είτε γιατί οι εκπομπές γίνονται κοντά στην επιφάνεια της γης (π.χ. εκπομπές από την κυκλοφορία) είτε γιατί γίνονται σε μεγάλα ύψη (π.χ. υψηλές καμινάδες). Σε αυτές τις περιπτώσεις, οι μετρήσεις του ανέμου πρέπει να πραγματοποιούνται 10 m πάνω από την επιφάνεια της γης. Ο μετρούμενος άνεμος ονομάζεται, σε αυτήν την περίπτωση, άνεμος επιφανείας. Ένα κρίσιμο ερώτημα που προκύπτει είναι το πώς θα μπορούσαμε να επεκτείνουμε τον άνεμο από το ύψος μέτρησης στο ύψος εκπομπής των ρύπων. Ο απλούστερος τρόπος, αν και όχι πάντα πολύ ακριβής, είναι με τη χρήση του εκθετικού νόμου (power law). Σε αυτήν την περίπτωση, η κατακόρυφη κατανομή του ανέμου δίνεται από τη σχέση:

$$u(z) = u(z_1) (z/z_1)^p \quad (4-3)$$

όπου  $u(z)$  είναι η ταχύτητα του ανέμου στο ύψος  $z$ ,  $z_1$  είναι το ύψος της μέτρησης και  $p$  είναι ένας συντελεστής, ο οποίος παίρνει τιμές ανάλογα με την τραχύτητα του εδάφους και την επικρατούσα κλάση ευστάθειας στην ατμόσφαιρα (Πίνακας 4.2).

	υδάτινη επιφάνεια ( $z_0 \sim 0.0001$ m)	Χαμηλή βλάστηση ( $z_0 \sim 0.05$ m)	ώριμη, ψηλή βλάστηση ( $z_0 \sim 0.15$ m)	πόλη, δάσος ( $z_0 \sim 1.0$ m)
A	0.04	0.07	0.11	0.25
B	0.05	0.09	0.12	0.29
C	0.07	0.10	0.13	0.34
D	0.09	0.11	0.15	0.38
E	0.12	0.14	0.17	0.45
F	0.28	0.35	0.40	-

Πίνακας 4.2 Τιμές του εκθέτη  $p$  στην εξίσωση 4-3 σαν συνάρτηση του μήκους τραχύτητας  $z_0$ , και της επικρατούσας κλάσης ευστάθειας στην ατμόσφαιρα.

### 4.4 Χαρακτηριστικά ανεμομέτρων

Σημαντικότερα χαρακτηριστικά ανεμομέτρων είναι:

- ο μικρός όγκος,
- η καλή ακρίβεια των μετρήσεων,
- η ευαισθησία του οργάνου,
- η γραμμικότητα για μεγάλο εύρος ταχυτήτων αέρα.

Για προβλήματα που σχετίζονται με την ποιότητα του αέρα, τα ανεμόμετρα πρέπει να είναι ευαίσθητα και να έχουν καλή απόκριση σε χαμηλούς ανέμους, οι οποίοι συνήθως

επικρατούν σε περιπτώσεις υψηλών συγκεντρώσεων. Η ταχύτητα εκκίνησης του ανεμόμετρου δεν θα πρέπει να υπερβαίνει το  $0,5 \text{ m s}^{-1}$ . Από την άλλη πλευρά, σε εφαρμογές που σχετίζονται με αιολική ενέργεια ή την ασφάλεια αεροπλοΐας, είναι προτιμότερο να χρησιμοποιούνται όργανα με καλύτερη ακρίβεια σε υψηλούς ανέμους και πιο ανθεκτικά σε δυσχερείς καιρικές συνθήκες.

Η ταχύτητα του ανέμου επιφανείας μετριέται από κάποιο τύπο *ανεμόμετρου* ή *ανεμογράφου*. Η κατάλληλη τοποθέτηση του οργάνου, ώστε να εξασφαλίζει την ικανοποιητική συγκρισιμότητα των παρατηρήσεων σε διαφορετικούς σταθμούς, είναι ιδιαίτερα δύσκολη σε μετρήσεις ανέμου. Η τοποθέτηση πρέπει να υπακούει σε κανόνες και να μη γίνεται με τρόπο τυχαίο. Έτσι, η τοποθέτηση των οργάνων πρέπει τουλάχιστον να πληροί τις δύο προαναφερθείσες απαιτήσεις:

- α) να γίνει σε ύψος 10 m από την επιφάνεια («άνεμος επιφανείας»),
- β) σε περιοχή απαλλαγμένη από φυσικά ή τεχνητά εμπόδια.

Θεωρούμε ότι ένα φυσικό ή τεχνητό εμπόδιο δεν επηρεάζει τις ανεμολογικές μετρήσεις, εφόσον η απόσταση μεταξύ του ανεμογράφου και του εμποδίου είναι τουλάχιστον 10 φορές μεγαλύτερη από το ύψος του εμποδίου. Σημειώνεται ότι ούτε η τοποθέτηση στην οροφή των κτηρίων είναι σωστή (λάθη για μικρές ταχύτητες έως και 50% και για 5m/s περίπου 25%). Σε πολλές εφαρμογές, οι οποίες απαιτούν γνώση της μεταβολής του ανέμου μέσα στο ατμοσφαιρικό οριακό στρώμα, χρησιμοποιούμε ανεμόμετρα σε διάφορα ύψη. Το χαμηλότερο δεν μπορεί να βρίσκεται σε ύψος μικρότερο από 5 φορές του ύψους των στοιχείων τραχύτητας, ενώ το έδαφος δε θα πρέπει να έχει εμπόδια σε απόσταση 50 έως 100 φορές μεγαλύτερη από το ύψος στο οποίο είναι τοποθετημένο το υψηλότερο.

Είναι συνηθισμένη πρακτική σε μελέτες τοπικής κλίμακας ο άνεμος να θεωρείται σταθερός, τουλάχιστον στο οριζόντιο επίπεδο. Η παραδοχή αυτή δεν δημιουργεί μεγάλα προβλήματα, τουλάχιστον σε περιοχές χωρίς ιδιαίτερο ανάγλυφο, οι οποίες δεν επηρεάζονται από τοπικές κυκλοφορίες. Σε μεγαλύτερες κλίμακες, όμως, όπως και σε περιοχές με έντονο ανάγλυφο και ευρύ διαμελισμό, ο άνεμος παρουσιάζει μεγάλες γεωγραφικές μεταβολές και είναι απαραίτητο να γίνονται μετρήσεις σε περισσότερα του ενός σημεία για τον προσδιορισμό του πεδίου ροής στην υπό μελέτη περιοχή. Αυτός ο παράγοντας έχει την πρώτη προτεραιότητα για τον προσδιορισμό της διασποράς σε περιοχές με παρόμοια χαρακτηριστικά.

Ο άνεμος σε υψηλότερα επίπεδα μετριέται, συνήθως, είτε επιτόπια με *μπαλόνια* ή *ραδιοβολίσεις* είτε με τεχνικές τηλεπισκόπησης (π.χ. ακουστικό ραντάρ, SODAR). Παλαιότερα, η ταχύτητα του ανέμου σε επίπεδα όπου δεν ήταν δυνατή η επιτόπια μέτρηση προσδιοριζόταν από μετρήσεις της γωνιακής ταχύτητας των νεφών.

## 4.5 Ανεμόμετρα

Τα ανεμόμετρα είναι όργανα για τη μέτρηση της ταχύτητας του ανέμου, τα οποία έχουν δύο βασικά μεγέθη: τη σταθερά αποστάσεως (ή, αλλιώς, τη χρονική σταθερά του οργάνου) και το κατώτερο όριο λειτουργίας ή κατώφλι. Η σταθερά αποστάσεως είναι η διαδρομή την οποία πρέπει να διανύσει μία αέρια μάζα διαμέσου του ανεμόμετρου, ώστε να ανταποκριθεί το ανεμόμετρο κατά 63% της συνολικής μεταβολής από την αρχική στην τελική κατάσταση. Το κατώτερο όριο λειτουργίας είναι η χαμηλότερη ταχύτητα του αέρα, από την οποία το ανεμόμετρο αρχίζει να μετρά.

Για τη μέτρηση του ανέμου χρησιμοποιείται, κυρίως, μία από τις τρεις ιδιότητές του:

1. η κινητική του ενέργεια που προκαλεί περιστροφή, όπως στα ανεμόμετρα με κύπελλα και τα ανεμόμετρα τύπου έλικας ή ανεμόμυλου,
2. α) η πίεσή του, όπως στην περίπτωση των ανεμόμετρων δυναμικής πίεσης ή, αλλιώς, ανεμόμετρων με σωλήνα Pitot, και στα ανεμόμετρα με έλασμα πίεσης, β) η συχνότητα του παλμού της πίεσης του ανέμου, όπως στα ηχητικά και στα ακουστικά Doppler ανεμόμετρα,
3. η ψυκτική ικανότητα του ανέμου, όπως στο ηλεκτρικό ανεμόμετρο ή στο ανεμόμετρο θερμού σύρματος (hot wire anemometer).

Η οπισθέλκουσα του ανέμου σε ένα αντικείμενο δίνεται από τη σχέση:

$$F_d = \frac{1}{2} C_d \rho A V^2 \quad (4-4)$$

όπου  $C_d$  είναι ο συντελεστής αντίστασης,  $A$  είναι η διατομή του αντικειμένου ( $m^2$ ) και  $V$  είναι η ταχύτητα του ανέμου ( $ms^{-1}$ ). Ο συντελεστής αντίστασης εξαρτάται από το σχήμα του αντικειμένου και είναι, επίσης, συνάρτηση της ταχύτητας του ανέμου. Ο συντελεστής είναι αδιάστατος και παίρνει τιμές στο διάστημα 0-1.

Τα ανεμόμετρα κυπέλλων (cup anemometers) (Εικόνα 4.1) είναι τα πλέον διαδεδομένα και αποτελούνται από 3 ή 4 και, σε σπάνιες περιπτώσεις, μέχρι 6 κύπελλα κωνικά ή ημισφαιρικά στο σχήμα, τοποθετημένα συμμετρικά γύρω από έναν κάθετο άξονα με τη βοήθεια οριζόντιων ακτινωτών βραχιόνων μήκους 1 με 1,25 φορές μεγαλύτερο από τη διάμετρο των κυπέλλων (Strangeways, 2003). Το ανεμόμετρο κυπέλλων περιστρέφεται κατά τον άνεμο, γιατί ο συντελεστής αντίστασης της εσωτερικής πλευράς των κυπέλλων είναι μεγαλύτερος από τον αντίστοιχο της εξωτερικής πλευράς. Έτσι, λοιπόν, το όλο σύστημα εξαναγκάζεται σε περιστροφή, ο ρυθμός της οποίας είναι ανάλογος της ταχύτητας του ανέμου.



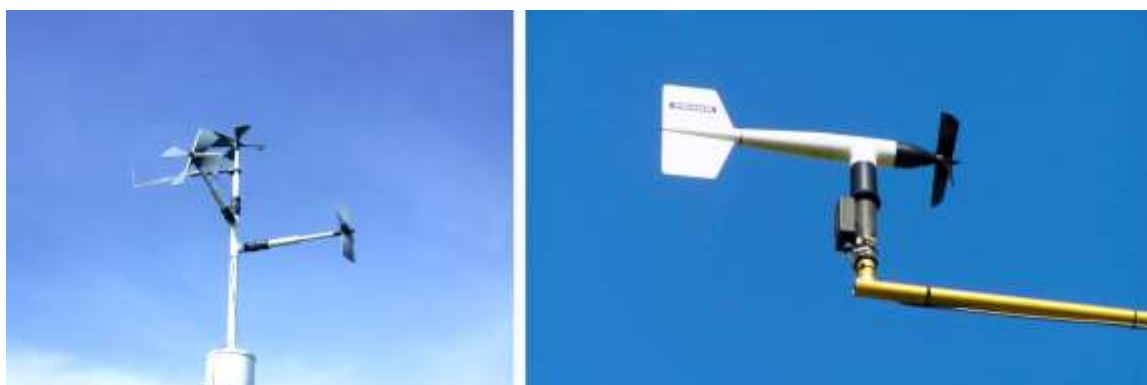
**Εικόνα 4.1** Ανεμόμετρο τριών κυπέλλων (επάνω αριστερά) και ανεμοδείκτης (επάνω δεξιά), τοποθετημένα σε χαμηλό ιστό (κάτω).

Ο ρυθμός περιστροφής των κυπέλλων είναι περίπου γραμμικός σε όλο το εύρος των περιβαλλοντικών μετρήσεων, με τη γραμμική ταχύτητα του ανέμου να είναι περίπου 2-3 φορές μεγαλύτερη από τη γραμμική ταχύτητα ενός σημείου στο κέντρο του κυπέλλου (Brock and Richardson, 2001, WMO, 2008). Με ηλεκτρογεννήτριες, μαγνητικούς διακόπτες ή ζεύγη φωτοδιόδων ή φωτοημιαγωγών που λειτουργούν ως φωτοηλεκτρικοί διακόπτες, κατάλληλα προσαρμοσμένοι στον άξονα περιστροφής, μετριέται ο ρυθμός περιστροφής των κυπέλλων και, κατά συνέπεια, η ταχύτητα του ανέμου. Τα κύπελλα πρέπει να είναι κατασκευασμένα από ελαφρύ υλικό (πλαστικό ή πολυεστέρα), ώστε να επιτυγχάνεται χαμηλή ταχύτητα εκκίνησης του ανεμόμετρου. Τα ανεμόμετρα έλικας είναι ίδια με τα ανεμόμετρα κυπέλλων, αλλά έχουν ως περιστρεφόμενο τμήμα μία μικρή έλικα γνωστού βήματος, αποτελούμενη, συνήθως, από 3 ή 4 πτερύγια. Αν το ανεμόμετρο έλικας είναι περιστρεφόμενο και προσανατολίζεται πάντα προς τη διεύθυνση από την οποία φυσά ο άνεμος, είναι τύπου ανεμόμυλου. Όταν το ανεμόμετρο έχει δύο τουλάχιστον ακίνητα στελέχη υπό γωνία  $90^\circ$  (τρία στελέχη, αν μετρά ταυτόχρονα και τον κατακόρυφο άνεμο), τότε ονομάζεται *διανυσματικό* (Εικόνα 4.2). Τα δύο στελέχη του ανεμομέτρου είναι προσανατολισμένα κατά τους άξονες Ανατολή-Δύση και Βορράς-Νότος και κάθε στέλεχος μετρά μία συνιστώσα του διανύσματος της ταχύτητας του οριζοντίου ανέμου. Έτσι, η στιγμιαία ταχύτητα προκύπτει από το διανυσματικό άθροισμα των συνιστωσών:

$$V = \sqrt{(u_x^2 + u_y^2)} \quad (4-5)$$

Όπως εξηγείται σε επόμενη ενότητα, οι δύο συνιστώσες του οριζοντίου ανέμου μπορούν να χρησιμοποιηθούν και για τον υπολογισμό της διεύθυνσης του ανέμου.

Στο *ηλεκτρικό ανεμόμετρο*, το ρεύμα που απαιτείται για να κρατήσει σταθερή την ηλεκτρική αντίσταση (και, κατά συνέπεια, τη θερμοκρασία) ενός λεπτού πλατινένιου καλωδίου, το οποίο εκτίθεται στον αέρα, μπορεί να χρησιμοποιηθεί ως μέτρο της ταχύτητας του αέρα. Αλλιώς, μπορεί να τοποθετηθεί μία μεγάλη αντίσταση σε σειρά με το καλώδιο, το ρεύμα να κρατιέται σταθερό και η μεταβαλλόμενη πτώση τάσης στα άκρα του καλωδίου χρησιμοποιείται ως μέτρο του ανέμου. Το όργανο αυτό δεν χρησιμοποιείται σε επιχειρησιακές εφαρμογές, παρά μόνο σε ερευνητικές δραστηριότητες ή εξειδικευμένες μελέτες, σε περιπτώσεις που είναι σημαντική για τον μελετητή η ταχύτητα απόκρισης του οργάνου στις αλλαγές του ανέμου (Lenschow, 1986, Emeis, 2010).



**Εικόνα 4.2** Δύο τύποι ανεμόμετρων με έλικα: διανυσματικό ανεμόμετρο με τρεις έλικες για την μέτρηση των τριών συνιστωσών του ανέμου (αριστερά) και ανεμόμετρο τύπου ανεμόμυλου (δεξιά).



Η λειτουργία των ηχητικών ανεμόμετρων (sonic anemometers) βασίζεται στο γεγονός ότι η ταχύτητα διάδοσης του ήχου μεταβάλλεται με την ταχύτητα του ανέμου (Εικόνα 4.3). Τα ανεμόμετρα αυτά είναι μεγάλης ευαισθησίας και έχουν εφαρμογή σε μελέτες ατμοσφαιρικών στροβίλων μικρής κλίμακας. Για ταχύτητες ανέμου από 0 έως 30  $\text{ms}^{-1}$  έχουν ακρίβεια μέχρι και  $0,3 \text{ ms}^{-1}$ . Λεπτομερής περιγραφή των ηχητικών ανεμόμετρων παρουσιάζεται από τους Kaimal (1980) και Kaimal and Bussinger (1963).



**Εικόνα 4.3** Ηχητικό ανεμόμετρο τοποθετημένο σε μετεωρολογικό πύργο (δεξιά) και κοινοτικό πλάνο στο οποίο εμφανίζονται τα τρία ζεύγη για τη μέτρηση των τριών συνιστωσών του ανέμου.

Τα ανεμόμετρα *Doppler* συνήθως αποτελούν τμήμα συσκευής ηχητικού ραντάρ (SO-DAR) για μέτρηση του ανέμου καθ' ύψος (μέχρι το πολύ ύψος 2 km), αν και είναι σχετικά χαμηλής ακρίβειας και μεγάλου όγκου και κόστους. Η αρχή λειτουργίας τους βασίζεται στο φαινόμενο της σκέδασης των ηχητικών κυμάτων από στροβίλους μικρής κλίμακας.

#### 4.6 Ανεμοδείκτες

Σε πολλές εφαρμογές, η ακρίβεια της μέτρησης της διεύθυνσης του ανέμου είναι καθοριστική για τον υπολογισμό της διασποράς. Ιδιαίτερα ευαίσθητες είναι οι περιπτώσεις στις οποίες έχουμε εκπομπή από σημειακές πηγές, όπου μία διαφορά λίγων βαθμών μπορεί να έχει μεγάλη επίπτωση στις υπολογιζόμενες βραχυπρόθεσμες συγκεντρώσεις. Τα βιομηχανικά ατυχήματα αποτελούν το κατάλληλο παράδειγμα, όπου η διεύθυνση του ανέμου θα δώσει την απάντηση στο ερώτημα για το πού θα καταλήξουν οι ρύποι. Η διεύθυνση του ανέμου θα πρέπει να μετριέται με ακρίβεια  $5^\circ$ , ενώ η διακριτότητα θα πρέπει να είναι  $1^\circ$ .

Ένα όργανο που δηλώνει τη διεύθυνση από την οποία φυσάει ο άνεμος, το οποίο συνήθως συνοδεύει το ανεμόμετρο, ονομάζεται ανεμοδείκτης (Εικόνα 4.1), αν και, σε πολλές περι-

πτώσεις, όπως στα διανυσματικά ανεμόμετρα, η μέτρηση της διεύθυνσης του ανέμου γίνεται ταυτόχρονα με τη μέτρηση της ταχύτητας. Υπάρχουν πολλοί τύποι ανεμοδεικτών, αλλά στηρίζονται όλοι σε ένα υπόδειγμα ανεμοδείκτη (DeFelice, 1998): ένας οριζόντιος βραχίονας, περιστρεφόμενος γύρω από μία ατσαλένια άτρακτο, ο οποίος στο ένα άκρο έχει έναν δείκτη και στο άλλο μια αεροτομή της ρευματικής γραμμής. Κάτω από το πτερύγιο υπάρχει, πολλές φορές, ένας σταθερός σκελετός που δείχνει τα τέσσερα σημεία του οριζοντα (κάτι που διευκολύνει την οπτική αναγνώριση της μετρούμενης διεύθυνσης). Αν είναι καλά εκτεθειμένο και σχεδόν ισορροπημένο, τότε κάθε τύπος πτερυγίου θα δείχνει τη σωστή διεύθυνση σε μέτριους ή και σε ισχυρούς ανέμους. Ο χρόνος απόκρισης του ανεμοδείκτη εξαρτάται από τη μηχανική κατασκευή του και από το σχήμα του.

Από τους κυριότερους τύπους ανεμοδεικτών είναι οι *ανεμοδείκτες μεταβλητής ηλεκτρικής αντίστασης*, οι οποίοι είναι ευρέως διαδεδομένοι λόγω της ικανοποιητικής τους ακρίβειας, καθώς και οι *ανεμοδείκτες φωτοδιόδων* που έχουν περιορισμένη εφαρμογή, λόγω της περιορισμένης τους ακρίβειας.

Πολύ μεγάλη ακρίβεια έχει η διανυσματική μέτρηση της διεύθυνσης του ανέμου και, επομένως, χρησιμοποιούνται, συνήθως, διανυσματικά ανεμόμετρα (έλικας ή ηχητικά) για εφαρμογές όπου απαιτείται λεπτομερής γνώση της διεύθυνσης του ανέμου (π.χ. πειράματα διασποράς ρύπων).

Έτσι, από τις μετρούμενες συνιστώσες του οριζόντιου ανέμου  $u_x$  και  $u_y$ , προκύπτει η διεύθυνση του ανέμου σύμφωνα με τη σχέση:

$$d = \arctan(u_y / u_x) \quad (4-6)$$

## Βιβλιογραφία

- Brock, F. V. and S. J. Richardson (2001). *Meteorological Measurement Systems*, Oxford University Press, ISBN 0-19-513451-6
- DeFelice, T. P. (1998). *An Introduction to Meteorological Instrumentation and Measurement*. Prentice Hall, Upper Saddle River, NJ, 229 p.
- Emeis, St. (2010). *Measurement Methods in Atmospheric Sciences*, In situ and remote. Bornträger
- Kaimal, J.C. (1980). Sonic anemometers. *Air-sea Interaction: Instruments and Methods* (F. Dobson, L. Hasse and R. Davis, eds), Plenum Press, New York, pp. 81 rem
- Kaimal J.C. and J. A. Businger (1963). A Continuous Wave Sonic Anemometer-Thermometer. *J. Appl. Meteor.*, 2, 156 - 164.
- Lenschow, D.H. (ed.) (1986). *Probing the Atmospheric Boundary Layer*, 269 p., *American Meteorological Society*, Boston MA.
- Strangeways IC. (2003). *Measuring the natural environment* (2nd edn). Cambridge University Press: Cambridge, UK.
- World Meteorological Organization (2008). *Guide to Meteorological Instruments and Methods of Observation* (Updated in 2010), WMO-No. 8, Geneva.

## ΚΕΦΑΛΑΙΟ 5: ΑΤΜΟΣΦΑΙΡΙΚΗ ΠΙΕΣΗ

### Σύνοψη

Στο κεφάλαιο αυτό παρουσιάζονται οι σημαντικότεροι τύποι οργάνων που χρησιμοποιούνται για τη μέτρηση της ατμοσφαιρικής πίεσης. Γίνεται εκτενής αναφορά στο υδραργυρικό βαρόμετρο το οποίο αποτελεί όργανο αναφοράς. Στην συνέχεια παρουσιάζεται η αρχή λειτουργίας και τα σημαντικότερα χαρακτηριστικά του ανεροειδούς βαρομέτρου. Τέλος παρουσιάζονται σε συντομία ένας αριθμός από ηλεκτρονικά βαρόμετρα τα οποία χρησιμοποιούνται σήμερα ευρύτατα για τη συνεχή μέτρηση της ατμοσφαιρικής πίεσης.

### 5.1 Γενικά για την ατμοσφαιρική πίεση

Πίεση, ως γνωστό, είναι η δύναμη ανά μονάδα επιφάνειας ασκούμενη σε μία επιφάνεια ενός υγρού ή ενός αερίου που βρίσκεται σε επαφή με αυτή. Η πίεση σε κάθε σημείο ρευστού ασκείται ίσα προς όλες τις διευθύνσεις. Η στατική πίεση που ασκεί η ατμόσφαιρα στην επιφάνεια της γης δίνεται από τη σχέση:

$$p = \int_0^{\infty} g \rho dz \quad (5-1)$$

Εκτός από την στατική πίεση, υπάρχει και η δυναμική πίεση, η οποία ασκείται από τον άνεμο. Η δυναμική πίεση μπορεί να υπολογισθεί από την εξίσωση:

$$\Delta p = \frac{1}{2} C \rho V^2 \quad (5-2)$$

όπου  $\Delta p$  είναι η δυναμική πίεση σε Pa και C είναι ένας συντελεστής, ο οποίος τυπικά παίρνει τιμές κοντά στη μονάδα. Η δυναμική πίεση που ασκείται είναι σχετικά μικρή, π.χ. άνεμος με ταχύτητα  $13 \text{ ms}^{-1}$  ασκεί, περίπου, μόνο ένα χιλιοστό της πίεσης της ατμόσφαιρας. Κατά συνέπεια, η ατμοσφαιρική πίεση σε κάθε σημείο είναι, με καλή προσέγγιση, το βάρος του αέρα που βρίσκεται κάθετα επάνω σε μία μονάδα επιφάνειας με κέντρο το σημείο. Αν και η ατμόσφαιρα βρίσκεται σε αδιάκοπη κίνηση, εμείς δεχόμαστε, λοιπόν, την απλουστευμένη περίπτωση, κατά την οποία η ατμοσφαιρική πίεση σε κάποια στάθμη μιας κατακόρυφης ατμοσφαιρικής στήλης οφείλεται μόνο στο βάρος ανά μονάδα επιφάνειας που εξασκεί ο αέρας, ο οποίος βρίσκεται πάνω από αυτήν τη στάθμη. Συνεπώς, λέμε ότι έχουμε υδροστατική ισορροπία. Σε αυτή την περίπτωση, η ελάττωση της ατμοσφαιρικής πίεσης με το ύψος περιγράφεται από την υδροστατική εξίσωση με τη μορφή:

$$dp = - \rho g dz \quad (5-3)$$

όπου p είναι η πίεση,  $\rho$  η πυκνότητα του αέρα, g είναι η επιτάχυνση της βαρύτητας και z το ύψος. Απαλείφοντας την πυκνότητα, με τη βοήθεια της καταστατικής εξίσωσης:

$$P = \rho R_a T \quad (5-4)$$

όπου  $R_a$  είναι η ειδική σταθερά με τιμή  $287 \text{ J kg}^{-1} \text{ K}^{-1}$ , ολοκληρώνοντας από το ύψος 0 έως z και λαμβάνοντας, αντί θερμοκρασίας, τη μέση τιμή θερμοκρασίας του θεωρούμε-

νου στρώματος  $T_m$  ως σταθερή, και με την παραδοχή, βέβαια, ότι και τα  $g$  και  $R_a$  είναι σταθερά, προκύπτει η σχέση:

$$P_z = P_0 \exp(-gz/R_a T_m) \quad (5-5)$$

με  $P_0$  την πίεση στην επιφάνεια. Αντίστροφα, μπορούμε να υπολογίσουμε τη μεταβολή του ύψους ως συνάρτηση της πίεσης:

$$z_1 = \frac{R T_m}{g} \ln\left(\frac{P_0}{P_1}\right) + z_0 \quad (5-6)$$

όπου  $z_1$  είναι το ύψος πάνω από την επιφάνεια της θάλασσας,  $p_0$  η ατμοσφαιρική πίεση στην επιφάνεια της θάλασσας ( $z_0=0$ ) και  $p_1$  η πίεση στο ύψος  $z_1$ . Η (5-6) αναφέρεται συχνά ως υψομετρική εξίσωση.

Εκτός από την τρέχουσα πίεση θα πρέπει να προσδιορίζεται, επίσης, η τάση της πίεσης (Ζιακόπουλος, 2009). Η τάση της πίεσης αποτελείται από δύο μέρη, από τη μεταβολή της πίεσης και τα χαρακτηριστικά της πίεσης. Η μεταβολή της πίεσης είναι η διαφορά της μετρούμενης πίεσης στην αρχή και το τέλος μιας συγκεκριμένης χρονικής περιόδου (συνήθως, τρεις ώρες). Τα χαρακτηριστικά της πίεσης είναι μια ένδειξη για τον τρόπο με τον οποίο η πίεση άλλαξε κατά τη διάρκεια αυτής της χρονικής περιόδου, π.χ. μειούμενη και μετά αυξανόμενη ή αυξανόμενη και μετά εντονότερα αυξανόμενη.

## 5.2 Μονάδες πίεσης

Η πίεση εκφράζεται σε μονάδες Pascal (Pa), όπου:

$$1 Pa = 1 N m^{-2} = 10 dynes cm^{-2} \quad (5-7)$$

Προκειμένου να υπάρχει συμβατότητα με τις μονάδες που χρησιμοποιούνταν παλιότερα (millibar, mbar), είναι συνηθισμένη πρακτική να εκφράζεται η πίεση σε hPa (hectoPascal), το οποίο είναι ισοδύναμο με 1 χιλιοστό του bar:

$$1 mbar = 10^{-3} bar = 1 hPa = 102 Pa = 102 N m^{-2} \quad (5-8)$$

Παλαιότερα η πίεση εκφραζόταν, επίσης, σε millimetres (χιλιοστόμετρα) ή σε ίντσες (inches), ως το ισοδύναμο ύψος μίας κολόνας υδράργυρου (Hg) υπό κανονική πυκνότητα ( $13.5951 \text{ gr cm}^{-3}$ ), υπό συνθήκες κανονικής επιτάχυνσης βαρύτητας ( $9,8 \text{ m s}^{-2}$ ) που απαιτείται για να εξισορροπήσει την ατμοσφαιρική πίεση.

$$1 mbar = 1 hPa = 0.750 mm Hg = 0.029530 in Hg \quad (5-9)$$

Η πίεση "μίας ατμόσφαιρας" (1 atm) στη μέση στάθμη της θάλασσας (ΜΣΘ) ισούται με:

$$1 atm = 1.01325 \cdot 10^5 N m^{-2} = 760 mmHg = 1013.25 mbar = 1013.25 hPa \quad (5-10)$$

### 5.3 Μέτρηση της ατμοσφαιρικής πίεσης

Η πίεση του αέρα μετριέται με *βαρόμετρα*, από τα οποία υπάρχουν, μεταξύ άλλων, σε ευρεία χρήση τρεις τύποι (Strangeways, 2003, WMO, 2008, Αργυρίου, 2004):

- α) το βαρόμετρο υγρών, το οποίο σε όλες τις πρακτικές εφαρμογές είναι ένα υδραργυρικό βαρόμετρο,
- β) το ανεροειδές (μεταλλικό) βαρόμετρο και
- γ) το ηλεκτρονικό βαρόμετρο.

#### 5.3.1 Υδραργυρικό βαρόμετρο

Ο πρώτος που μέτρησε με επιτυχία την πίεση του αέρα ήταν ο Ιταλός φυσικός Evangelista Toricelli, ο οποίος το 1643 χρησιμοποίησε έναν γυάλινο σωλήνα μήκους 1 m και τομής 1 cm<sup>2</sup>, κλειστό στο ένα άκρο του, τον οποίο γέμισε με υδράργυρο. Κλείνοντας το ανοικτό άκρο του σωλήνα με το δάκτυλό του, γύρισε τον σωλήνα ανάποδα και βύθισε το ανοικτό άκρο σε μια λεκάνη που περιείχε υδράργυρο. Τραβώντας το δάκτυλό του, παρατήρησε ότι η στάθμη του υδραργύρου στον σωλήνα άρχισε να κατεβαίνει μέχρι που σταμάτησε σε ένα συγκεκριμένο ύψος. Σε αυτό το σημείο το βάρος της στήλης του υδραργύρου ισορροπεί την πίεση της ατμόσφαιρας. Όταν αυξάνεται η ατμοσφαιρική πίεση, ο υδράργυρος ανεβαίνει ψηλότερα στον σωλήνα (το βαρόμετρο ανέρχεται), ενώ όταν μειώνεται η ατμοσφαιρική πίεση, ο υδράργυρος κατεβαίνει στον σωλήνα (το βαρόμετρο πέφτει).

Αρχικά, τα υδραργυρικά βαρόμετρα χρησιμοποιούνταν περισσότερο για τη μέτρηση του υψομέτρου, αλλά γρήγορα αναγνωρίστηκε η μετεωρολογική τους σημασία και εξαπλώθηκε η χρήση τους σε μετεωρολογικούς σταθμούς.

Σύμφωνα με τον νόμο του Νεύτωνα ισχύει ότι:

$$F = m \cdot g \quad (5-11)$$

Η μάζα του υδράργυρου είναι:

$$m = \rho_m \cdot h \cdot A_c \quad (5-12)$$

όπου  $\rho_m$  είναι η πυκνότητα του υδράργυρου,  $h$  το ύψος της στήλης του και  $A_c$  είναι η επιφάνεια της του σωλήνα. Επειδή η πίεση είναι η δύναμη ανά μονάδα επιφανείας:

$$p = \frac{F}{A_c} \quad (5-13)$$

Συνδυάζοντας τις (5-11) - (5-13) λαμβάνουμε:

$$p = \rho_m \cdot h \cdot g \quad (5-14)$$

Το υδραργυρικό βαρόμετρο αποτελεί ένα από τα ακριβέστερα όργανα για τη μέτρηση της πίεσης του αέρα (DeFelice, 1998). Όπως προκύπτει από την εξίσωση (5-14), ο προσδιορισμός της πίεσης απαιτεί γνώση των παρακάτω:

- α) του ύψους της στήλης του υδραργύρου στη συγκεκριμένη θερμοκρασία,
- β) της θερμοκρασίας που δείχνει το θερμόμετρο του βαρομέτρου,
- γ) της επιτάχυνσης της βαρύτητας στον συγκεκριμένο σταθμό.

Στο εγχειρίδιο κάθε βαρομέτρου υπάρχουν οδηγίες για τον τρόπο με τον οποίο γίνονται οι παραπάνω μετρήσεις και τις διορθώσεις που απαιτούνται για τον προσδιορισμό της ατμοσφαιρικής πίεσης. Η πίεση στον κάθε σταθμό μέτρησης ανάγεται στους 0°C και υπολογίζεται, επίσης, η πίεση στην επιφάνεια της θάλασσας, χρησιμοποιώντας την εξίσωση (5-5).



**Εικόνα 5.1** Τύποι υδραργυρικών βαρομέτρων. Το δοχείο υδραργύρου βρίσκεται στο κάτω μέρος, ενώ η κλίμακα στο πάνω μέρος του βαρομέτρου.

Στις μετεωρολογικές παρατηρήσεις προσπαθούμε να επιτύχουμε μια ακρίβεια  $\pm 0,1$  mbar. Στην πραγματικότητα, όμως, θα πρέπει να θεωρήσουμε ότι υπάρχει ένα σφάλμα περίπου 0,2-0,3 mbar, το οποίο οφείλεται, κατά κύριο λόγο, στη δυσκολία προσδιορισμού της θερμοκρασίας της στήλης υδραργύρου. Γνωστότεροι τύποι επιστημονικών υδραργυρικών βαρομέτρων είναι το βαρόμετρο Fortin και το βαρόμετρο Kew.

### 5.3.2 Ανεροειδές (μεταλλικό) βαρόμετρο

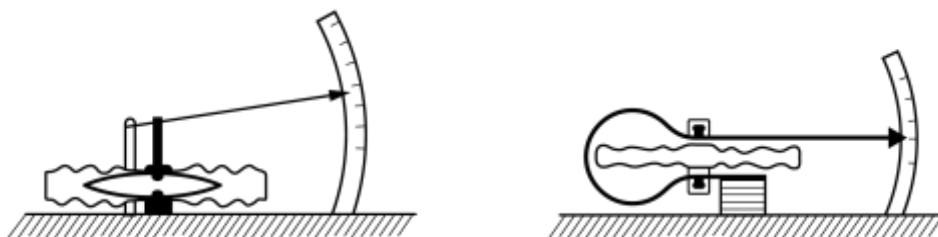
Τα μεταλλικά βαρόμετρα έχουν μικρότερη ακρίβεια από τα υδραργυρικά, αλλά είναι χαμηλού κόστους, η χρήση τους είναι ευκολότερη και είναι, επίσης, ευκολότερο να μεταφερθούν. Τα πλεονεκτήματα αυτά, αλλά και η διακοσμητική του αξία (Εικόνα 5.2) συντέλεσαν ώστε το ανεροειδές βαρόμετρο να γίνει ο πιο συνηθισμένος τύπος βαρομέτρων που χρησιμοποιείται στα σπίτια. Την τελευταία δεκαετία, όμως, έχουν γίνει πολύ προσιτά τα ηλεκτρονικά βαρόμετρα, τα οποία, τελικά, αναμένεται να γίνουν τα πιο συνηθισμένα βαρόμετρα.



**Εικόνα 5.2:** Συνηθισμένο μεταλλικό βαρόμετρο του εμπορίου. Η ατμοσφαιρική πίεση εμφανίζεται, τόσο σε ίντσες υδραργύρου (εξωτερική κλίμακα) όσο και σε mbar (εσωτερική κλίμακα).

Το ευαίσθητο τμήμα του ανεροειδούς βαρόμετρου αποτελείται από ένα δοχείο (κάψουλα) με μεγάλη ευκαμψία, από το οποίο έχει αφαιρεθεί ο αέρας. Ένα μεταλλικό έλασμα τοποθετημένο στο εσωτερικό εμποδίζει το δοχείο να διπλωθεί τελείως (DeFelice, 1998). Όταν αυξάνεται η ατμοσφαιρική πίεση, συμπιέζεται το δοχείο, ενώ όταν μειώνεται η ατμοσφαιρική πίεση, το δοχείο διευρύνεται. Ένα σύστημα μοχλών μεγεθύνει μέχρι εκατό φορές αυτές τις μεταβολές και τις μεταφέρει σε έναν δείκτη που κινείται κατά μήκος μιας κλίμακας (Σχήμα 5.1). Για τη βαθμονόμηση της κλίμακας χρησιμοποιείται κάποιο απόλυτο όργανο.

Γνωστότερος τύπος ανεροειδούς βαρόμετρου είναι το βαρόμετρο Paulin.



**Σχήμα 5.1** Ανεροειδές βαρόμετρο με εσωτερικό (αριστερά) ή εξωτερικό (δεξιά) έλασμα.

### 5.3.3 Ηλεκτρονικά βαρόμετρα

Τα ηλεκτρονικά βαρόμετρα χρησιμοποιούν αισθητήρια κύτταρα, των οποίων τα επίπεδα αντίστασης ή χωρητικότητας είναι επαρκώς ευαίσθητα στην αλλαγή της ατμοσφαιρικής πίεσης, ώστε να αποκρίνονται επαρκώς στις μικρές μεταβολές της ατμοσφαιρικής πίεσης (Emeis, 2010). Τα περισσότερα σύγχρονα βαρόμετρα κάνουν χρήση από μορφοτροπείς (transducers), οι οποίοι μετατρέπουν την απόκριση του αισθητήρα σε μια ηλεκτρική ποσότητα που σχετίζεται με την πίεση, είτε με τη μορφή ενός αναλογικού σήματος (π.χ. ηλεκτρική τάση DC ή AC με συχνότητα που σχετίζεται με την πίεση) είτε με τη μορφή ενός ψηφιακού σήματος (π.χ. συχνότητα παλμού), ή, ακόμη, με τυποποιημένα πρωτόκολλα επικοινωνίας, όπως είναι το RS232 ή το IEEE488. Τα αναλογικά σήματα μπορούν να εμφανίζονται σε διάφορους ηλεκτρονικούς μετρητές. Οθόνες και συστήματα απόκτησης δεδομένων χρησιμοποιούνται για την εμφάνιση ψηφιακών σημάτων ή ψηφιοποιημένων αναλογικών σημάτων.

Τα σύγχρονα ψηφιακά βαρόμετρα χρησιμοποιούν διάφορα επίπεδα πλεονασμού για να βελτιώσουν την μακροχρόνια ευστάθεια και ακρίβεια των μετρήσεων. Μια τεχνική βασίζεται στην χρήση τριών αισθητήρων, οι οποίοι λειτουργούν ανεξάρτητα, υπό τον έλεγχο ενός κεντρικού μικροεπεξεργαστή. Ακόμη υψηλότερη ακρίβεια και ευστάθεια μπορεί να επιτευχθεί χρησιμοποιώντας τρία εντελώς ανεξάρτητα βαρόμετρα, τα οποία χρησιμοποιούν τρία σετ μορφοτροπέων πίεσης και μικροεπεξεργαστές. Καθένα από αυτά περιλαμβάνει εσωτερικό θερμόμετρο, το οποίο χρησιμοποιείται για τη διόρθωση της θερμοκρασίας.

### **Μορφοτροπείς Ανεροειδούς μετατόπισης**

Όπως προαναφέρθηκε, η μέτρηση της μετατόπισης μιας ανεροειδούς κάψουλας είναι μια σημαντική μέθοδος για μετρήσεις ακριβείας της πίεσης για μετεωρολογικές εφαρμογές. Η αρχή της μέτρησης είναι η ίδια με αυτή του ανεροειδούς βαρομέτρου, αλλά η φυσική κίνηση της κάψουλας γίνεται αισθητή από πυκνωτή, ο οποίος είναι εγκατεστημένος μέσα στο δοχείο κενού. Σε μια τέτοια διάταξη χρησιμοποιούνται τρεις πανομοιότυπες μονάδες, από τα αποτελέσματα των οποίων υπολογίζεται μια μέση τιμή.

### **Ψηφιακά βαρόμετρα πιεζο-ηλεκτρικά**

Μετρήσεις της ατμοσφαιρικής πίεσης μπορούν να πραγματοποιηθούν χρησιμοποιώντας το πιεζο-ηλεκτρικό φαινόμενο. Μια συνηθισμένη διάταξη περιλαμβάνει τέσσερις αντιστάσεις τοποθετημένες πάνω σε μια ευέλικτη επιφάνεια ενός υποστρώματος μονοκρυσταλλικού πυριτίου, οι οποίες συνδέονται μεταξύ τους, ώστε να σχηματίσουν μια γέφυρα Wheatstone.

## **Βιβλιογραφία**

### **Ελληνική**

Αργυρίου Α. (2004). *Αισθητήρες ημιαγωγών, Αισθητήρες θερμικοί, μηχανικοί, μαγνητικοί, αισθητήρες ακτινοβολίας και χημικοί αισθητήρες*. Σημειώσεις για το Διατμηματικό Πρόγραμμα Μεταπτυχιακών Σπουδών στην Ηλεκτρονική & Επεξεργασία της Πληροφορίας, Πανεπιστήμιο Πατρών, Πάτρα.

Ζιακόπουλος Δ. (2008) *Καιρός: Ο γιος της Γης και του Ήλιου*. ΤΟΜΟΣ II, *Η Γνώση*. Ιδιωτική Έκδοση, 259 σελίδες.

### **Αγγλική**

Brock, F. V. and S. J. Richardson (2001). *Meteorological Measurement Systems*, Oxford University Press, ISBN 0-19-513451-6

DeFelice, T. P. (1998). *An Introduction to Meteorological Instrumentation and Measurement*. Prentice Hall, Upper Saddle River, NJ, 229 p.

Strangeways IC. (2003). *Measuring the natural environment* (2nd edn). Cambridge University Press: Cambridge, UK.

World Meteorological Organization (2008). *Guide to Meteorological Instruments and Methods of Observation* (Updated in 2010), WMO-No. 8, Geneva.



## ΚΕΦΑΛΑΙΟ 6: ΜΕΤΡΗΣΗ ΤΟΥ ΥΕΤΟΥ

### Σύνοψη

Στο κεφάλαιο αυτό παρουσιάζονται οι διατάξεις για την μέτρηση του υετού. Στην αρχή του κεφαλαίου γίνεται μια σύντομη ιστορική αναδρομή. Κατόπιν παρουσιάζονται οι απαιτήσεις για την επιχειρησιακή μέτρηση του υετού, οι οδηγίες για την έκθεση των διατάξεων καθώς και οι σημαντικότερες πηγές λάθους των μετρήσεων. Γίνεται σύντομη παρουσίαση των αναλογικών υετομέτρων ενώ παρουσιάζονται πιο εκτεταμένα τα καταγραφικά υετόμετρα, με έμφαση στις ηλεκτρικές διατάξεις. Τέλος, παρουσιάζονται οι σημαντικότερες τεχνικές τηλεπισκόπησης (ραντάρ βροχής και δορυφορική τηλεπισκόπηση του υετού) οι οποίες παρέχουν τη δυνατότητα.

### 6.1 Εισαγωγή

#### 6.1.1 Γενικά για τον υετό

Ως υετός (precipitation) ορίζονται τα υγρά ή στερεά προϊόντα της συμπύκνωσης των υδρατμών που πέφτουν από τα σύννεφα ή εναποτίθενται από τον αέρα πάνω στο έδαφος. Στην ελληνική βιβλιογραφία χρησιμοποιείται επίσης ο όρος *ατμοσφαιρικά κατακρημνίσματα*. Οι σημαντικότερες μορφές του υετού είναι η βροχή, το χιόνι και το χαλάζι. Δεν περιλαμβάνονται η υγροποίηση υπό μορφή δροσιάς, ομίχλης, πάχνης ή πάγου, ακόμα κι αν αυτά παράγουν ενδείξεις σε ένα βροχόμετρο έως της τάξης του 0,1 mm. Ο συνολικός υετός είναι το άθροισμα όλου του συλλεγέντος υγρού (συμπεριλαμβανομένου του νερού που παράγεται από τον λιωμένο στερεό υετό), το οποίο εκφράζεται ως το βάθος που θα κάλυπτε σε μια επίπεδη επιφάνεια, εφόσον θεωρήσουμε ότι δεν υπάρχουν απώλειες λόγω εξάτμισης, απορροής ή διείδυσης στο έδαφος.

Ο ρυθμός του υετού είναι η ροή της μάζας του ύδατος σε υγρή ή στερεή μορφή κατά μήκος ενός οριζόντιου επιπέδου ανά μονάδα χρόνου ( $\text{kg m}^{-2} \text{s}^{-1}$ ). Η πυκνότητα του ύδατος είναι συνάρτηση της θερμοκρασίας, η οποία, όμως, μπορεί να μη ληφθεί υπόψη στη συγκεκριμένη εφαρμογή. Έτσι, ο ρυθμός του υετού μπορεί να εκφραστεί σε χιλιοστά ανά ώρα ( $\text{mm h}^{-1}$ ) ή χιλιοστά ανά ημέρα ( $\text{mm day}^{-1}$ ). Ο ρυθμός του υετού είναι το βάθος στο οποίο θα κάλυπτε μία επίπεδη οριζόντια επιφάνεια ανά μονάδα χρόνου, αν δεν υπήρχε καμία απώλεια νερού λόγω απορροής, εξάτμισης ή διείδυσης. Ο ρυθμός του υετού είναι η ποσότητα που χρησιμοποιείται σε όλες τις εφαρμογές, ωστόσο, σε πολλές περιπτώσεις, η μονάδα χρόνου δεν προσδιορίζεται, καθώς θεωρείται αυτονόητη για την εφαρμογή (συνήθως ανά ημέρα ή συσσωρευτικά για ολόκληρο το έτος). Έτσι, η μέτρηση του υετού γίνεται σε χιλιοστά (mm) ή  $\text{kg m}^{-2}$  (μάζα/επιφάνεια) για υετό σε υγρή μορφή. Παλαιότερα χρησιμοποιούνταν ως μονάδα μέτρησης και οι ίντσες (0,01 ίντσες ισοδυναμούν με 0,25 χιλιοστά).

Ο υετός αποτελεί μια από τις σπουδαιότερες μετεωρολογικές μεταβλητές, καθώς είναι μια πολύ σημαντική συνιστώσα του υδρολογικού κύκλου του πλανήτη. Σε ετήσια βάση πέφτουν περίπου 505.000 κυβικά χιλιόμετρα νερού, το μεγαλύτερο μέρος των οποίων πάνω από τους ωκεανούς. Αυτό αντιστοιχεί σε περίπου 1.000 χιλιοστά (1 μέτρο) υετού.

#### 6.1.2 Ιστορικά στοιχεία

Οι πρώτες γνωστές καταγραφές βροχοπτώσεων έγιναν από τους αρχαίους Έλληνες, κατά τον 6<sup>ο</sup> αι. π.Χ. Ωστόσο, η πρώτη γραπτή αναφορά μέτρησης της βροχόπτωσης έγινε

από τον Kautilya στην Ινδία στο βιβλίο του *Arthashastra* τον 4<sup>ο</sup> αιώνα π.Χ. Η επόμενη αναφορά έρχεται από τον 1<sup>ο</sup> αιώνα μ.Χ. στο *The Mishnah*, το οποίο καταγράφει 400 χρόνια εβραϊκού πολιτισμού και θρησκευτικών δραστηριοτήτων στην Παλαιστίνη (Danby, 1933). Ωστόσο, αυτές οι μετρήσεις υπήρξαν μεμονωμένα γεγονότα και δεν συνεχίστηκαν για μεγάλο διάστημα. Δεν είναι γνωστές άλλες ποσοτικές υδρολογικές ή μετεωρολογικές μετρήσεις μέσα στην επόμενη χιλιετία.

Το πρώτο βροχόμετρο (rain gauge) που λειτούργησε στην Ευρώπη κατασκευάστηκε από τον Ιταλό Benedetto Castelli το 1639, ένα Βενεδικτίνο μοναχό και μαθητή του Γαλιλαίου (Strangeways, 2003). Ο Castelli μέτρησε τη βροχή μόνο μία φορά, χρησιμοποιώντας διαβαθμισμένους γυάλινους κυλίνδρους με διάμετρο γύρω στα 12 cm και βάθος 23 cm. Δεν φαίνεται, όμως, να συνεχίστηκαν οι μετρήσεις σε συστηματική βάση. Η πρώτη συνεχής καταγραφή βροχόπτωσης έγινε από τον Richard Townley στο Lancashire από το 1677 έως το 1703.

Το ενδιαφέρον για τη μέτρηση των βροχοπτώσεων αυξήθηκε ραγδαία, παγκοσμίως, κατά τον 18<sup>ο</sup> αιώνα. Τα περισσότερα βροχόμετρα τοποθετούνταν σε οροφές μέχρι το 1770. Η έκθεση σε οροφές δημιουργεί προβλήματα, όπως υποπτεύθηκε πρώτος ο William Heberden (1769). Προκειμένου να το διερευνήσει, λειτούργησε δύο πανομοιότυπα βροχόμετρα, ένα στην καμινάδα του σπιτιού του και ένα στον κήπο, ενώ επίσης τοποθέτησε ένα τρίτο βροχόμετρο σε έναν πύργο ύψους 45 μέτρων. Οι ενδείξεις λαμβάνονταν κάθε μήνα για έναν χρόνο και κατέδειξαν ότι το βροχόμετρο στην καμινάδα κατέγραφε μόνο το 80% σε σχέση με αυτό του κήπου, ενώ το βροχόμετρο στον πύργο κατέγραφε λίγο παραπάνω από το 50%. Δεν μπορούσε τότε να εξηγήσει γιατί συνέβαινε αυτό, αλλά σήμερα γνωρίζουμε ότι η μείωση της συλλογής του βροχόμετρου με το ύψος οφείλεται στην επίδραση του ανέμου.

Περίπου την ίδια περίοδο, ο George Symons, ένας νεαρός βοηθός στο πρώτο Μετεωρολογικό Γραφείο του Ηνωμένου Βασιλείου επέδειξε μεγάλο ενδιαφέρον για τις βροχοπτώσεις και τη μέτρησή τους. Συνέλεξε στοιχεία βροχοπτώσεων από πολλές πηγές και πειραματίστηκε με διάφορα βροχόμετρα που χρησιμοποιούνταν εκείνη την εποχή. Έως το θάνατό του το 1900, λάμβανε στοιχεία από 3.500 σημεία μέτρησης. Χωρίς αμφιβολία, ο Symons υπήρξε μία από τις πιο σημαντικές προσωπικότητες στην ιστορία των μετρήσεων και της συλλογής μετρήσεων υετού.

### 6.1.3 Μετεωρολογικές και υδρολογικές απαιτήσεις

Στον πίνακα 6.1 εμφανίζονται οι απαιτήσεις των μετρήσεων υετού, όπως καθορίζονται από τον Παγκόσμιο Μετεωρολογικό Οργανισμό (WMO, 2008).

Οι συνηθισμένοι χρόνοι παρατήρησης είναι ανά ώρα, ανά τρεις ώρες ή ημερησίως, για συνοπτικούς, κλιματικούς και υδρολογικούς σκοπούς. Σε κάποιες ειδικές εφαρμογές, απαιτείται μία καλύτερη ανάλυση χρόνου, προκειμένου για τη μέτρηση πολύ υψηλών ρυθμών βροχοπτώσεων σε πολύ μικρές περιόδους. Για ορισμένες εφαρμογές, χρησιμοποιούνται βροχόμετρα τα οποία αποθηκεύουν τον υετό έτσι, ώστε η παρατήρηση να μπορεί να γίνει ανά διαστήματα μερικών εβδομάδων, μηνών ή ακόμα και ενός χρόνου (ιδιαίτερα σε βουνά, ερήμους ή γενικά σε τόπους όπου η πρόσβαση είναι δύσκολη).

Οι καθημερινές ποσότητες του υετού πρέπει να διαβάζονται στα πλησιέστερα 0,2 mm και, αν είναι εφικτό, στο πλησιέστερο 0,1 mm. Οι εβδομαδιαίες ή μηνιαίες ποσότητες πρέπει να διαβάζονται στο κοντινότερο 1 mm (τουλάχιστον). Οι καθημερινές μετρήσεις του υετού πρέπει να λαμβάνονται σε σταθερούς χρόνους κοινούς για όλο το δίκτυο ή τα δίκτυα ενδιαφέροντος. Μέτρηση ποσότητας υετού μικρότερης από 0,1 mm (0,2 mm στις

Ηνωμένες Πολιτείες) αναφέρεται γενικά ως ίχνος (αν π.χ. μια ημέρα εμφανίζεται βροχόπτωση μικρότερη από 0,1 mm τότε αναφερόμαστε σε ίχνος βροχής).

Ειδικότερα, οι μετρήσεις χιονοπτώσεων λαμβάνονται σε μονάδες εκατοστόμετρων στα πλησιέστερα 0,2 cm. Ανάγνωση μικρότερη από 0,2 cm καλείται, γενικά, ίχνος. Το βάθος του χιονιού στο έδαφος μετριέται συνήθως καθημερινά σε ακέραια εκατοστόμετρα.

Μεταβλητή ΥΕΤΟΣ	Εύρος	Ανάλυση	Τρόπος παρατή- ρησης	Απαιτούμενη αβεβαιότητα μέτρησης	Σταθερά χρόνου του αισθητήρα	Χρόνος μέσης τιμής	Εφικτή αβεβαιότητα μέτρησης	Σχόλια
Ποσότητα (ημερήσια)	0-500 mm	0,1 mm	Συνολική	0,1 mm για τιμές $\leq 5\mu\text{m}$ , 2% για τιμές > 5 $\mu\text{m}$	-	-	Το μεγαλύτερο από 5% και 0,1 mm	Η ποσότητα αναφέ- ρεται σε ημερήσιες τιμές.  Η αβεβαιότητα της μέτρησης εξαρτάται από τις αεροδυναμι- κές απώλειες και την εξάτμιση, σε περί- πτωση θερμαινόμε- νου κάδου.
Ένταση υετού	0,02- 2.000 $\text{mmh}^{-1}$	0,1 $\text{mmh}^{-1}$	Στιγμιαία	(ίχνη): 0,02- 0,2 $\text{mmh}^{-1}$  0,1 $\text{mmh}^{-1}$ για 0,2-2 $\text{mmh}^{-1}$  5% για >20,02-2.000 $\text{mmh}^{-1}$	<30 s	1 min	Σε εργαστηρι- ακές συνθή- κες: 5% για τιμές μεγαλύ- τερες από 2 $\text{mmh}^{-1}$ και 2% για μεγαλύτε- ρες από 10 $\text{mmh}^{-1}$  Σε συνθήκες πεδίου: 5 $\text{mmh}^{-1}$ και 5% για τιμές με- γαλύτερες από 100 $\text{mmh}^{-1}$	Οι τιμές αβεβαιότη- τας αφορούν μόνο τη βροχή. Η αβε- βαιότητα επηρεάζε- ται σημαντικά από τον άνεμο. Οι αι- σθητήρες μπορεί να έχουν μη γραμμική συμπεριφορά. Για τιμές <0,2 $\text{mmh}^{-1}$ μόνο ύπαρξη υετού (ναί/όχι).
Διάρκεια υετού (η- μερήσια)	0-24 h	60 s	Συνολική	-	60 s	-		Τιμή κατοφλίου 0,2 $\text{mmh}^{-1}$

**Πίνακας 6.1** Απαιτήσεις για την επιχειρησιακή μέτρηση του υετού (WMO, 2008)

## 6.2 Μέθοδοι μέτρησης

Τα υετόμετρα (ή τα βροχόμετρα, εφόσον μετριέται μόνο υετός σε υγρή μορφή) είναι η συνηθέστερη μέθοδος μέτρησης του υετού. Τα υετόμετρα είναι διατάξεις που συλλέγουν τη βροχή σε ένα χωνί και κατόπιν μετρούν το νερό με κάποιον τρόπο. Γενικά, χρησιμοποιείται ένα ανοιχτό δοχείο με κάθετες πλευρές, συνήθως με τη μορφή ενός κανονικού κυλίνδρου, με ένα χωνί όταν ο κύριος σκοπός είναι η μέτρηση της βροχής. Οι μετρήσεις δεν είναι, συνήθως, αυστηρά συγκρίσιμες, καθώς σε διαφορετικές χώρες χρησιμοποιούνται διάφορα μεγέθη και σχήματα, αλλά και ύψη τοποθέτησης των υετόμετρων. Η μέτρηση αφορά, συνήθως, τον όγκο ή το βάρος του νερού που συλλέγεται σε υγρή ή στερεή μορφή. Για τη μέτρηση του στερεού υετού, η οπή είναι στο έδαφος, ενώ γύρω της τοποθετείται μια τεχνητή ασπίδα. Το ύψος στο οποίο τοποθετούνται τα βροχόμετρα είναι συνήθως μεταξύ 0,5 και 1,5 m.

Τα βροχόμετρα χωρίζονται γενικά στις παρακάτω κατηγορίες:

- Χειροκίνητα (αναλογικά) βροχόμετρα. Πρόκειται για την κλασική μέθοδο μέτρησης του υετού. Υπολογίζεται ότι υπάρχουν σε όλο τον κόσμο περίπου 50 διαφορετικά είδη χειροκίνητων βροχόμετρων. Ο συνολικός αριθμός των χειροκίνητων βροχομέτρων ανάγνωσης σε χρήση ανά τον κόσμο υπερβαίνει τις 150.000.
- Μηχανικά βροχόμετρα καταγραφής γραφημάτων. Τα αυτογραφικά βροχόμετρα χρησιμοποιούνται, κυρίως, για να παρέχουν πληροφορίες για τον χρόνο έναρξης και λήξης, καθώς και τον ρυθμό του υετού. Είναι συνήθης η λειτουργία ενός χειροκίνητου βροχόμετρου που βρίσκεται πλησίον και το οποίο δρα ως αναφορά και για να δίνει ακριβή ποσότητα υετού. Τα μηχανικά βροχόμετρα καταγραφής συνήθως κινούν ένα στυλογράφο κατά μήκος ενός χάρτινου γραφήματος μέσω της κίνησης ενός φλοτέρ.
- Ηλεκτρικά βροχόμετρα. Σε αυτή την κατηγορία θα πρέπει να αναφερθούν τα βροχόμετρα ανατρεπόμενου κάδου (Tipping Bucket Rain Gauge), τα οποία είναι ο πιο κοινός τύπος αυτόματου βροχόμετρου που χρησιμοποιείται σήμερα.
- Radar βροχής. Πρόκειται για μία ειδική τεχνική στο πεδίο της τηλεπισκόπησης. Ένα από τα σημαντικά πλεονεκτήματα του radar είναι ότι δίνει μια εκτίμηση του υετού σε μια ολόκληρη περιοχή αντί για μέτρηση σε ένα σημείο. Η περιοχή που καλύπτεται είναι αρκετά μεγάλη, τυπικά γύρω στα 15.000 km<sup>2</sup> για κάθε σταθμό. Έχει επίσης το πλεονέκτημα ότι δίνει στοιχεία σε πραγματικό χρόνο.
- Δορυφορικές μετρήσεις υετού. Σήμερα βρίσκονται σε ανάπτυξη τεχνικές για τον προσδιορισμό του υετού από μετρήσεις δορυφόρων. Με τον τρόπο αυτό είναι δυνατή η κάλυψη ολόκληρης της Γης.

## 6.3 Τοποθέτηση και έκθεση

Το θέμα της αντιπροσωπευτικότητας αφορά το σύνολο των μετεωρολογικών μετρήσεων, αλλά το πρόβλημα είναι ιδιαίτερα οξύ στην περίπτωση της μέτρησης του υετού. Οι μετρήσεις υετού είναι ευαίσθητες στις ιδιαίτερες συνθήκες του σημείου μέτρησης (έκθεση, τοπογραφία, άνεμος κτλ.) και είναι ιδιαίτερα σημαντικό να τηρούνται μεταδεδομένα που περιγράφουν τις συνθήκες της μέτρησης. Σε περίπτωση που σχεδιάζεται ένα δίκτυο βροχόμετρων, είναι πολύ σημαντικό να τηρούνται οι ίδιοι κανόνες για όλα τα βροχόμετρα, έτσι ώστε να εξασφαλίζεται η συγκρισιμότητα των μετρήσεων.

Η επιλογή των σημείων μέτρησης, καθώς επίσης και η εκτίμηση της αβεβαιότητας της μέτρησης είναι, επομένως, βαρύνουσας σημασίας. Η τοποθεσία των σταθμών μέτρησης του υετού μέσα στην περιοχή ενδιαφέροντος είναι σημαντική, επειδή ο αριθμός και οι τοποθεσίες των δικτύων βροχόμετρων καθορίζουν το πόσο καλά οι μετρήσεις θα αντιπροσωπεύουν την πραγματική ποσότητα του υετού που πέφτει στην περιοχή. Η τοπική αντιπροσωπευτικότητα συζητείται σε έκταση στο WMO (1992).

Ένα βροχόμετρο δεν θα πρέπει να τοποθετηθεί πλησίον ενός μεγάλου εμποδίου. Ο κανόνας λέει ότι η απόσταση από το εμπόδιο θα πρέπει να είναι μεγαλύτερη από το διπλάσιο του ύψους του (πιο αυστηροί υπολογισμοί απαιτούν η απόσταση να είναι τουλάχιστον τέσσερις φορές το ύψος του εμποδίου). Αυτό αναφέρεται όχι μόνο σε δένδρα και κτίρια, αλλά επίσης και σε άλλες κατασκευές για την πραγματοποίηση μετρήσεων (π.χ. μετεωρολογικούς κλωβούς). Αν και είναι ευκαταίω να υπάρχει κάποια κάλυψη ώστε να μειώνεται η έκθεση του βροχόμετρου στον άνεμο, θα πρέπει πάντα να τηρούνται οι αποστάσεις που προαναφέρθηκαν.

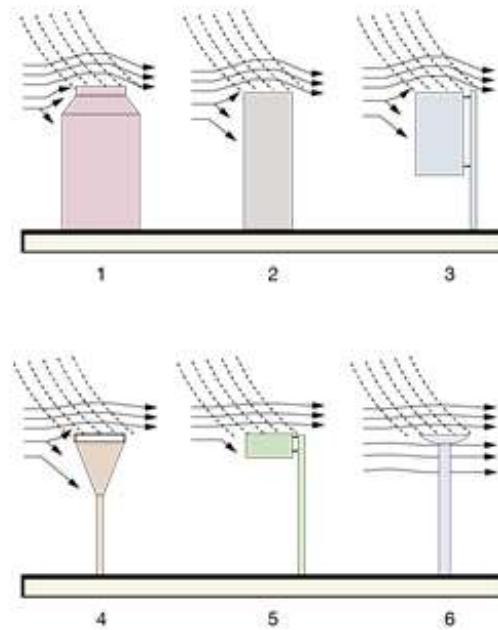
Σε μια δασώδη περιοχή, μία λύση είναι να τοποθετηθεί το βροχόμετρο σε ένα ξέφωτο, με την προϋπόθεση ότι το ξέφωτο θα είναι αρκετά μεγάλο, προκειμένου να πληρούνται τα παραπάνω κριτήρια της απόστασης. Αν αυτό δεν είναι εφικτό, τα βροχόμετρα κάποιες φορές εγκαθίστανται σε έναν ιστό ακριβώς πάνω από το δασώδες φύλλωμα. Στην περίπτωση, όμως, που θέλουμε να μετρήσουμε τον υετό που φτάνει στο έδαφος, απαιτείται διαφορετική προσέγγιση. Κατά προτίμηση, ωστόσο, οι επιδράσεις του ανέμου και της θέσης του ανέμου μπορούν να μειωθούν μέσω της χρήσης ενός επιφανειακού βροχόμετρου για υγρό υετό ή κάνοντας τη ροή του ανέμου οριζόντια πάνω από την οπή του βροχόμετρου, μέσω των ακόλουθων τεχνικών (οι οποίες απαριθμούνται κατά σειρά φθίνουσας αποτελεσματικότητας):

- (α) Σε περιοχές με ομοιογενή πυκνότητα βλάστησης: το ύψος μιας τέτοιας βλάστησης θα πρέπει να διατηρείται στο ίδιο επίπεδο με την οπή του βροχόμετρου μέσω τακτικού κλαδέματος.
- (β) Σε άλλες περιοχές, μέσω προσομοίωσης του φαινομένου του (α), με τη χρήση κατάλληλων φραχτών.
- (γ) Μέσω της χρήσης ασπίδων κατά του ανέμου γύρω από το βροχόμετρο.

Η επιφάνεια γύρω από το βροχόμετρο μπορεί να καλύπτεται με χαμηλό γρασίδι, χαλίκι ή βότσαλο.

#### 6.4 Επίδραση του ανέμου

Σε περιπτώσεις που η ροή του αέρα είναι τυρβώδης, μικρές σταγόνες βροχής και χιονιού μπορεί να εκτραπούν από το βροχόμετρο και, κατά συνέπεια, μπορεί να υπάρξει μείωση στη συλλογή του βροχόμετρου. Πειραματικές μετρήσεις δείχνουν ότι η μείωση μπορεί να είναι ~20% για ανέμους στο διάστημα  $5 - 10 \text{ ms}^{-1}$  και πάνω από 80% για ανέμους που υπερβαίνουν τα  $10 \text{ ms}^{-1}$ .



**Σχήμα 6.1** Διαφορετικά σχήματα των τυποποιημένων μετρητών νετού. Οι συμπαγείς γραμμές δείχνουν τις ρευματογραμμές και οι διακεκομμένες γραμμές δείχνουν τις τροχιές των σωματιδίων του νετού. Ο πρώτος μετρητής δείχνει τη μεγαλύτερη παραμόρφωση του πεδίου ανέμων πάνω από το στόμιο του μετρητή, και ο τελευταίος μετρητής τη μικρότερη παραμόρφωση. Κατά συνέπεια, το σφάλμα του ανέμου για τον πρώτο μετρητή είναι μεγαλύτερο από ό,τι για τον τελευταίο μετρητή (WMO, 2008).

## 6.5 Άλλοι παράγοντες που επιδρούν στις μετρήσεις

*Κατασκευαστικά υλικά και απώλεια από εξατμίσεις:* Παραδοσιακά, έχει χρησιμοποιηθεί χαλκός για την κατασκευή χωνιών για τα βροχόμετρα, ωστόσο σήμερα χρησιμοποιούνται και υλικά όπως ανοδιωμένο αλουμίνιο, ανοξειδωτο ατσάλι, επικασσιτερωμένος σίδηρος, υαλόνημα, ορείχαλκος ή πλαστικό. Αναφορικά με τα υλικά, αυτό που έχει σημασία είναι το πόσο καλά επιτρέπουν το νερό που πέφτει μέσα να κυλήσει και να συλλεχθεί ή να μετρηθεί.

Το νερό πρώτα υγραίνει τις επιφάνειες της χοάνης και τους σωλήνες που οδηγούν στον σωλήνα ή στον ανατρεπόμενο κάδο και μόνο έπειτα αρχίζει να ρέει. Όταν η βροχή σταματά, το νερό που έχει απομείνει στις επιφάνειες δεν στάζει στο σωλήνα ή στον κάδο, αλλά εξατμίζεται. Στην περίπτωση ενός τυπικού χειροκίνητου βροχόμετρου, η ποσότητα που χάνεται είναι περίπου 0,2 mm για κάθε συμβάν βροχής. Απώλεια μπορεί επίσης να υπάρξει και μέσα στον χώρο του βροχόμετρου, αν και μπορεί να διατηρηθεί σε χαμηλό επίπεδο αν ελαχιστοποιηθεί ο εξαερισμός και αν τοποθετηθεί κάτω από το έδαφος, προκειμένου να διατηρηθεί δροσερό.

Εάν η βροχή πέφτει ως διακεκομμένο ελαφρύ ψιχάλισμα, η απώλεια λόγω εξάτμισης μπορεί να οδηγήσει σε ένα σημαντικό ποσοστό σε σύγκριση με αυτό που θα συλλεγόταν συνολικά. Ωστόσο, σε περίπτωση δυνατής βροχής, το ποσοστό θα είναι πολύ χαμηλότερο.

*Βάθος του συλλέκτη.* Ένας από τους σημαντικούς παράγοντες είναι το βάθος του συλλέκτη. Το τυπικό βροχόμετρο έχει κάθετες πλευρές βάθους 11.4 εκ. Ο σωστός συνδυασμός διαμέτρου και βάθους εμποδίζει σχεδόν κάθε πιτσίλισμα των μεγάλων σταγόνων ή

την αναπήδηση του χαλαζιού. Πολλά βροχόμετρα έχουν τέτοιο σχήμα, αλλά κάποια έχουν λιγότερο βαθιές πλευρές πάνω από τη χοάνη, κάτι που θα μπορούσε να οδηγήσει στην απώλεια του συλλεγόμενου υετού. Το πρόβλημα με τις βαθιές πλευρές ή τουλάχιστον με το ψηλό κυλινδρικό σχήμα του βροχόμετρου που προκύπτει ως συνέπεια, είναι ότι αυτό αυξάνει τα λάθη που προκαλούνται από τον αέρα (βλέπε παραπάνω).

*Αλφάδιασμα.* Δεν είναι ασυνήθιστο να δει κανείς ένα βροχόμετρο να κλίνει σε γωνία. Μπορεί να μην είναι σωστά εγκατεστημένο από την αρχή ή μπορεί το έδαφος να έχει υποστεί καθίζηση μετά την εγκατάσταση. Όποια κι αν είναι η αιτία, το βροχόμετρο θα δώσει λάθος ενδείξεις. Σε συνθήκες άπνοιας, ένα βροχόμετρο που γέρνει θα συλλέξει λιγότερη βροχή, ενώ αν γέρνει προς την πλευρά του ανέμου θα συλλέξει περισσότερη και, αν γέρνει αντίθετα από τη διεύθυνση του ανέμου, λιγότερη από ό,τι θα έπρεπε. Για κάθε κλίση  $1^\circ$  προκύπτει λάθος περίπου 1%.

*Ακρίβεια των διαστάσεων του συλλέκτη.* Αν η διάμετρος του συλλέκτη δεν είναι η καθορισμένη, η επιφάνεια του θα είναι λάθος και θα συλλεχθεί λάθος ποσότητα βροχής. Για παράδειγμα, αν η διάμετρος θα έπρεπε να είναι 15,95 cm, αλλά παρεκκλίνει κατά 0,05 cm, θα υπάρξει σφάλμα κατά τη συλλογή της τάξης του 1,25%. Η παραμόρφωση του χείλους της χοάνης λόγω π.χ. χτυπήματος θα προκαλέσει επίσης σφάλματα.

## 6.6 Αναλογικά βροχόμετρα

Ο χειροκίνητος καθορισμός της ημερήσιας ποσότητας βροχόπτωσης σε ένα σημείο μπορεί να διατηρηθεί για μακρές περιόδους, μέσω της χρήσης ενός δοχείου συλλογής με δεδομένο άνοιγμα, το οποίο θα παρακολουθείται και θα αδειάζει τακτικά (Εικόνα 6.1).

Συνήθως χρησιμοποιείται ένα υετόμετρο, το οποίο αποτελείται από έναν συλλέκτη που τοποθετείται πάνω από μία χοάνη που οδηγεί σε ένα δοχείο, όπου το συγκεντρωμένο νερό και το λιωμένο χιόνι αποθηκεύονται μεταξύ των περιόδων παρατήρησης. Διαφορετικά σχήματα βροχόμετρων χρησιμοποιούνται ανά τον κόσμο, όπως φαίνεται στο σχήμα 6.1. Εκεί όπου ο υετός σε στερεή μορφή είναι συνήθης και σημαντικός (σε ποσότητα), χρησιμοποιούνται διάφορες ειδικές τροποποιήσεις, προκειμένου να βελτιώσουν την ακρίβεια των μετρήσεων.



**Εικόνα 6.1** Τυπικό βροχόμετρο

Τέτοιου είδους τροποποιήσεις περιλαμβάνουν την απομάκρυνση της χοάνης του βροχόμετρου κατά την έναρξη της περιόδου χιονοπτώσεων ή την πρόβλεψη για έναν ειδικό φράκτη χιονιού, προκειμένου να προστατέψει το συλλεχθέν προϊόν από το να σκορπίζεται από τον άνεμο. Ασπίδες για τον αέρα γύρω από το βροχόμετρο μειώνουν το σφάλμα που προκαλείται από την παραμόρφωση του ανέμου πάνω από το βροχόμετρο και από το χιόνι που στοιβάζεται στο βροχόμετρο.

Οι ενδείξεις από το βροχόμετρο συνήθως λαμβάνονται ημερησίως με τη χρήση ενός διαβαθμισμένου γυάλινου κυλίνδρου, μέσα στον οποίο χύνεται η συλλεχθείσα βροχή. Οι κύλινδροι είναι συνήθως επίπεδοι ή στενεμένοι, με τη διάμετρο των δευτέρων να μειώνεται για ύψος βροχής μικρότερο από 1 mm, έτσι ώστε να παρουσιάζουν μεγαλύτερη ακρίβεια όταν συλλέγονται μικρές ποσότητες νερού. Είναι διαβαθμισμένοι σε βαθμίδες του 0,1 mm, συνήθως με μία πρόσθετη βαθμίδα στα 0,05 mm, με αρίθμηση στα 0,1mm, τα 0,5 mm και κάθε 1 mm στο διάστημα 1-10 mm.

Στα αναλογικά βροχόμετρα ανήκει το δεκαπλασιαστικό βροχόμετρο. Το δεκαπλασιαστικό βροχόμετρο είναι ένα από τα βασικά όργανα μέτρησης της βροχής, το οποίο αποτελείται από ένα μεταλλικό κυλινδρικό δοχείο που καταλήγει προς τα πάνω σε κυλινδρικό δακτύλιο και προς τα κάτω σε δοχείο που συγκοινωνεί με μεταλλικό σωλήνα, μήκους περίπου ενός μέτρου. Το εμβαδόν της χοάνης συλλογής, η οποία βρίσκεται στο επάνω μέρος του οργάνου, είναι ακριβώς δεκαπλάσιο του αθροίσματος των εμβαδών των τομών του μεταλλικού κυλίνδρου και του γυάλινου σωλήνα που είναι τοποθετημένοι στη βάση της χοάνης κατακόρυφα. Πίσω από το γυάλινο σωλήνα είναι τοποθετημένη μια βαθμονομημένη κλίμακα σε χιλιοστά.

Για τη λήψη της ένδειξης της ποσότητας του νερού στον κύλινδρο, η διαδικασία είναι να σημειώνεται η πλησιέστερη ένδειξη στον πάτο του μηνίσκου του νερού στο πλησιέστερο 0,1 mm. Ζυγίζοντας το μπουκάλι και το νερό και αφαιρώντας το βάρος του στεγνού μπουκαλιού παρέχεται μια ακριβέστερη μέτρηση, εφόσον απαιτείται.

Όταν δεν μπορούν να ληφθούν ενδείξεις από τα βροχόμετρα σε ημερήσια βάση, ένα μεγαλύτερο δοχείο είναι απαραίτητο έτσι, ώστε οι εβδομαδιαίες ή μηνιαίες ποσότητες βροχής να μπορούν να αποθηκευτούν.

## 6.7 Καταγραφικά βροχόμετρα

### α) Μηχανικός βροχογράφος με πλωτήρα

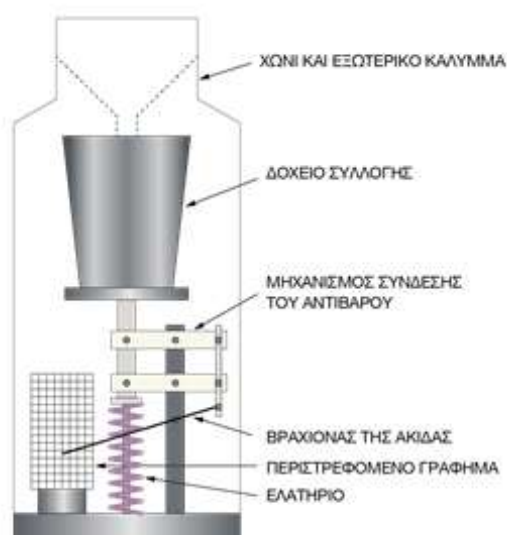
Ο βροχογράφος είναι μια μεταλλική κυλινδρική κατασκευή, όπως προαναφέρθηκε για το βροχόμετρο, η οποία συλλέγει το όμβριο νερό, με επιπρόσθετο εσωτερικό ωρολογιακό τύμπανο (κύλινδρο), όπου επί της χάρτινης ταινίας την οποία φέρει, καταγράφεται με ακίδα συνδεδεμένη με πλωτήρα, το ύψος της βροχής (Brock and Richardson, 2001, DeFelice, 1998. Από το γράφημα μπορεί να προσδιοριστεί και η διάρκεια του υετού. Με τον τρόπο αυτό μπορεί να υπολογιστεί η ένταση της βροχόπτωσης. Όταν το ύψος της βροχής φθάσει τα 10 mm, τότε ο βροχογράφος αδειάζει αυτόματα και εφόσον η βροχή συνεχίζεται, επαναλαμβάνεται η προηγούμενη διαδικασία και η νεότερη ένδειξη προστίθεται στην προηγούμενη.

Τα καταγραφικά βροχόμετρα χρησιμοποιούνται, κυρίως, για να παρέχουν πληροφορίες για τον χρόνο έναρξης και λήξης της βροχής, καθώς και τον ρυθμό της βροχόπτωσης. Είναι σύνηθες να υπάρχει σε κοντινή απόσταση ένα χειροκίνητο βροχόμετρο, το οποίο δρα ως αναφορά.



### β) Σταθμικό βροχόμετρο

Τα σταθμικά βροχόμετρα λειτουργούν με την καταγραφή του συνολικού βάρους του υετού, όπως συσσωρεύεται σε ένα δοχείο, είτε αναρτώντας το δοχείο σε ένα ελατήριο είτε στο βραχίονα ενός αντίβαρου (εικόνα 6.2). Και στους δύο τύπους, το βάρος του νερού αναγκάζει το δοχείο να γείρει προς τα κάτω, με την κάθετη κίνηση να μεγεθύνεται μέσω συνδέσμων από μοχλούς για να κινηθεί η ακίδα.



**Εικόνα 6.2** Μία εναλλακτική λύση αντί των καταγραφών με πλωτήρα είναι το σταθμικό βροχόμετρο, το οποίο απεικονίζεται εδώ σχηματικά. Σε αυτό τον τύπο μπορεί να απομακρυνθεί το δοχείο, ώστε να συλλεχθεί το χιόνι.

### γ) Βροχόμετρο ανατρεπόμενου κάδου

Το βροχόμετρο ανατρεπόμενου κάδου (Εικόνα 6.3) αποτελείται από ένα χωνί, το οποίο συλλέγει το νερό της βροχής και το οδηγεί σε έναν από τους δύο κάδους που βρίσκονται στα δύο άκρα ενός βραχίονα που ισορροπεί (Εικόνα 6.4). Οι άκρες του βραχίονα ισορροπούν και όταν γεμίσει ο πρώτος κάδος αλλάζει θέση, επιτρέποντας το άδειασμα αυτού του κάδου και δίνοντας τη θέση του κάτω από τη χοάνη στον δεύτερο κάδο. Η διαδικασία ανατροπής επαναλαμβάνεται επ' αόριστον, εφόσον η βροχή συνεχίζει να πέφτει, με κάθε άκρο αντίστοιχα να μετρά μια συγκεκριμένη ποσότητα της βροχής. Σε κάθε άκρη του βραχίονα υπάρχει μια μαγνητική επαφή και κάθε φορά που ανατρέπεται ένας κάδος δίνει έναν παλμό. Σε παλαιού τύπου συσκευή καταγραφής, αντί του ηλεκτρικού παλμού, η καταγραφή γινόταν από μία ακίδα τοποθετημένη σε έναν βραχίονα.

Τα σύγχρονα ανατρεπόμενα βροχόμετρα αποτελούνται από έναν πλαστικό συλλέκτη, ο οποίος ισορροπεί πάνω σε έναν άξονα. Όταν γέρνει, ενεργοποιεί έναν διακόπτη και έπειτα καταγράφεται ηλεκτρονικά ή μεταδίδεται σε έναν απομακρυσμένο σταθμό συλλογής.

Όταν ο υετός είναι σε στερεή μορφή, και προκειμένου να μετρήσει το ισοδύναμο του στερεού υετού σε νερό, ο ανατρεπόμενος κάδος μπορεί να θερμανθεί, ώστε να λιώσει τον πάγο και το χιόνι που έχει κρατηθεί στη χοάνη του. Χωρίς ένα μηχανισμό θέρμανσης, η χοάνη συχνά φράζει κατά τη διάρκεια ενός συμβάντος παγωμένου υετού και, ως εκ τούτου, δεν μπορεί να μετρηθεί ο υετός. Πολλές μονάδες χρησιμοποιούν θερμαινόμενους κάδους ανατροπής για να μετρήσουν τον υετό.



**Εικόνα 6.3** Παράδειγμα βροχόμετρου ανατρεπόμενου κάδου

Τα πλεονεκτήματα των βροχομέτρων ανατρεπόμενου κάδου είναι η απλότητα τους (επομένως, λίγα είναι αυτά που μπορεί να πάνε στραβά), δεν καταναλώνουν ενέργεια, ενώ μπορούν να χρησιμοποιηθούν με μια ποικιλία καταγραφέων (Strangeways, 2003). Επιπλέον, ο τύπος της βροχής (ελαφριά, μέτρια ή ισχυρή) μπορεί εύκολα να εκτιμηθεί. Ο τύπος της βροχής προσδιορίζεται βάσει της συνολικής ποσότητας βροχής που έχει πέσει σε μία συγκεκριμένη περίοδο (συνήθως 1 ώρα). Ωστόσο, το βροχόμετρο ανατρεπόμενου κάδου δεν είναι τόσο ακριβές όσο άλλες διατάξεις, επειδή η βροχή μπορεί να σταματήσει προτού ο μοχλός ανατραπεί. Σε αυτή την περίπτωση, το βροχόμετρο δεν δίνει ένδειξη, αλλά, όταν ξεκινήσει η επόμενη περίοδος της βροχής, μπορεί να χρειαστούν λίγες σταγόνες για να γίνει η ανατροπή. Κάτι τέτοιο θα έδινε την ένδειξη ότι έχει πέσει μία συγκεκριμένη ποσότητα, όταν στην πραγματικότητα έχει πέσει μόνο ένα μικρό τμήμα αυτής της ποσότητας.



**Εικόνα 6.4** Ζεύγος ανατρεπόμενων κάδων

Οι ανατρεπόμενοι κάδοι τείνουν, επίσης, να υποεκτιμούν την ποσότητα της βροχόπτωσης, ιδιαίτερα κατά τη διάρκεια της χιονόπτωσης και των ισχυρών βροχοπτώσεων. Το λάθος δεν είναι, συνήθως, μεγάλο και μπορούν να εφαρμοστούν διορθωτικοί αλγόριθμοι στα στοιχεία, κάτι που αποτελεί μία αποδεκτή μέθοδο διόρθωσης των στοιχείων για έντονη βροχόπτωση.

## 6.8 Μετρήσεις με ραντάρ

Οι σημειακές μετρήσεις του υετού αποτελούν τη σημαντικότερη πηγή δεδομένων για τον προσδιορισμό του υετού σε μια περιοχή. Ωστόσο, ακόμα και η καλύτερη σημειακή μέτρηση του υετού είναι αντιπροσωπευτική μόνο μίας περιορισμένης περιοχής, το μέγεθος της οποίας είναι συνάρτηση της διάρκειας της περιόδου συλλογής, της φυσιογραφικής ομοιογένειας της περιοχής, της τοπικής τοπογραφίας και της διαδικασίας παραγωγής υετού. Τα ραντάρ και, πιο πρόσφατα, οι δορυφόροι χρησιμοποιούνται για τον καθορισμό και την ποσοτικοποίηση της χωρικής κατανομής του υετού (Εικόνα 6.5) (Μπαλάτς, 1996). Ένα μόνο ραντάρ μπορεί να μετρήσει τη βροχόπτωση σε μία περιοχή τουλάχιστον 70.000 km<sup>2</sup> (υποθέτοντας μία εμβέλεια 150 km) και πιθανώς περισσότερα από 600.000 km<sup>2</sup> (υποθέτοντας μία εμβέλεια 450 km) (Εικόνα 6.6)..

Ο όρος ραντάρ, ο οποίος χρησιμοποιείται από τη δεκαετία του 1940, είναι ένα ακρωνύμιο από τον όρο RAdio Detection and Ranging (Ραδιο-ανίχνευση και αποστασιομέτρηση). Το ραντάρ καιρού (ή μετεωρολογικά ραντάρ) είναι μια διάταξη τηλεπισκόπησης για τον προσδιορισμό της θέσης, της κίνησης και της έντασης περιοχών υετού.

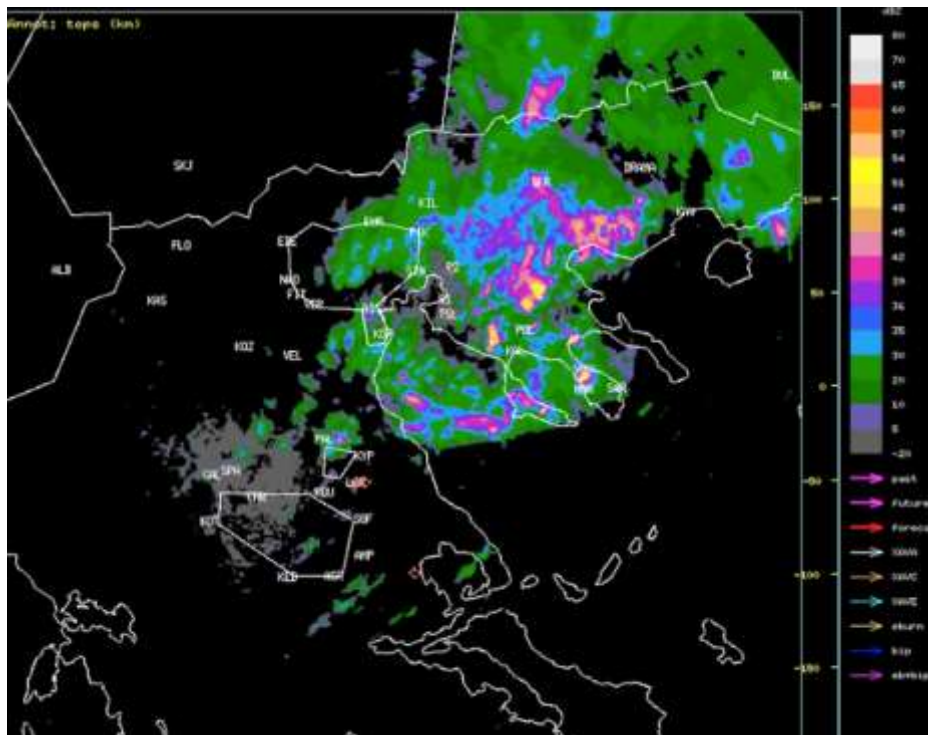
Τα μετεωρολογικά ραντάρ είναι σε θέση να ανιχνεύουν τον υετό και τις μεταβολές του δείκτη διάθλασης στην ατμόσφαιρα που μπορεί να έχουν προκληθεί από τοπικές μεταβολές στη θερμοκρασία ή την υγρασία. Επιστροφές στο σήμα των ραντάρ μπορεί επίσης να προκληθούν από τα αεροπλάνα, τη σκόνη, τα πουλιά ή τα έντομα. Τα μετεωρολογικά ραντάρ εκπέμπουν ηλεκτρομαγνητικούς παλμούς στο εύρος συχνοτήτων 3-10 GHz (μήκος κύματος 10-3 cm, αντίστοιχα).



**Εικόνα 6.5** Κεραία από ραντάρ καιρού.

Είναι σχεδιασμένα να ανιχνεύουν περιοχές με νετό, μετρώντας την έντασή τους, την κίνηση, καθώς και τον τύπο τους. Υψηλότερες συχνότητες χρησιμοποιούνται για να ανιχνεύσουν μικρότερους υδρομετεωρίτες, όπως τα νεφοσταγονίδια ή ακόμα και τα σταγονίδια ομίχλης. Παρά το γεγονός ότι αυτές οι διατάξεις έχουν σημαντικές εφαρμογές στην έρευνα στον τομέα της φυσικής των νεφών, αυτές οι συχνότητες γενικά δεν χρησιμοποιούνται στην επιχειρησιακή πρόγνωση του καιρού, λόγω της υπερβολικής εξασθένησης του σήματος του ραντάρ στην ατμόσφαιρα. Σε χαμηλότερες συχνότητες, τα ραντάρ είναι ικανά να ανιχνεύουν μεταβολές στους δείκτες διάθλασης της καθαρής ατμόσφαιρας και χρησιμοποιούνται για τη μέτρηση του ανέμου. Αν και μπορούν να ανιχνεύσουν τον νετό, η ικανότητα σάρωσης είναι περιορισμένη, λόγω του μεγέθους της κεραίας που απαιτείται προκειμένου να επιτευχθεί αποτελεσματική ευκρίνεια.

Στην Ελλάδα, το δίκτυο των μετεωρολογικών ραντάρ της ΕΜΥ περιλαμβάνει 8 ραντάρ τα οποία είναι εγκατεστημένα στον Υμηττό, την Αίγινα, την Αστυπάλαια, την Ανδραβίδα, τη Λάρισα, το Ακτιο, τη Θεσσαλονίκη και τη Χρυσούπολη.



**Εικόνα 6.6** Απεικόνιση του νετού, όπως καταγράφηκε από το ραντάρ βροχής στο Περιφερειακό Μετεωρολογικό Κέντρο Κεντρικής Μακεδονίας.

Η εξίσωση για τα ραντάρ καιρού δίνει το ποσό της λαμβανόμενης ισχύος,  $P_r$  (W), που επιστρέφει από στόχο καθορισμένης απόστασης από τη θέση του ραντάρ:

$$P_r = P_t \frac{\pi^3 g^2 L^2 c \tau \theta_1^2 |K_w|^2 Z}{2^{10} (\ln 2) r^2 \lambda^2} \quad (6-1)$$

Όπου  $P_t$  η εκπεμπόμενη ισχύς σε W (τυπική τιμή 750 kW),  $g$  = η απολαβή (gain) της κεραίας, ένας αδιάστατος αριθμός που μετρά τους βαθμούς συγκέντρωσης της ισχύος και δίνεται από το πηλίκο της ισχύος στη μονάδα επιφάνειας στο κέντρο της δέσμης

προς την ισότροπη ισχύ στο ίδιο σημείο. (π.χ. 35.000), αδιάστατη,  $L$  = ο συντελεστής εξασθένισης σήματος λόγω απορρόφησης κατά μήκος της διαδρομής,  $c$  = η ταχύτητα του φωτός,  $3 \times 10^8 \text{ ms}^{-1}$ ,  $\tau$  το εύρος του παλμού σε s (π.χ. 1,57 ή 4,5  $\mu\text{s}$ ),  $\theta_1$  = το εύρος της δέσμης της κεραίας σε ακτίνια (π.χ.  $1^\circ = 0,01745$  ακτίνια),  $r$  = η απόσταση του στόχου από το ραντάρ σε m (συνήθως μέχρι τα 450km),  $\lambda$  = το μήκος κύματος σε m (πολλά mm ως 10 cm),  $Z$  = συντελεστής ανακλαστικότητας και  $|KW|^2$  = παράμετρος που συνδέεται με το σύνθετο δείκτη διάθλασης του μέσου που προκαλεί τη διάθλαση (0,93 για σταγό-νες νερού και 0,19 για σωματίδια πάγου).

Η δέσμη του ραντάρ δεν διαδίδεται σε ευθεία γραμμή, καθώς η μεταβολή της ατμοσφαιρικής πυκνότητας με το ύψος προκαλεί μία κατακόρυφη βαθμίδα στον δείκτη διάθλασης, η οποία, με τη σειρά της, προκαλεί μια ελαφριά κάμψη της ακτίνας, ακόμα και σε κανονικές ατμοσφαιρικές συνθήκες. Η ελαφρά κάμψη της ακτίνας προς τα κάτω, η οποία προκαλείται σε κανονικές ατμοσφαιρικές συνθήκες, αντισταθμίζει εν μέρει την καμπυλότητα της Γης.

#### *Συμβατικά ραντάρ και Ραντάρ Doppler*

Από τη δεκαετία του 1970, όταν η ανάπτυξη εξελιγμένων ηλεκτρονικών υπολογιστών άρχισε να παρέχει τη δυνατότητα ταχείας επεξεργασίας αναλογικών δεδομένων για την παρουσίαση της κίνησης από και προς τα ραντάρ, άρχισε η ραγδαία ανάπτυξη των ραντάρ Doppler, τα οποία προσφέρουν μια ιδιαίτερα σημαντική νέα διάσταση στην παρατήρηση του καιρού με ραντάρ. Τα περισσότερα νέα συστήματα έχουν αυτή την δυνατότητα.

Τα ραντάρ Doppler έχουν την ικανότητα να προσδιορίσουν τη διαφορά φάσης μεταξύ του εκπεμπόμενου και του λαμβανόμενου παλμού. Η διαφορά αυτή είναι ένα μέτρο της μέσης ταχύτητας των σωματιδίων. Το εύρος του φάσματος Doppler είναι ένα μέτρο της χωρικής μεταβολής των ταχυτήτων και προσφέρει κάποιες ενδείξεις της διάτμησης του ανέμου και της ατμοσφαιρικής τύρβης.

Τα ραντάρ Doppler έχουν τη δυνατότητα μέτρησης της ταχύτητας των στόχων κατά μήκος του άξονα της ακτίνας του ραντάρ, μέσω υπολογισμού του ρυθμού μεταβολής της διαφοράς φάσης μεταξύ του εκπεμπόμενου και του λαμβανόμενου σήματος. Συγκεκριμένα, οι κινούμενοι μετεωρολογικοί στόχοι αλλάζουν τη συχνότητα του σήματος του ραντάρ κατά κάποια τιμή που εξαρτάται από την ταχύτητά τους. Η ταχύτητα που μπορεί να μετρηθεί είναι η ακτινική ταχύτητα, δηλαδή η συνιστώσα της ταχύτητας κατά τη διεύθυνση του άξονα σκόπευσης του ραντάρ.

#### *Ραντάρ Πολλαπλής Πολικότητας (Polarimetric Radars).*

Τα συμβατικά μετεωρολογικά ραντάρ εκπέμπουν και λαμβάνουν ηλεκτρομαγνητικά κύματα κατά μία μόνο πολικότητα ενώ τα ραντάρ πολλαπλής πολικότητας εκπέμπουν δύο διαφορετικά ηλεκτρομαγνητικά κύματα ταυτόχρονα, των οποίων η διεύθυνση ταλά-ντωσης είναι κάθετη. Η πολικότητα των ηλεκτρομαγνητικών κυμάτων επηρεάζεται αισθητά από το σχήμα, το μέγεθος, την κατεύθυνση και τη φύση των υδρομετεώρων. Συγκεκριμένα, όταν η διάμετρος των σταγόνων βροχής αυξάνεται, οι σταγόνες πλαταινούν και εξαιτίας του ελλειψοειδούς πλέον σχήματός τους παρουσιάζουν μεγαλύτερη ανακλαστικότητα σε οριζόντια πολικότητα από ό,τι σε κατακόρυφη. Έτσι, τα ραντάρ δι-πλής πολικότητας προσφέρουν εκτός από την ανακλαστικότητα των υδρομετεώρων και άλλες παραμέτρους, οι οποίες είναι ιδιαίτερα χρήσιμες για την αναγνώριση της φύσης (στερεά, υγρή), του μεγέθους και της συγκέντρωσης των υδρομετεώρων που βρίσκονται μέσα στη δέσμη ακτινοβολίας που εκπέμπει το ραντάρ. Επίσης, μπορεί να γίνει διαχω-

ρισμός των υδρομετεώρων από άλλα σωματίδια (πχ. έντομα, πτηνά, σκόνη, παρασυρόμενα αντικείμενα λόγω ισχυρών ανέμων και ανεμοστρόβιλων), αλλά και να εκτιμηθεί η διεύθυνση και η ταχύτητα του ανέμου.

Τα περισσότερα ραντάρ αυτού του τύπου χρησιμοποιούν μόνο δύο επιλεγμένες ορθογωνικές πολικότητες, συνήθως την οριζόντια, ή και την κατακόρυφη για μετάδοση και λήψη.

## 6.9 Μετρήσεις από δορυφόρους

### 6.9.1 Γενικά

Η δορυφορική τηλεπισκόπηση προσφέρει μεγάλο πεδίο εφαρμογών και αποτελεί τις τελευταίες δύο δεκαετίες την πιο γρήγορα αναπτυσσόμενη τεχνολογία περιβαλλοντικής παρακολούθησης. Δεν εμπίπτει, όμως, αυστηρά στους σκοπούς του παρόντος συγγράμματος, οπότε θα παρουσιάσουμε εδώ μόνο μερικές βασικές αρχές και πληροφορίες. Όσοι αναγνώστες ενδιαφέρονται να εμβαθύνουν στη συγκεκριμένη τεχνολογία θα βρουν πολύ χρήσιμο το βιβλίο των Καρτάλη και Φείδα (2012).

Η χρήση της δορυφορικής τηλεπισκόπησης για την παρακολούθηση της ατμόσφαιρας της γης ξεκίνησε τη δεκαετία του 1960, ως αποτέλεσμα της ραγδαίας ανάπτυξης της τεχνολογίας των δορυφόρων και των ηλεκτρονικών υπολογιστών για την επεξεργασία της πληροφορίας. Ο πρώτος επιτυχής δορυφόρος καιρού θεωρείται ο TIROS-1 (Television and Infrared Observation Satellite), ο οποίος εκτοξεύτηκε από τη NASA την 1<sup>η</sup> Απριλίου του 1960. Ο TIROS ήταν πολικής τροχιάς και λειτούργησε για 78 ημέρες. Ακολούθησαν οι γεωστάσιμοι δορυφόροι, ξεκινώντας από τα τέλη της δεκαετίας του 1960.

Στη γήινη παρατήρηση το σημαντικότερο μέσο που διαβιβάζει τις πληροφορίες είναι η ηλεκτρομαγνητική ακτινοβολία, η οποία καταγράφεται από συστήματα αισθητήρων που έχουν προσαρτηθεί σε δορυφόρους. Το μετρούμενο σήμα προέρχεται από την αλληλεπίδραση της ηλεκτρομαγνητικής ακτινοβολίας με τα συστατικά στοιχεία της ατμοσφαιρας, από τα οποία απορροφάται, μεταδίδεται ή ανακλάται. Οι παραλλαγές αυτών των σημάτων που εξαρτώνται από το μήκος κύματος είναι η πρωτογενής πηγή πληροφοριών που συλλέγονται με τα συστήματα τηλεπισκόπησης και μόνο μετά από προσεκτική ερμηνεία αυτών των φασματικών υπογραφών.

Η δορυφορική τεχνολογία χρησιμοποιεί την ακτινοβολία σε διάφορα τμήματα του ηλεκτρομαγνητικού φάσματος για την τηλεπισκόπηση τόσο της ατμόσφαιρας όσο και της επιφάνειας της γης. Ανάλογα με την πηγή που παρέχει ενέργεια στον στόχο, οι αισθητήρες χωρίζονται σε δύο κατηγορίες:

i) **Παθητικοί** είναι οι αισθητήρες που μετρούν την ανακλώμενη ενέργεια από τον στόχο που προέρχεται από φυσικές πηγές.

ii) **Ενεργοί** είναι οι αισθητήρες που μετρούν την ανακλώμενη ενέργεια από τον στόχο που προέρχεται από τους ίδιους τους αισθητήρες.

Οι παθητικοί αισθητήρες μπορούν να χωριστούν σε άλλες δύο κατηγορίες, ανάλογα με τη φυσική πηγή ενέργειας. Στην πρώτη κατηγορία ανήκουν οι αισθητήρες που ανιχνεύουν ακτινοβολία που προέρχεται από τον ήλιο και η οποία ανήκει, κυρίως, στο υπεριώδες, ορατό και κοντινό υπέρυθρο του ηλεκτρομαγνητικού φάσματος. Στην περίπτωση αυτή, η ανίχνευση ανακλώμενης ακτινοβολίας από τον αισθητήρα γίνεται μόνο όταν ο ήλιος φωτίζει τον στόχο, δηλαδή την ημέρα. Στη δεύτερη κατηγορία παθητικών αισθη-

τήρων ανήκουν αυτοί που ανιχνεύουν τη θερμική εκπεμπόμενη ακτινοβολία από σώματα που έχουν θερμοκρασία μεγαλύτερη από το απόλυτο μηδέν. Για τα γήινα αντικείμενα, η εκπομπή θερμικής ενέργειας συμβαίνει κυρίως στο υπέρυθρο και σε μήκη κύματος της τάξης των 10  $\mu\text{m}$ . Μέτρηση της θερμικής ακτινοβολίας μπορεί να γίνει και ημέρα και νύχτα, εφόσον η αντίστοιχη ενέργεια που λαμβάνεται είναι επαρκώς μεγάλη. Μπορούν, επίσης, να μετρηθούν και ακτινοβολίες που ανήκουν στην περιοχή των μικροκυμάτων από 1,5-300 mm.

Οι ενεργοί αισθητήρες παρέχουν τη δική τους πηγή ενέργειας για φωτισμό του στόχου, με αποτέλεσμα να μπορούν να ανιχνεύσουν και να μετρήσουν οποιαδήποτε στιγμή της ημέρας. Αυτοί οι αισθητήρες μπορούν θεωρητικά να χρησιμοποιήσουν οποιαδήποτε ηλεκτρομαγνητική ακτινοβολία. Πρακτικά, όμως, υπάρχουν περιορισμοί, λόγω της διαπερατότητας της γήινης ατμόσφαιρας. Ένα ενεργητικό σύστημα πρέπει να κατασκευαστεί έτσι, ώστε να λειτουργεί στα δύο ατμοσφαιρικά παράθυρα. Για την παραγωγή ακτινοβολίας, απαιτείται κατανάλωση μεγάλων ποσών ενέργειας ώστε να φωτιστεί ο στόχος ικανοποιητικά.

### 6.9.2 Τροχιές δορυφόρων

Ένα σημαντικό κριτήριο για την ταξινόμηση των δορυφόρων βασίζεται στο ύψος πάνω από την επιφάνεια της Γης. Υπάρχουν οι *χαμηλού ύψους (Low Earth Orbit – LEO)*, οι *μεσαίου ύψους (Middle Earth Orbit – MEO)* και οι *γεωστατικές τροχιές (Geostationary Orbit – GEO)*.

**Χαμηλού ύψους τροχιές (LEO):** Οι τροχιές αυτές έχουν απόσταση από την επιφάνεια της Γης 160-1.400 km και είναι σχεδόν κυκλικές. Για να διατηρήσουν την τροχιά τους και να μην πέσουν στη Γη λόγω της βαρύτητας, οι δορυφόροι έχουν ταχύτητα περίπου 7,5 km/s και εκτελούν μία πλήρη περιστροφή σε 90-120 min. Επειδή βρίσκονται σε χαμηλό ύψος, έχουν μεγάλη διακριτική ικανότητα. Η περιοχή που καλύπτουν οι δορυφόροι που βρίσκονται σε χαμηλές τροχιές είναι μικρή και για να υπάρχει πλήρης κάλυψη της επιφάνειας της Γης απαιτούνται τουλάχιστον 40. Ο χρόνος ζωής των δορυφόρων είναι σχετικά μικρός, 5-7 χρόνια. Αυτό οφείλεται στο ότι δέχονται μεγαλύτερη βαρυτική έλξη από τη Γη λόγω του χαμηλού ύψους, και στο ότι η μπαταρία τους έχει χαμηλότερο χρόνο ζωής γιατί χρειάζονται να επικοινωνούν συχνότερα από ό,τι οι άλλοι δορυφόροι.

Οι δορυφόροι χαμηλής τροχιάς χωρίζονται σε (i) ισημερινής τροχιάς, (ii) πολικής τροχιάς, και (iii) πλάγιας ή σχεδόν πολικής τροχιάς.

**Μεσαίου ύψους τροχιές (MEO):** Οι τροχιές αυτές είναι συνήθως σχεδόν κυκλικές και το σύνηθες ύψος είναι 10.000 km. Η ταχύτητα περιστροφής των δορυφόρων είναι περίπου 5 km/s με περίοδο 6 ώρες. Οι δορυφόροι σε μεσαίες τροχιές έχουν χρόνο ζωής 10-15 χρόνια, καλύπτουν μεγαλύτερη επιφάνεια και μια ομάδα από 10-15 δορυφόρους επιτυγχάνει πλήρη κάλυψη της επιφάνειας της Γης. Σε αυτές τις τροχιές ανήκουν και οι *ημι-σύγχρονες* τροχιές που έχουν περίοδο 12 ωρών και έχουν κύκλο επανάληψης 24 ώρες.

**Γεωστατικές τροχιές (GEO):** Είναι κυκλικές τροχιές σε ύψος 35.786 km από την επιφάνεια της Γης με περίοδο 23h 56min και 4sec δηλ. ίδια με την περίοδο περιστροφής της Γης. Στις γεωστατικές τροχιές ο δορυφόρος φαίνεται σαν να είναι σταθερός πάνω από ένα συγκεκριμένο σημείο της επιφάνειας της Γης. Η ταχύτητα περιστροφής ενός γεωστατικού δορυφόρου είναι περίπου 3 km/sec και ο χρόνος ζωής τους είναι 10-15 χρόνια. Οι γεωστατικοί δορυφόροι παρέχουν συνεχή κάλυψη 42,4% της υδρογείου γεγονός που τους κάνει ιδανικούς για τηλεπικοινωνιακούς σκοπούς και για την παρακο-

λούθηση μεγάλων καιρικών συστημάτων και κλιματικών παραμέτρων. Ένα σύστημα τριών γεωστατικών δορυφόρων καλύπτει τη Γη από 70°S-70°N.



**Εικόνα 6.7** Ο δορυφόρος *GPM Core Observatory* σε τροχιά γύρω από τη Γη. Η *Παγκόσμια Μέτρηση Υετού (Global Precipitation Measurement, GPM)* είναι μια διεθνής αποστολή δορυφόρου για μετρήσεις υετού από το διάστημα που παρέχει παγκόσμιες παρατηρήσεις για τη βροχή και το χιόνι διεθνώς κάθε τρεις ώρες (πηγή://en.wikipedia.org/wiki/Global\_Precipitation\_Measurement#/media/File:Visualization\_of\_the\_GPM\_Core\_Observatory\_and\_Partner\_Satellites.jpg)

### 6.9.3 Δορυφορικές παρατηρήσεις του υετού

Οι δορυφόροι μπορούν μέσω της ηλεκτρομαγνητικής ακτινοβολίας να μετρήσουν τον υετό (Εικόνα 6.7). Επειδή μόνο ένα μικρό μέρος των νεφών δημιουργούν υετό, θα πρέπει να μπορούμε να ξεχωρίσουμε τα υετοφόρα από τα μη υετοφόρα νέφη. Οι τεχνικές τηλεπισκόπησης που χρησιμοποιούνται μπορούν να ταξινομηθούν όπως παρακάτω:

#### α. Παθητική τηλεπισκόπηση

- Τεχνικές τηλεπισκόπησης στο ορατό και το υπέρυθρο

Τα νέφη δεν είναι διαφανή στο υπέρυθρο και στο ορατό, επομένως η προσέγγιση αυτή βασίζεται στο συσχετισμό ανεξάρτητων μετρήσεων της βροχόπτωσης με τις ιδιότητες του νέφους, όπως αυτές προκύπτουν από τηλεπισκόπηση στο ορατό και το υπέρυθρο. Οι μετρήσεις που γίνονται με αυτή την τεχνική ονομάζονται έμμεσες μετρήσεις του υετού.



- Τεχνικές μικροκυμάτων

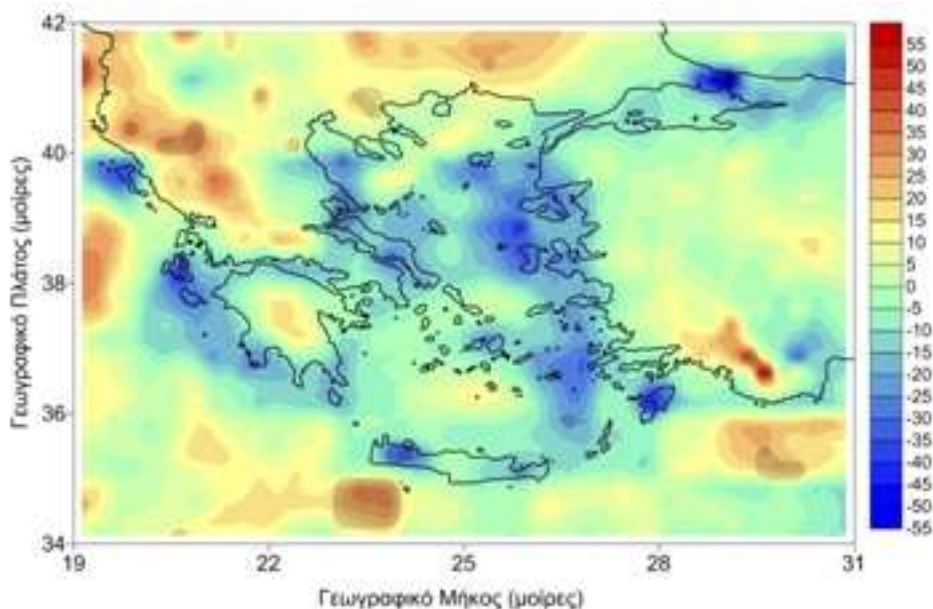
Η εκτίμηση της έντασης βροχόπτωσης από παθητικό αισθητήρα μικροκυμάτων βασίζεται στη μέτρηση είτε της εκπεμπόμενης είτε της σκεδαζόμενης από τις βροχοσταγόνες μικροκυματικής ακτινοβολίας.

β. Ενεργός τηλεπισκόπηση

Έχουμε δραστική εκπομπή ακτινοβολίας από το δορυφορικό ραντάρ και λήψη της ανακλώμενης ακτινοβολίας. Η τεχνική είναι παρόμοια με αυτή των επίγειων ραντάρ. Το Precipitation Radar (PR) είναι το πρώτο ραντάρ βροχόπτωσης που τοποθετήθηκε στον δορυφόρο TRMM (Tropical Rainfall Measuring Mission) με στόχο:

- 1) την εκτίμηση της 3-διάστατης δομής της βροχόπτωσης,
- 2) την ποσοτική εκτίμηση της βροχής σε θάλασσα και ξηρά,
- 3) τη βελτίωση της ακρίβειας των έως τώρα εκτιμήσεων με την ταυτόχρονη και συνδυασμένη χρήση ενεργού (PR) και παθητικού (TMI / VIRS) αισθητήρα.

Στην εικόνα 6.8 εμφανίζεται το παράδειγμα ενός προϊόντος που βασίζεται σε μετρήσεις του TRMM.



**Εικόνα 6.8** Γεωγραφική κατανομή της κανονικής τιμής του ολικού ετήσιου ύψους βροχής (σε mm) με βάση το δορυφορικό προϊόν 3B43 του TRMM για την περίοδο 1998-2011. Ο υπολογισμός έγινε στο πλαίσιο του ερευνητικού προγράμματος ΓΕΩΚΛΙΜΑ (Feidas et al., 2012)

## Βιβλιογραφία

### Ελληνική

Ζιακόπουλος Δ. (2008) Καιρός: Ο γιος της Γης και του Ήλιου. ΤΟΜΟΣ II, *Η Γνώση*. Ιδιωτική Έκδοση, 259 σελίδες.

Καρτάλης Κ. & Χ. Φείδας (2012). *Αρχές και εφαρμογές δορυφορικής τηλεπισκόπησης*. Εκδόσεις Τζιόλα, Θεσσαλονίκη, ISBN 978-960-418-401-9.

Μπαλτάς Ε. (1996). *Εκτίμηση και πρόγνωση καταγίδων και πλημμυρών με χρήση μετεωρολογικού ραντάρ*. Διδακτορική Διατριβή, Εθνικό Μετσόβειο Πολυτεχνείο.

### Αγγλική

Brock, F. V. and S. J. Richardson (2001). *Meteorological Measurement Systems*, Oxford University Press, ISBN 0-19-513451-6

Cartalis C., H. Feidas, M. Glezakou, M. Proedrou & N. Chrysoulakis (2000). Use of earth observation in support of environmental impact assessments: Prospects and trends. *Environmental Science and Policy*, 3: 287-294.

Danby, H. (1933). *Translation of 'The Mishnah'*. Oxford University Press.

DeFelice, T. P. (1998). *An Introduction to Meteorological Instrumentation and Measurement*. Prentice Hall, Upper Saddle River, NJ.

Feidas H., P. Zanis, D. Melas, M. Vaitis, E. Anadranistakis, P. Symeonidis, S. Pantelopoulos (2012). The Geographic Climate Information System Project (GEO-CLIMA): Overview and preliminary results. *Geophysical Research Abstracts*, Vol. 14, EGU2012-4442, 2012, EGU General Assembly 2012.

Strangeways IC. (2003). *Measuring the natural environment* (2nd edn). Cambridge University Press: Cambridge, UK.

World Meteorological Organization (1992). Snow Cover Measurements and Areal Assessment of Precipitation and Soil Moisture (B. Sevruk, ed.). *Operational Hydrology Report*, No. 35, WMO-No. 749, Geneva.

World Meteorological Organization (2008). *Guide to Hydrological Practices*. WMO-No. 168, Geneva.

World Meteorological Organization (2010). *Guide to the Global Observing System*. (Updated in 2012), WMO-No. 488, Geneva.

World Meteorological Organization (2008). *Guide to Meteorological Instruments and Methods of Observation*. (Updated in 2010), WMO-No. 8, Geneva.

## ΚΕΦΑΛΑΙΟ 7: ΜΕΤΡΗΣΗ ΤΗΣ ΑΚΤΙΝΟΒΟΛΙΑΣ

### Σύνοψη

Στο κεφάλαιο αυτό παρουσιάζονται αντιπροσωπευτικοί τύποι οργάνων που χρησιμοποιούνται για τη μέτρηση της ηλιακής ακτινοβολίας που φτάνει στο έδαφος. Συγκεκριμένα, περιγράφονται οι αρχές λειτουργίας τους, τα βασικά τους χαρακτηριστικά που καθορίζουν το φασματικό και γεωμετρικό χαρακτήρα των μετρήσεων, τα σφάλματα που υπεισέρχονται από διάφορους παράγοντες και οι διαδικασίες βαθμονόμησης και ποιοτικού ελέγχου των μετρήσεων.

Σε πολλές πρακτικές εφαρμογές, αλλά και για τις ερευνητικές δραστηριότητες που αναπτύσσονται γύρω από τον τομέα των Ατμοσφαιρικών Επιστημών, απαιτούνται μετρήσεις της ακτινοβολίας που εκπέμπεται από τον ήλιο, τη γη ή την ίδια την ατμόσφαιρα. Είναι προφανές ότι, και στις δύο τελευταίες περιπτώσεις, η αρχική προέλευση της ακτινοβολούμενης ενέργειας είναι ουσιαστικά ο ήλιος, αλλά πολλές φορές ενδιαφέρουν την επιστημονική έρευνα ή τις εφαρμογές της μετρήσεις της ακτινοβολίας, ανάλογα με την τελική της προέλευση. Τα όργανα τα οποία έχουν αναπτυχθεί για το σκοπό αυτό ονομάζονται, γενικώς, ακτινόμετρα ή ραδιόμετρα (από τον λατινικό όρο radiation), αλλά ο σχεδιασμός τους, η ακρίβεια και το είδος των μετρήσεων που εκτελούν διαφέρει, ανάλογα με τις ιδιαίτερες απαιτήσεις της κάθε εφαρμογής. Γενικά, η μέτρηση της ακτινοβολίας που συνίσταται στη μέτρηση της ενέργειας που μεταφέρεται στη μονάδα του χρόνου, κάτω από ορισμένους, κατά περίπτωση, γεωμετρικούς περιορισμούς και ανήκει σε κάποια καθορισμένη φασματική περιοχή. Εκτός από τη μέτρηση της ακτινοβολίας που εκπέμπεται από φυσικές πηγές, τα όργανα χρησιμοποιούνται και για τη μέτρηση της ακτινοβολίας που εκπέμπεται από τεχνητές πηγές. Οι μετρήσεις αυτές χρησιμεύουν για τη βαθμονόμηση και τον ποιοτικό έλεγχο των οργάνων.

### 7.1 Ακτινομετρικά μεγέθη

Πριν προχωρήσουμε στην περιγραφή των οργάνων μέτρησης της ακτινοβολίας, κρίνεται απαραίτητο να αναφέρουμε συνοπτικά τα πλέον χρησιμοποιούμενα στις ατμοσφαιρικές επιστήμες μεγέθη, τα οποία έχουν καθοριστεί ανάλογα με τα γεωμετρικά και φασματικά χαρακτηριστικά του μετρούμενου μεγέθους, αλλά και με το χρονικό διάστημα στο οποίο αναφέρονται. Για κάθε ακτινομετρικό μέγεθος, παρατίθενται ενδεικτικά ο αντίστοιχος λατινικός όρος, το λατινικό γράμμα συμβολισμού του και οι μονάδες που χρησιμοποιούνται συνήθως.

#### **Ροή ή ισχύς (radiant flux or power), $\Phi(\lambda)$ , [W]**

Ορίζεται ως η ακτινοβολούμενη ενέργεια  $Q$  που προσπίπτει, εκπέμπεται ή διαδίδεται ανά μονάδα χρόνου:

$$\Phi = \frac{dQ}{dt} \quad (7-1)$$

### **Φασματική Ένταση (spectral radiance), $L(\lambda)$ , [ $\text{W m}^{-2} \text{nm}^{-1} \text{sr}^{-1}$ ]**

Ορίζεται ως η ισχύς  $\Phi$  που εκπέμπεται από μία επιφάνεια ανά μονάδα στερεάς γωνίας  $\Omega$ , σε μία διεύθυνση  $(\theta, \varphi)$ , ανά μονάδα προβαλλόμενης επιφάνειας  $A$  και ανά μονάδα μήκους κύματος:

$$L(\lambda, \theta, \varphi) = \frac{d^3\Phi}{d\Omega dA \cos\theta d\lambda} \quad (7-2)$$

Ο όρος  $dA \cos\theta$ , ορίζει την προβολή της επιφάνειας  $dA$  σε επίπεδο κάθετο στη διεύθυνση  $\theta$ . Όταν η ένταση είναι ανεξάρτητη της διεύθυνσης, ονομάζεται ισότροπη ( $L(\lambda, \theta, \varphi) \equiv L(\lambda)$ ).

### **Φασματική Πυκνότητα Ροής ακτινοβολίας (spectral irradiance), $E(\lambda)$ , [ $\text{W m}^{-2} \text{nm}^{-1}$ ]**

Εκφράζει τη φασματική ροή της ακτινοβολίας που προσπίπτει σε μία επίπεδη επιφάνεια (**επιφάνεια αναφοράς**) ανά μονάδα επιφάνειας:

$$E(\lambda) = \frac{d^2\Phi}{dA d\lambda} \quad (7-3)$$

Συνήθως, ως επιφάνεια αναφοράς, ορίζεται το οριζόντιο επίπεδο. Στο μέγεθος αυτό συνεισφέρουν οι δέσμες φωτονίων από όλες τις από διευθύνσεις που ανήκουν στο ημισφαίριο πάνω από την επιφάνεια, ανάλογα με το συνημίτονο της γωνίας που σχηματίζει η κάθε διεύθυνση με την κάθετο στην επιφάνεια. Δέσμες που προσπίπτουν υπό μεγάλη κλίση (π.χ. από διευθύνσεις κοντά στον ορίζοντα) συνεισφέρουν ελάχιστα στην πυκνότητα ροής ( $\cos\theta \rightarrow 0$  ενώ αυτές από διευθύνσεις κοντά στην κατακόρυφο συνεισφέρουν σημαντικά ( $\cos\theta \rightarrow 1$ ). Άρα, η πυκνότητα ροής προκύπτει από την ολοκλήρωση σε όλο ημισφαίριο ( $2\pi$ ) της έντασης που προσπίπτει στην επιφάνεια, πολλαπλασιασμένης με το συνημίτονο της γωνίας πρόσπτωσης  $\theta$ .

$$E(\lambda) = \int_0^{2\pi} \int_0^{\frac{\pi}{2}} L(\lambda, \theta, \varphi) \cos\theta \sin\theta d\theta d\varphi \quad (7-4)$$

### **Φασματική ακτινική πυκνότητα ροής (spectral actinic flux), $F(\lambda)$ , [ $\text{W m}^{-2} \text{nm}^{-1}$ ]**

Εκφράζει τη φασματική ροή της ακτινοβολίας ανά μονάδα επιφάνειας, η οποία προσπίπτει σε μία σφαιρική επιφάνεια. Αντίθετα με την πυκνότητα ροής, η ακτινική ροή είναι το αποτέλεσμα που προκύπτει από την ολοκλήρωση της λαμπρότητας σε όλο το χώρο ( $4\pi$ ). Η ακτινοβολία προσπίπτει κάθετα στην επιφάνεια αναφοράς (σφαίρα), ανεξάρτητα από τη διεύθυνσή της. Έτσι, όλες οι ακτίνες συμμετέχουν με το ίδιο ποσοστό στον καθορισμό της ακτινικής ροής.

$$F(\lambda) = \int_0^{2\pi} \int_0^{\frac{\pi}{2}} L(\lambda, \theta, \varphi) \sin\theta d\theta d\varphi \quad (7-5)$$

Πολλά από τα παραπάνω μεγέθη χρησιμοποιούνται και με τη μορφή της ισχύος της ακτινοβολίας ολοκληρωμένης σε μία φασματική περιοχή, όπως, για παράδειγμα, η πυ-

κνότητα ροής  $E_{o\lambda}$  που προέρχεται από την ολοκλήρωση της φασματικής πυκνότητας ροής  $E(\lambda)$  σε ένα εύρος μηκών κύματος από  $\lambda_1$  έως  $\lambda_2$ :

$$E_{o\lambda} = \int_{\lambda_1}^{\lambda_2} E(\lambda) d\lambda \quad (7-6)$$

Σε ειδικές περιπτώσεις, η ολοκλήρωση γίνεται με τη σύγχρονη εφαρμογή μιας φασματικής συνάρτησης βάρους  $s(\lambda)$ , η οποία, συνήθως, εκφράζει τη σχετική ικανότητα της ακτινοβολίας (φασματική ευαισθησία) να προκαλέσει κάποιο αποτέλεσμα (π.χ. βιολογικό ή φωτοχημικό). Συνήθως, η συνάρτηση βάρους προσδιορίζεται έτσι ώστε  $\int s(\lambda) d\lambda = 1$ . Το μέγεθος που προκύπτει μπορεί να χαρακτηριστεί και ως «ενεργό» (*effective*) και η (7-6) γράφεται:

$$E_{eff} = \int E(\lambda) s(\lambda) d\lambda \quad (7-7)$$

όπου η ολοκλήρωση γίνεται στη φασματική περιοχή στην οποία η συνάρτηση  $s(\lambda) \neq 0$ .

Τέλος, όταν η ολοκλήρωση αναφέρεται επιπλέον και σε ένα χρονικό διάστημα, τότε έχουμε ακτινομετρικά μεγέθη, τα οποία αντιστοιχούν στη συνολική ακτινοβολούμενη ενέργεια που προσπίπτει στο χρονικό διάστημα αναφοράς (έκθεση). Για παράδειγμα, η ενέργεια ακτινοβολίας  $H$  προκύπτει από την ολοκλήρωση της πυκνότητας ροής  $E_{o\lambda}(t)$  σε ένα διάστημα  $t$ .

$$H = \int_t E_{o\lambda}(t) dt \quad (7-8)$$

## 7.2 Γενικά για όργανα μέτρησης της ακτινοβολίας

Τα είδη των οργάνων που έχουν αναπτυχθεί μέχρι σήμερα για τη μέτρηση της ακτινοβολίας είναι πολλά, ως αποτέλεσμα τόσο της συνεχούς εξέλιξης της τεχνολογίας, όσο και των αυξανόμενων απαιτήσεων των διαφόρων εφαρμογών και ερευνητικών δραστηριοτήτων. Η επιστημονική κοινότητα έχει στη διάθεσή της μια μεγάλη ποικιλία οργάνων, από τα πλέον απλά θερμικά ακτινόμετρα, μέχρι τα πλέον σύγχρονα και πολύπλοκα φασματοφωτόμετρα. Λόγω της μεγάλης ποικιλίας, είναι μάλλον δύσκολη η σαφής κατηγοριοποίηση των οργάνων. Παρόλα σε τυπικό όργανο μέτρησης της ακτινοβολίας μπορούμε να διακρίνουμε διακριτά τμήματα, παρόλο που κάποια από αυτά δεν είναι απαραίτητα να υπάρχουν σε όλους τους τύπους των οργάνων. Πιο συγκεκριμένα, μπορούμε να διακρίνουμε σε ένα όργανο τα εξής μέρη:

- α) τη διάταξη **συλλογής** της ακτινοβολίας (συλλέκτης), το οποίο καθορίζει σε μεγάλο βαθμό και τα γεωμετρικά χαρακτηριστικά του μετρούμενου ακτινομετρικού μεγέθους.
- β) τη διάταξη **φασματικής απόκρισης**, η οποία καθορίζει το φασματικό εύρος και τα φασματικά χαρακτηριστικά του μετρούμενου μεγέθους.
- γ) τη διάταξη **ανίχνευσης** και **μέτρησης** του σήματος της ακτινοβολίας (ανιχνευτής), η οποία καθορίζει και την ακρίβεια της μέτρησης και, τέλος,
- δ) τη μονάδα **καταγραφής**, η οποία εξασφαλίζει την παροχή του μετρούμενου σήματος της μέτρησης στο χρήστη.

Σε κάθε περίπτωση, είναι απαραίτητη η σύζευξη της κάθε μονάδας με την επόμενη, ώστε να εξασφαλίζεται η διαδοχική μεταφορά της ισχύος της ακτινοβολίας από την είσοδο μέχρι τη μονάδα καταγραφής. Όπως δε προαναφέρθηκε, σε πολλά από τα απλούστερα όργανα, κάποια από τις διατάξεις αυτές μπορεί να απουσιάζει ή να είναι ενσωματωμένη με κάποια άλλη. Στις επόμενες ενότητες, περιγράφονται τα βασικότερα χαρακτηριστικά για κάθε διάταξη και ο τρόπος με τον οποίο συμμετέχει στη διαδικασία των μετρήσεων. Στη συνέχεια, περιγράφονται με περισσότερες λεπτομέρειες τα φασματοφωτόμετρα και τα ακτινόμετρα, καθώς και οι βασικές διαδικασίες που αφορούν τη βαθμολόγησή τους και τον ποιοτικό έλεγχο των μετρήσεων.

### 7.2.1 Συλλέκτης της ακτινοβολίας

Η διάταξη αυτή συλλέγει τα φωτόνια που φθάνουν στο όργανο και καθορίζει τη γεωμετρία της ακτινοβολίας που πρόκειται να μετρηθεί. Ουσιαστικά επιτρέπει τη συλλογή φωτονίων από συγκεκριμένες διευθύνσεις, ανάλογα με το μετρούμενο μέγεθος. Τα φωτόνια που συλλέγονται οδηγούνται στην επόμενη διάταξη φασματική ανάλυσης. Ανάλογα με το είδος του συλλέκτη που είναι εφοδιασμένο ένα όργανο, αυτό μπορεί να χρησιμοποιηθεί για τη μέτρηση των εξής παραμέτρων και αντίστοιχων μεγεθών:

- Ολική ακτινοβολία (μέγεθος: πυκνότητα ροής σε οριζόντια επιφάνεια - irradiance)
- Άμεση ακτινοβολία (μέγεθος: πυκνότητα ροής σε επιφάνεια κάθετη ως προς τη διεύθυνση διάδοσης της ακτινοβολίας - irradiance)
- Διάχυτη ακτινοβολία (μέγεθος: πυκνότητα ροής σε οριζόντια επιφάνεια - irradiance)
- Διάχυτη ακτινοβολία που περιέχεται σε κάποια συγκεκριμένη στερεά γωνία και σε συγκεκριμένη διεύθυνση (μέγεθος: ένταση- radiance).

Γενικά, η ακτινοβολία που προσπίπτει σε ένα σώμα (ολική ακτινοβολία) αποτελείται από δύο συνιστώσες, την άμεση και τη διάχυτη. Η άμεση συνιστώσα αποτελείται από φωτόνια που προέρχονται απευθείας από την πηγή (ήλιος, σελήνη, τεχνητή πηγή). Πρόκειται, δηλαδή, για μία δέσμη ακτίνων. Η διάχυτη συνιστώσα απαρτίζεται από φωτόνια που προέρχονται από διάφορες διευθύνσεις και είναι αποτέλεσμα σκέδασης από τα διάφορα συστατικά της ατμόσφαιρας (σωματίδια, μόρια), ανάκλασης από διάφορα αντικείμενα (έδαφος, νερό, χιόνι, κτίρια) ή εκπομπής (π.χ. γήινη ακτινοβολία, φθορισμός, χημειοφωταύγεια). Το πλέον χρησιμοποιούμενο ακτινομετρικό μέγεθος για τις τρεις παραμέτρους (ολική, άμεση και διάχυτη) είναι η πυκνότητα ροής της ακτινοβολίας.

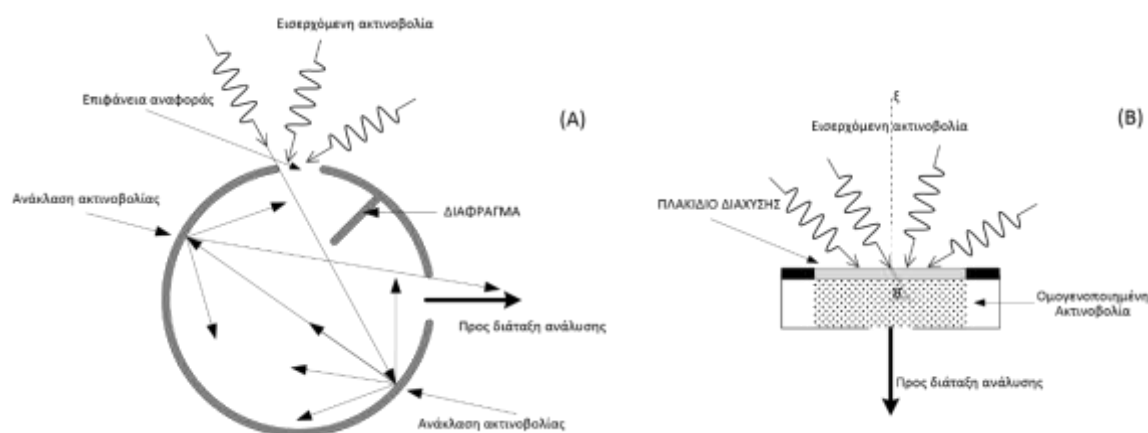
Η **επιφάνεια αναφοράς** για τη μέτρηση της άμεσης συνιστώσας είναι κάθετη προς την κατεύθυνση διάδοσης της δέσμης, ενώ για τις άλλες δύο παραμέτρους ορίζεται το οριζόντιο επίπεδο. Στις επόμενες ενότητες περιγράφονται οι τύποι συλλέκτη που χρησιμοποιούνται για κάθε παράμετρο.

#### Ολική ακτινοβολία

Η μέτρηση της ολικής ακτινοβολίας ανάγεται στη μέτρηση της ροής ή ισχύος της ακτινοβολίας η οποία προσπίπτει σε οριζόντια επιφάνεια ανά μονάδα επιφάνειας και ανά μονάδα μήκους κύματος. Ως συλλέκτης χρησιμοποιείται είτε η είσοδος μιας **σφαίρας ολοκλήρωσης** (integrating sphere) είτε ένα **πλακίδιο διάχυσης** (diffuser) (Σχήμα 7.1).

Για να είναι η μέτρηση της πυκνότητας ροής αντιπροσωπευτική, είναι απαραίτητο οι δύο συνιστώσες, άμεση και διάχυτη, να συνεισφέρουν στο μετρούμενο σήμα ανάλογα με την ισχύ που μεταφέρουν, και η οποία εναποτίθεται στην επιφάνεια αναφοράς. Έτσι, μία βασική ιδιότητα του συλλέκτη είναι η εξασφάλιση ισότροπης συμπεριφοράς του συστήματος στα φωτόνια που προσπίπτουν. Αυτό επιτυγχάνεται με τον εξαναγκασμό των φωτονίων να αποκλίνουν από την αρχική τους διεύθυνση με τρόπο τυχαίο, ώστε να σχηματίσουν ένα ομογενές «νέφος» φωτονίων με ισότροπη κατανομή στο χώρο. Αν τα φωτόνια που εισέρχονται στο όργανο ακολουθούσαν την αρχική τους διεύθυνση, ένα μέρος τους (π.χ. αυτά που προσπίπτουν κάθετα στο συλλέκτη) θα ανιχνεύονταν σχεδόν εξ ολοκλήρου, ενώ άλλα (π.χ. αυτά που προέρχονται από πολύ πλάγιες διευθύνσεις) δε θα μπορούσαν να εισέλθουν με την κατάλληλη γωνία στη διάταξη ανάλυσης του φωτός και δεν θα συνεισέφεραν στο σήμα. Η ομογενοποίηση της εισερχόμενης ακτινοβολίας επιτρέπει, επίσης, την ανεξαρτητοποίηση της μέτρησης από τις διαστάσεις του συλλέκτη, επιτρέποντας τη μέτρηση μόνο ενός κλάσματος (πάντα του ίδιου) της ισχύος της ακτινοβολίας που εναποτίθεται, ως αντιπροσωπευτική της συνολικής ισχύος. Στη συνέχεια, η ισότροπη δέσμη φωτονίων εστιάζεται με ένα κατάλληλο οπτικό σύστημα στην είσοδο της διάταξης ανάλυσης.

Η **σφαίρα ολοκλήρωσης** (Σχήμα 7.1A) είναι μία κοίλη σφαίρα με δύο κυκλικά ανοίγματα που σχηματίζουν ορθή γωνία μεταξύ τους και το εσωτερικό της είναι επικαλυμμένο με υλικό (χρώμα ή εναπόθεση κόκκων) που παρουσιάζει ανακλαστικότητα σχεδόν ίση με τη μονάδα. Τοποθετείται έτσι ώστε το ένα άνοιγμα (είσοδος) να είναι οριζόντιο. Η επιφάνεια του ανοίγματος είναι η επιφάνεια αναφοράς. Τα εισερχόμενα φωτόνια ανακλώνται περισσότερες από μία φορές στα τοιχώματα της σφαίρας και, στατιστικά, κάποια από αυτά, καταλήγουν να εξέλθουν από το δεύτερο άνοιγμα (έξοδος). Ένα διάφραγμα κατάλληλα τοποθετημένο μέσα στη σφαίρα, απαγορεύει την άμεση έξοδο των εισερχόμενων φωτονίων (πριν δηλαδή ανακλαστούν), ώστε να αποκλείεται προτίμηση στην απόκριση της σφαίρας σε φωτόνια από κάποια συγκεκριμένη διεύθυνση. Τελικά, η εξερχόμενη ακτινοβολία, η οποία είναι ομογενής και ισότροπη, εστιάζεται στην είσοδο της διάταξης ανάλυσης του φωτός. Λόγω του μεγάλου αριθμού των φωτονίων που εισέρχονται, το ποσοστό των εξερχόμενων από την έξοδο θεωρείται σταθερό, ανεξάρτητα από την ένταση της εισερχόμενης ακτινοβολίας. Το γεγονός ότι μόνο ένα ποσοστό από τα προσπίπτοντα φωτόνια καταλήγει στη διάταξη ανάλυσης, δεν δημιουργεί κάποιο πρόβλημα, διότι η μέτρηση της ακτινοβολίας είναι, ούτως η άλλως, σχετική. Αρκεί, βέβαια, το ποσοστό αυτό να είναι σταθερό (βλέπε και §7.2).



**Σχήμα 7.1** Σχηματική παράσταση της γεωμετρίας του συλλέκτη για τη μέτρηση της πυκνότητας ροής της ακτινοβολίας στο οριζόντιο επίπεδο, με τη χρήση σφαίρας ολοκλήρωσης (A) ή πλακιδίου διάχυσης (B).

Παρόμοιο αποτέλεσμα επιτυγχάνεται και με τα **πλακίδια διάχυσης** (Σχήμα 7.1B). Η προσπίπτουσα ακτινοβολία εισέρχεται στο πλακίδιο, όπου σκεδάζεται μέσα στο υλικό του πλακιδίου, αλλάζοντας διεύθυνση επίσης κατά τυχαίο τρόπο. Έτσι, η εξερχόμενη ακτινοβολία είναι ομογενής και ισότροπη. Τα πλακίδια διάχυσης είναι σχετικά λεπτές επιφάνειες κατασκευασμένες από διάφορα υλικά που επιλέγονται ανάλογα με τη φασματική περιοχή λειτουργίας. Συνήθως, είναι πλακίδια χαλαζία τα οποία έχουν υποστεί ειδική επεξεργασία, ώστε να καταστούν αδιαφανή, ή λεπτά φύλλα από διάφορα πλαστικά υλικά, όπως, π.χ. το Teflon. Το πάχος τους είναι τέτοιο, ώστε, αφενός μεν να εξασφαλίζεται η προϋπόθεση ότι όλα τα φωτόνια θα σκεδαστούν τουλάχιστον μία φορά πριν διαπεράσουν το πλακίδιο, χωρίς όμως να έχουν μεγάλο πάχος το οποίο να εξασθενίζει υπερβολικά την ακτινοβολία επηρεάζοντας αρνητικά την ευαισθησία του οργάνου. Είναι φυσικό ότι ένα μεγάλο μέρος των σκεδαζόμενων φωτονίων δεν κατορθώνει να διαπεράσει το πλακίδιο, είτε επειδή σκεδάζονται προς τα πίσω ή προς πλάγιες διευθύνσεις είτε επειδή απορροφώνται από το υλικό του πλακιδίου. Όπως και στην περίπτωση της σφαίρας ολοκλήρωσης, το ποσοστό της διερχόμενης ακτινοβολίας θεωρείται σταθερό.

Η εξασθένιση που προκαλεί στην προσπίπτουσα ακτινοβολία ο συλλέκτης είναι αρκετά σημαντική, αποτελώντας ένα από τα βασικότερα μειονεκτήματα, εφόσον το αποτέλεσμα είναι η ελάττωση της ευαισθησίας του οργάνου. Η διαπερατότητα των πλακιδίων διάχυσης είναι εξαιρετικά μικρή και, ιδιαίτερα στην περιοχή του υπεριώδους, φτάνει μόλις το 5%. Επειδή οι σφαίρες ολοκλήρωσης είναι ανοιχτές προς το περιβάλλον, πολύ εύκολα η εσωτερική επικάλυψη αλλοιώνεται, αλλάζοντας, έτσι, και την διαπερατότητα της διάταξης. Γενικά, οι σφαίρες ολοκλήρωσης είναι πολύ ευαίσθητες και δεν ενδείκνυνται για συνεχή εξωτερική χρήση, παρόλο που παρουσιάζουν καλύτερες αποδόσεις συγκριτικά με τα πλακίδια διάχυσης. Τα τελευταία είναι πολύ ανθεκτικά στις εξωτερικές συνθήκες, ώστε, σε πολλές περιπτώσεις, να χρησιμοποιούνται συνεχώς για πολλά χρόνια, χωρίς ιδιαίτερη υποβάθμιση της απόδοσής τους. Μία λύση προφύλαξης και για τις δύο διατάξεις είναι η χρήση αδιάβροχων διαφανών θόλων, οι οποίοι τοποθετούνται πάνω από το πλακίδιο διάχυσης ή από το άνοιγμα της σφαίρας ολοκλήρωσης, χωρίς να αλλοιώνουν το πεδίο της ακτινοβολίας, εφόσον βέβαια το υλικό κατασκευής τους το επιτρέπει. Το πλέον σύνηθες υλικό είναι ο χαλαζίας, ο οποίος παρουσιάζει σχεδόν απόλυτη διαπερατότητα σε όλο το φάσμα της ηλιακής ακτινοβολίας, αλλά αποτελεί μια αρκετά δαπανηρή επιλογή.

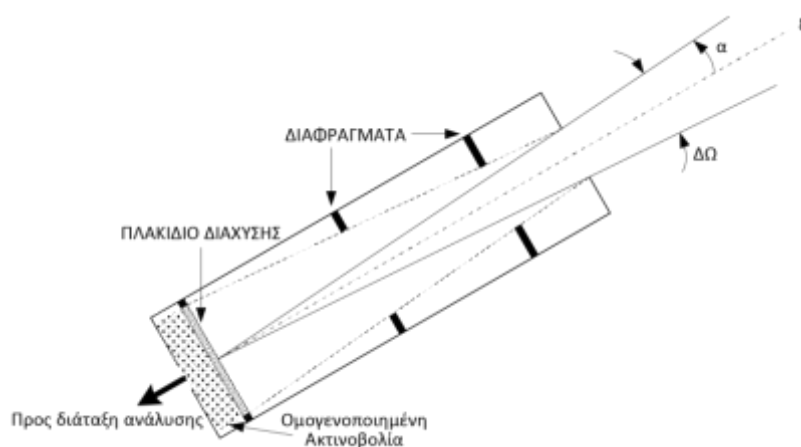
### **Άμεση ακτινοβολία**

Η μέτρηση της άμεσης συνιστώσας της ηλιακής ακτινοβολίας ανάγεται στην μέτρηση της πυκνότητας ροής σε επιφάνεια αναφοράς κάθετης στη διεύθυνση διάδοσης της ακτινοβολίας. Υπενθυμίζεται ότι η άμεση συνιστώσα αποτελείται από φωτόνια που προέρχονται απευθείας από την πηγή (π.χ. τον ήλιο), άρα απαιτείται περιορισμός του οπτικού πεδίου της διάταξης, ώστε να αποκλείεται η είσοδος σε φωτόνια που προέρχονται από άλλες κατευθύνσεις (π.χ. της διάχυτης ακτινοβολίας). Αυτό επιτυγχάνεται με χρήση ενός σωλήνα μικρής διαμέτρου ή διαδοχικών (δύο ή περισσότερων) διαφραγμάτων, ενώ ο άξονας της διάταξης κατευθύνεται προς την πηγή του φωτός (βλέπε σχήμα 7.2). Έτσι, η στερεά γωνία  $\Delta\Omega$  που "βλέπει" ο συλλέκτης είναι πολύ μικρή, ώστε να εξαιρούνται όλα (ή σχεδόν όλα) τα φωτόνια που προέρχονται από άλλες διευθύνσεις. Η σχέση διαμέτρου και μήκους του οπτικού σωλήνα καθορίζει το οπτικό πεδίο της διάταξης. Η γωνία αυτή ( $2\alpha$ ) δεν μπορεί να είναι μικρότερη από μία τιμή που καθορίζεται από το γωνιακό μέγεθος της πηγής. Για τον ήλιο, η γωνία αυτή θα πρέπει να είναι μεγαλύτερη από τη φαινόμενη διάμετρο του ήλιου (περίπου  $0.5^\circ$ ). Για τον ήλιο, η διάταξη θα



πρέπει να παρακολουθεί την φαινόμενη κίνησή του, ώστε να δέχεται συνεχώς όλη την άμεση ακτινοβολία. Αυτό επιτυγχάνεται με μηχανισμούς οι οποίοι ηλεκτρονικά κατευθύνουν τον άξονα της διάταξης συλλογής ( $\xi$ ) ώστε να συμπίπτει με τον άξονα Γης - ήλιου. Επειδή η απαιτούμενη ακρίβεια για τον προσανατολισμό των διατάξεων αυτών είναι μεγάλη (εξαρτάται από το κόστος), συνήθως, παρατηρούνται μικρές αποκλίσεις από τον ορθό προσανατολισμό κατά τη διάρκεια της λειτουργίας τους. Για να εξασφαλίζεται η μέτρηση ολόκληρης της άμεσης ακτινοβολίας, το οπτικό πεδίο της μονάδας συλλογής κατασκευάζεται δύο ή τρεις φορές μεγαλύτερο από το γωνιακό μέγεθος της πηγής.

Όπως και στην προηγούμενη περίπτωση, προκειμένου να αντιστοιχεί η μέτρηση της άμεσης συνιστώσας σε πυκνότητα ροής, η διερχόμενη ακτινοβολία προσπίπτει σε ένα πλακίδιο διάχυσης, τοποθετημένου στη βάση του οπτικού σωλήνα. Από το σημείο αυτό, η διαδικασία μέτρησης είναι η ίδια με αυτήν που περιγράφηκε για την ολική ακτινοβολία.



**Σχήμα 7.2** Σχηματική παράσταση της γεωμετρίας του συλλέκτη για τη μέτρηση της άμεσης ακτινοβολίας ή της διάχυτης σε περιορισμένο οπτικό πεδίο.

Η άμεση ακτινοβολία από τον ήλιο μπορεί να εκφραστεί και σε μονάδες έντασης, εφόσον η στερεά γωνία με την οποία φαίνεται ο ηλιακός δίσκος είναι γνωστή και σταθερή, και προκύπτει από τη διαίρεση της πυκνότητας ροής  $E_b$  με τη στερεά γωνία  $\Omega_s$  του Ήλιου:

$$L = \frac{E_b}{\Omega_s}, \quad \Omega_s = 0.009305 \text{ radians} \quad (7-9)$$

### **Διάχυτη ακτινοβολία σε περιορισμένο οπτικό πεδίο (ένταση)**

Για τη μέτρηση της διάχυτης ακτινοβολίας η οποία περιέχεται μέσα σε κάποια καθορισμένη στερεά γωνία ( $\Delta\Omega$ ) ακολουθείται σχεδόν η ίδια διαδικασία με τη μέτρηση της άμεσης ακτινοβολίας. Και σε αυτή την περίπτωση απαιτείται περιορισμός του οπτικού πεδίου του οργάνου. Οι μετρήσεις της διάχυτης ακτινοβολίας της ατμόσφαιρας (δηλαδή της ακτινοβολίας του ουρανού) παρουσιάζουν ενίοτε προβλήματα ακρίβειας, λόγω της μικρής έντασης της ακτινοβολίας σε συνδυασμό με την μεγάλη εξασθένιση που προκαλούν τα πλακίδια διάχυσης. Εναλλακτικά, μπορεί να αποφευχθεί η χρήση του πλακιδίου διάχυσης θεωρώντας ότι το φως του ουρανού είναι ήδη ομογενές (στη σχετικά μικρή στερεά γωνία του οπτικού πεδίου των οργάνων) οπότε η απαίτηση για ισότροπη και ο-



όπου  $\lambda$  είναι το μήκος κύματος.

Η πυκνότητα ροής της άμεσης συνιστώσας βαρύνεται με το  $\cos\theta$ , διότι η ροή κατανέμεται στην προβολή της επιφάνειας αναφοράς που είναι κάθετη στη διεύθυνση της ακτινοβολίας (Σχήμα 7.3).

### **Ακτινική ακτινοβολία σε σφαιρική επιφάνεια**

Η ακτινική ακτινοβολία αφορά μια ιδιαίτερη γεωμετρία στην οποία η επιφάνεια αναφοράς είναι σφαιρική έτσι ώστε ο συλλέκτης να συλλέγει όλα τα φωτόνια με την ίδια ευαισθησία, δίχως να βαρύνεται η κάθε προσπίπτουσα δέσμη φωτονίων με το συνημίτονο της γωνίας πρόσπτωσης. Ο συλλέκτης είναι σφαιρική ή ημισφαιρική επιφάνεια από υλικό που διαχέει την ακτινοβολία, ανάλογο με αυτό που χρησιμοποιείται στα πλακίδια διάχυσης, έτσι ώστε οι δέσμες των φωτονίων να προσπίπτουν κάθετα. Το νέφος των φωτονίων οδηγείται στη διάταξη ανάλυσης και καταγραφής, όπως συμβαίνει και με τη μέτρηση της ολικής ακτινοβολίας. Ο σφαιρικός συλλέκτης συλλέγει την ακτινοβολία ανεξάρτητα της διεύθυνσης από την οποία προέρχεται, δηλαδή διάχυτη από τον ουράνιο θόλο, απευθείας από τον Ήλιο, διάχυτη από το τμήμα της ατμόσφαιρας που βρίσκεται κάτω από το συλλέκτη και ανακλώμενη στο έδαφος. Ο ημισφαιρικός συλλέκτης συλλέγει την ακτινοβολία που προέρχεται είτε από το άνω ημισφαίριο (διάχυτη και άμεση ηλιακή) είτε από το κάτω ημισφαίριο κάτω από το συλλέκτη, ανάλογα με τον τρόπο που είναι τοποθετημένος.

#### **7.2.1.1 Σφάλματα λόγω γωνιακής απόκρισης**

Η γωνιακή απόκριση είναι χαρακτηριστικό όλων των οργάνων μέτρησης της ολικής ή της διάχυτης ακτινοβολίας, τα οποία χρησιμοποιούν ως συλλέκτη πλακίδια διάχυσης, και αναφέρεται αποκλειστικά στις μετρήσεις της πυκνότητας ροής.

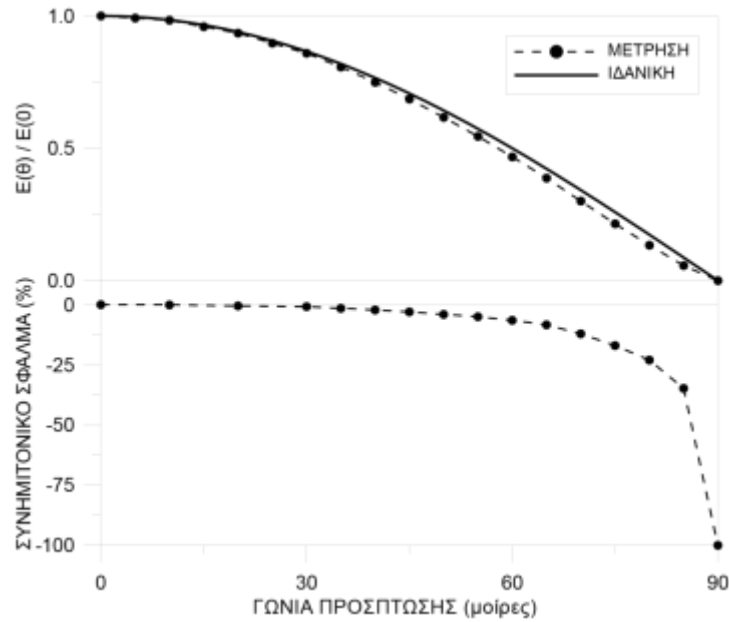
Ας θεωρήσουμε μία παράλληλη δέσμη ακτινοβολίας με ροή  $E(0)$  ανά μονάδα επιφάνειας κάθετης προς τη διεύθυνση διάδοσης της. Η πυκνότητα ροής της ακτινοβολίας  $E(\theta)$  που εναποθέτει η δέσμη στο οριζόντιο επίπεδο όταν προσπίπτει σε αυτό υπό γωνία  $\theta$  (βλέπε και Σχήμα 7.3), δίδεται από τη σχέση:

$$E(\theta) = E(0) \cos \theta \quad (7-12)$$

Αυτό συμβαίνει διότι η ίδια ροή κατανέμεται σε μεγαλύτερη επιφάνεια (εκτός της περίπτωσης όπου  $\theta = 0^\circ$ ). Θα ήταν, λοιπόν, αναμενόμενο ότι και η μέτρηση ενός οργάνου, όταν μία δέσμη ακτινοβολίας προσπίπτει στο επίπεδο αναφοράς του (π.χ. πλακίδιο διάχυσης) υπό διάφορες γωνίες,  $\theta$ , θα είναι, σε κάθε περίπτωση, ανάλογη του συνημίτονου της γωνίας  $\theta$ .

Στην πραγματικότητα, όμως, όλοι οι συλλέκτες αποκλίνουν από την ιδανική συμπεριφορά (βλέπε Σχήμα 7.4, επάνω πλαίσιο). Η πιο συνήθης αιτία είναι η ανάκλαση μέρους της προσπίπτουσας ακτινοβολίας από το πλακίδιο διάχυσης. Οι ανακλάσεις αυτές γίνονται πιο σημαντικές όσο η γωνία πρόσπτωσης της δέσμης πλησιάζει τις  $90^\circ$ . Έτσι, η μετρούμενη πυκνότητα ροής της ακτινοβολίας είναι συνήθως κατά τι μικρότερη από το γινόμενο  $E(0) \cos\theta$ . Ονομάζουμε, λοιπόν, *γωνιακή απόκριση* ενός οργάνου  $f_b(\theta)$  τον λόγο:

$$f_b(\theta) = \frac{E(\theta)}{E(0) \cos \theta} \quad (7-13)$$



**Σχήμα 7.4** Επάνω: Σύγκριση της πραγματικής γωνιακής απόκρισης ενός οργάνου μέτρησης της ακτινοβολίας (σύμβολα) με την ιδανική απόκριση (έντονη γραμμή). Κάτω: Το αντίστοιχο σφάλμα γωνιακής απόκρισης.

Το σφάλμα που εισάγεται στις μετρήσεις ονομάζεται **σφάλμα γωνιακής απόκρισης** (angular response error) ή **συνημιτονικό σφάλμα** (cosine error),  $f_c(\theta)$  και στις περισσότερες περιπτώσεις έχει σαν αποτέλεσμα την υποεκτίμηση των μετρήσεων του οργάνου.

$$f_c(\theta) = \left[ \frac{E(\theta)}{E(0) \cos \theta} - 1 \right] * 100 \quad (7-14)$$

Ο προσδιορισμός της γωνιακής απόκρισης ενός οργάνου μπορεί να γίνει στο εργαστήριο με την εκτέλεση μετρήσεων πυκνότητας ροής  $E(\theta)$  όταν μία δέσμη ακτινοβολίας προσπίπτει στο πλακίδιο διάχυσης υπό διάφορες γωνίες πρόσπτωσης  $\theta$ . Είναι προφανές ότι, κατά τη διάρκεια αυτών των μετρήσεων, η απόσταση μεταξύ της πηγής και του οργάνου θα πρέπει να είναι η ίδια, όπως σταθερή θα πρέπει να παραμένει και η ένταση της δέσμης. Η γωνιακή απόκριση  $f_b(\theta)$  θα δίδεται από τη σχέση (7-13).

Από τις (7-12) και (7-13) προκύπτει ότι για ένα ιδανικό όργανο  $f_b(\theta) \equiv 1$ . Ένα τυπικό παράδειγμα σφάλματος γωνιακής απόκρισης παρουσιάζεται στο Σχήμα 7.4 (κάτω πλαίσιο). Ανάλογα με τις προδιαγραφές των διαφόρων οργάνων, αλλά και των ατμοσφαιρικών συνθηκών, τα σφάλματα στις μετρήσεις της ακτινοβολίας μπορεί να φθάσουν και το 20%. Είναι απαραίτητο να διευκρινιστεί εδώ ότι, ενώ το συνημιτονικό σφάλμα ενός οργάνου μπορεί είναι πολύ μεγάλο για τις μεγάλες γωνίες πρόσπτωσης, το προκαλούμενο σφάλμα στις μετρήσεις της ροής είναι γενικά πολύ μικρότερο. Αυτό συμβαίνει διότι η μετρούμενη πυκνότητα ροής είναι το σύνολο της ισχύος που εναποθέτει η ακτινοβολία (ένταση) προερχόμενη από διάφορες διευθύνσεις (άρα και γωνίες πρόσπτωσης), όπως προκύπτει και από τον ορισμό της (7-4). Για τις δέσμες των φωτονίων που προέρχονται από σημεία κοντά στο ζενίθ του ουρανού (μικρές τιμές της  $\theta$ ), το συνημιτονικό σφάλμα είναι αμελητέο και η συνεισφορά τους στην μετρούμενη ροή μεγάλη [λόγω του μεγάλου

$\cos \theta$  στη σχέση (7-12)]. Αντίθετα, οι δέσμες που προέρχονται από σημεία κοντά στον ορίζοντα (μεγάλες τιμές της  $\theta$ ) υπόκεινται σε μεγαλύτερο σφάλμα, αλλά η συνεισφορά τους στην μετρούμενη ροή είναι μικρή (λόγω του μικρού  $\cos \theta$ ).

Τέλος, είναι ευνόητο ότι σφάλματα λόγω γωνιακής απόκρισης δεν ισχύουν για όργανα μέτρησης της άμεσης ακτινοβολίας, εφόσον το επίπεδο αναφοράς των μετρήσεων είναι πάντα κάθετο προς τη διεύθυνση διάδοσης της δέσμης και οι δέσμες των φωτονίων προσπίπτουν όλες σχεδόν κάθετα στην επιφάνεια αναφοράς (άρα  $\cos \theta = 1$ ).

Η αντιμετώπιση του σφάλματος γωνιακής απόκρισης μπορεί να γίνει είτε με τη χρήση διορθωτικών παραγόντων είτε με την αντικατάσταση του συλλέκτη με άλλον καλύτερων προδιαγραφών. Πράγματι, με κατάλληλη κατεργασία της επιφάνειας των πλακιδίων διάχυσης (αντι-ανακλαστική κατεργασία με παράλληλη διαμόρφωση των αιχμών του πλακιδίου, ώστε στις μεγάλες γωνίες να δέχεται και φωτόνια από τις παράπλευρες επιφάνειες), σε συνδυασμό με κατάλληλες ρυθμίσεις του οπτικού συστήματος της μονάδας εισόδου, έχουν επιτευχθεί αξιοσημείωτες βελτιώσεις στη γωνιακή απόκριση των διαφόρων οργάνων, με μείωση των σφαλμάτων σε 1-2%. Σε ό,τι αφορά στον προσδιορισμό διορθωτικών παραγόντων, έχουν αναπτυχθεί ήδη διάφορες μέθοδοι οι οποίες απαιτούν την συνύπαρξη βοηθητικών μετρήσεων που οδηγούν σε σημαντική μείωση των σφαλμάτων αυτού του τύπου.

## 7.2.2 Διάταξη φασματικής απόκρισης

Από τον συλλέκτη, τα φωτόνια κατευθύνονται στην επόμενη διάταξη, η οποία καθορίζει τα φασματικά χαρακτηριστικά της ακτινοβολίας, δηλαδή το φασματικό εύρος απόκρισης του οργάνου και, σε κάποια όργανα, την φασματική ανάλυση και διακριτική ικανότητα των μετρήσεων. Στην απλούστερη περίπτωση, η ακτινοβολία διέρχεται χωρίς καμία μεταβολή (όταν απαιτείται η μέτρηση της συνολικής ισχύος που μεταφέρει), ενώ στην πιο περίπλοκη περίπτωση, το φως αναλύεται στα μήκη κύματος (ή συχνότητες) που το απαρτίζουν, οπότε έχουμε τη μέτρηση του φάσματος της ακτινοβολίας.

Η ανάγκη μέτρησης διαφόρων φασματικών περιοχών της ακτινοβολίας υπαγορεύεται από το γεγονός ότι οι διάφορες περιοχές του φάσματος παρουσιάζουν διαφορετική συμπεριφορά μεταξύ τους και χρησιμοποιούνται σε διαφορετικές εφαρμογές. Για παράδειγμα, η υπέρυθη περιοχή παρουσιάζει ενδιαφέρον γιατί είναι ακτινοβολία που εκπέμπεται από τη γη και την ατμόσφαιρα και παίζει ρόλο στη διατήρηση της θερμικής ισορροπίας του πλανήτη, ενώ η υπεριώδης περιοχή σχετίζεται με φωτοχημικές διεργασίες στην ατμόσφαιρα και με επιδράσεις των ακτινοβολιών αυτών στα έμβια όντα και το οικοσύστημα γενικότερα.

Η επιλογή του φασματικού εύρους της ακτινοβολίας γίνεται είτε με τη χρήση φίλτρων (όταν το επιθυμητό εύρος είναι σχετικά μεγάλο) είτε με *μονοχρωμάτορες* (όταν απαιτείται υψηλή ανάλυση του φωτός). Ανάλογα με το εύρος της φασματικής περιοχής λειτουργίας, τα όργανα μέτρησης της ακτινοβολίας διακρίνονται σε:

- ευρείας φασματικής περιοχής (broad-band), με εύρος απόκρισης μεγαλύτερο από περίπου 20 nm
- στενής φασματικής περιοχής (narrow-band), με εύρος απόκρισης μικρότερο από περίπου 10 nm

- φασματοφωτόμετρα (spectroradiometers) που μπορούν να ανιχνεύουν διαδοχικά σχεδόν μονοχρωματικές ακτινοβολίες (εύρος απόκρισης μικρότερο από 2 nm), καλύπτοντας ένα σχετικά ευρύ τμήμα του φάσματος.

Οι δύο πρώτες κατηγορίες οργάνων αναφέρονται και σαν **ακτινόμετρα**, ώστε να διακρίνονται σαφώς από τα φασματοφωτόμετρα.

Ονομάζεται **απόλυτη φασματική απόκριση** ενός οργάνου, η ευαισθησία ανίχνευσης της ακτινοβολίας για κάθε μήκος κύματος σε ολόκληρη τη φασματική περιοχή λειτουργίας του. Ορίζεται ως ο λόγος του σήματος που παράγεται προς την ένταση ή τη ροή της ακτινοβολίας που προσπίπτει, για κάθε μήκος κύματος. Πρόκειται, συνεπώς, για μια συνάρτηση του μήκους κύματος η οποία είναι χαρακτηριστική για κάθε όργανο. Στον καθορισμό της φασματικής απόκρισης συμμετέχουν όλα τα μέρη του οργάνου τα οποία προκαλούν εξασθένηση της εισερχόμενης ακτινοβολίας και, μάλιστα, εξαρτώμενης από το μήκος κύματος (π.χ., ο συλλέκτης, διάφορα φίλτρα, φακοί, κάτοπτρα, αλλά και η διάταξη ανίχνευσης). Όσο μεγαλύτερη είναι η φασματική απόκριση, τόσο πιο ευαίσθητο είναι το όργανο. Είναι εμφανές ότι ένα ποσοστό της προσπίπτουσας ακτινοβολίας «χάνεται» κατά τη διαδικασία της μέτρησης και δε φθάνει ποτέ στη διάταξη ανίχνευσης. Εφόσον το ποσοστό αυτό διατηρείται σταθερό και ανεξάρτητο από τις συνθήκες λειτουργίας του οργάνου, ο παράγοντας αυτός περιλαμβάνεται στη συνάρτηση βαθμονόμησης του οργάνου (βλ. 7.3.3) και δεν αποτελεί ιδιαίτερο πρόβλημα. Η μέτρηση, δηλαδή, της ακτινοβολίας είναι σχετική. Επειδή η απόλυτη φασματική απόκριση είναι δύσκολο να προσδιοριστεί, στην πράξη, χρησιμοποιείται συνήθως η **σχετική φασματική απόκριση**, η οποία προκύπτει από την απόλυτη με κανονικοποίηση στο μήκος κύματος που παρουσιάζεται η μέγιστη απόκριση (μέγιστη ευαισθησία). Στο Σχήμα 7.11 παρουσιάζεται μια τυπική σχετική φασματική απόκριση για ένα ακτινόμετρο μέτρησης της υπεριώδους ακτινοβολίας A (UV-A).

### 7.2.3 Διατάξεις ανίχνευσης και καταγραφής

Η διερχόμενη από τη διάταξη φασματικής απόκρισης ακτινοβολία προσπίπτει στον ανιχνευτή, ο οποίος ανιχνεύει τα φωτόνια ή την ισχύ που μεταφέρουν. Η μέτρηση είναι διαθέσιμη υπό τη μορφή κάποιου ηλεκτρικού σήματος (π.χ. τάση, ρεύμα) ή ηλεκτρονικού σήματος (π.χ. παλμοί), το οποίο οδηγείται στη μονάδα καταγραφής, η οποία αποτελεί το σύνδεσμο του οργάνου με τον χρήστη. Για τη μέτρηση της ακτινοβολίας, έχουν χρησιμοποιηθεί κατά καιρούς διάφορες διατάξεις, με πλέον γνωστές σήμερα: τους *φωτοπολλαπλασιαστές*, τις *φωτοδιόδους* και τις *θερμοστήλες*. Στα φασματοφωτόμετρα χρησιμοποιούνται, συνήθως, φωτοπολλαπλασιαστές ή *συστοιχίες φωτοδιόδων*. Οι τρόποι ανίχνευσης της ακτινοβολίας στηρίζονται σε βασικές ιδιότητές της, οι σημαντικότερες των οποίων είναι:

- η θέρμανση των υλικών στα οποία προσπίπτει (θερμικές διατάξεις)
- η ηλεκτρομαγνητική της υπόσταση (ανίχνευση φωτονίων, φωτοανιχνευτές).

#### 7.2.3.1 Θερμικές Διατάξεις

Οι διατάξεις της κατηγορίας αυτής στηρίζονται στο γεγονός ότι η θέρμανση που προκαλείται σε κάποιο υλικό είναι ανάλογη της έντασης της προσπίπτουσας ακτινοβολίας. Επειδή η θερμοκρασία του υλικού εξαρτάται επιπλέον και από τη θερμοκρασία του περιβάλλοντος ατμοσφαιρικού αέρα, οι διατάξεις αυτές εκμεταλλεύονται συνήθως τη διαφορά θερμοκρασίας μεταξύ δύο όμοιων υλικών, όταν ένα από αυτά εκτίθεται στην υπό

μέτρηση ακτινοβολία. Διαφορά θερμοκρασίας εξ αιτίας διαφορετικής απορρόφησης ακτινοβολίας μπορεί να προκύψει και μεταξύ δύο όμοιων κατά τα άλλα υλικών, εκ των οποίων, το ένα απορροφά ισχυρά την ακτινοβολία (π.χ. είναι βαμμένο με μαύρο χρώμα), ενώ το άλλο την ανακλά (π.χ. είναι βαμμένο με λευκό χρώμα).

Η αρχή λειτουργίας των **θερμικών διατάξεων** είναι ουσιαστικά η ίδια, ανεξάρτητα από το πώς επιτυγχάνεται η διαφορά θερμοκρασίας. Γενικά, διαφορετική απορρόφηση ακτινοβολίας μπορεί προκύψει μεταξύ:

- μίας λευκής και μίας μαύρης επιφάνειας που εκτίθενται στο ίδιο πεδίο ακτινοβολίας,
- δύο ιδίων απορροφητικών επιφανειών, η μία εκ των οποίων εκτίθεται στην ακτινοβολία, ενώ η άλλη μόνο στον περιβάλλοντα ατμοσφαιρικό αέρα,
- μίας μαύρης επιφάνειας που εκτίθεται στην ακτινοβολία και του σώματος του οργάνου το οποίο είναι προστατευμένο από την ακτινοβολία.

Οι μεταβολές της θερμοκρασίας που προκαλούνται από την εναπόθεση ακτινοβολίας σε μία επιφάνεια μπορούν να μετρηθούν με μία **θερμοστήλη**, η οποία παράγει ανάλογη ηλεκτρική τάση.

Για παράδειγμα, ας θεωρήσουμε ένα μαύρο πλακίδιο το οποίο εκτίθεται στην ακτινοβολία. Όταν επιτευχθεί ισορροπία ακτινοβολίας, η ισχύς που δέχεται η επάνω επιφάνεια  $t$  θα ισούται με την ισχύ που εκπέμπει:

$$\alpha Q_t = \varepsilon \sigma T_t^4 + h(T_t - T_a) + (T_t - T_b) \lambda / l \quad (7-15)$$

όπου  $Q_t$  η ροή θερμότητας που εναποτίθεται από την ακτινοβολία στο πλακίδιο,  $\alpha$ ,  $\varepsilon$  και  $\lambda$  οι συντελεστές απορρόφησης, θερμικής εκπομπής, και θερμικής αγωγιμότητας του υλικού,  $l$  το πάχος του πλακιδίου,  $\sigma$  η σταθερά Stefan-Boltzmann,  $h$  ο συντελεστής θερμικών απωλειών μέσω του αέρα,  $T_a$  η θερμοκρασία του αέρα και  $T_t$ ,  $T_b$  οι θερμοκρασίες αντίστοιχα της επάνω και της κάτω επιφάνειας του πλακιδίου. Ομοίως, για την κάτω επιφάνεια θα ισχύει:

$$\alpha Q_b = \varepsilon \sigma T_b^4 + h(T_b - T_a) + (T_b - T_t) \lambda / l \quad (7-16)$$

Τελικά, η «καθαρή» θερμική ισχύς στο πλακίδιο  $Q^*$  προκύπτει με αφαίρεση των παραπάνω σχέσεων:

$$Q^* = \alpha(Q_t - Q_b) = \varepsilon \sigma (T_t^4 - T_b^4) + h(T_t - T_b) - 2(T_t - T_b) \lambda / l \quad (7-17)$$

Η συνεισφορά του δεύτερου όρου του δεξιού κλάδου της (7-17), που αναφέρεται θερμικές απώλειες μέσω του ατμοσφαιρικού αέρα, ελαχιστοποιείται τοποθετώντας το πλακίδιο κάτω από ένα γυάλινο ή πλαστικό θόλο (ανάλογα με την φασματική περιοχή λειτουργίας του οργάνου).

Η ροή θερμότητας δια μέσου του πλακιδίου  $G = (T_t - T_b) \lambda / l$ , μπορεί να μετρηθεί με τη βοήθεια μιας θερμοστήλης. Έτσι, εμφανίζεται μία τάση, ανάλογη της διαφοράς θερμοκρασίας,  $D = C(T_t - T_b)$ , όπου  $C$  είναι η σταθερά της αναλογίας. Προσεγγίζοντας τον όρο  $(T_t^4 - T_b^4)$  με τον όρο  $4T_t^3(T_t - T_b)$ , έχουμε τελικά:

$$Q^* = (4\epsilon\sigma T_i^3 + 2\lambda/l)(T_i - T_b) \quad (7-18)$$

ή

$$Q^* = (4\epsilon\sigma T_i^3 + 2\lambda/l)(D/C) = gD \quad (7-19)$$

όπου  $g$  είναι η σταθερά βαθμονόμησης που εξαρτάται από τη θερμοκρασία, τους συντελεστές εκπομπής και θερμικής αγωγιμότητας και το πάχος του πλακιδίου. Τέλος, επειδή ο όρος  $4\epsilon\sigma T_i^3$  είναι πολύ μικρός σε σχέση με τον  $(2\lambda/l)$ , μπορεί να παραλειφθεί.

Με παρόμοιο τρόπο λειτουργούν όλες οι διατάξεις που εκμεταλλεύονται τη διαφορά θερμοκρασίας που αναπτύσσεται μεταξύ δύο ή περισσότερων επιφανειών, έτσι ώστε, τελικά, η διαφορετική απορρόφηση της προσπίπτουσας ακτινοβολίας να μετατρέπεται εύκολα σε ροή ακτινοβολίας. Επειδή η φασματική απόκριση των θερμικών διατάξεων είναι σταθερή και ανεξάρτητη του μήκους κύματος (Σχήμα 7.5), αυτές χρησιμοποιούνται κυρίως σε όργανα μέτρησης της προσπίπτουσας ακτινοβολίας σε όλο το ηλιακό φάσμα. Η επιφάνεια που εκτίθεται (συνήθως ένας μεταλλικός δίσκος χρώματος μαύρου), απορροφά την ακτινοβολία και παράγει θερμότητα η οποία ρέει μέσω μιας θερμικής αντίστασης προς το σώμα του οργάνου. Η διαφορά θερμοκρασίας στα άκρα της αντίστασης μετατρέπεται σε τάση.

### 7.2.3.2 Φωτοανιχνευτές

Σε αυτή την κατηγορία ανιχνευτών, η μέτρηση της ακτινοβολίας στηρίζεται σε ηλεκτρικά φαινόμενα που εμφανίζονται σε υλικά ή διατάξεις όταν προσβληθούν από διακριτά φωτόνια. Μέρος μόνο των φωτονίων αυτών προκαλεί το «γεγονός» που μπορεί να ανιχνευθεί, ενώ τα υπόλοιπα καταναλώνονται ως θερμότητα. Το πλεονέκτημα των διατάξεων αυτών είναι ότι παρουσιάζουν γρήγορη απόκριση και πολύ μεγάλη ευαισθησία σε σύγκριση με τις θερμικές διατάξεις.

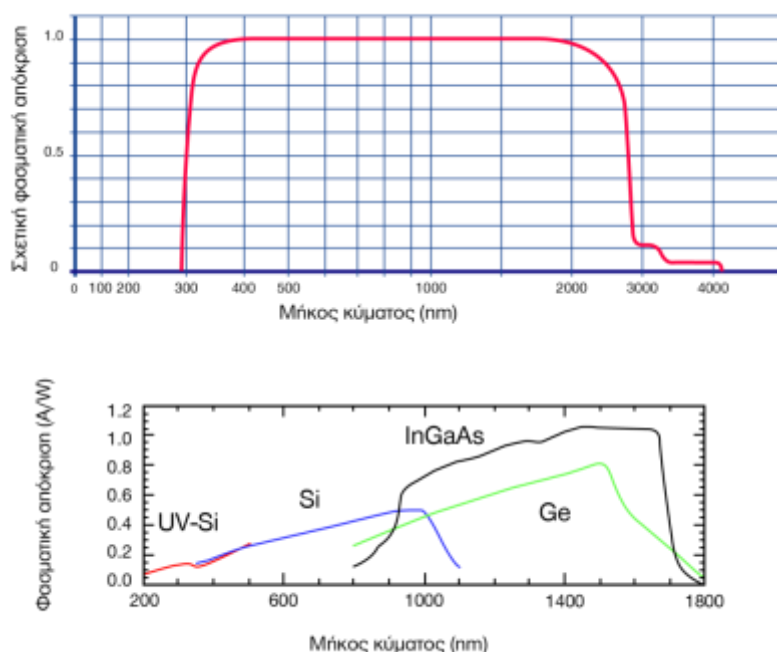
Οι **φωτοβολταϊκοί** ανιχνευτές είναι οι απλούστερες διατάξεις και παρουσιάζουν το πλεονέκτημα ότι παράγουν μετρήσιμη τάση όταν εκτεθούν στην ακτινοβολία, η οποία είναι ανάλογη της προσπίπτουσας ακτινοβολίας. Πλέον διαδεδομένο είναι το στοιχείο σεληνίου, όμως, σε εφαρμογές με περισσότερες απαιτήσεις ακρίβειας, σταθερότητας και ευαισθησίας, χρησιμοποιούνται στοιχεία γερμανίου και πυριτίου. Τα φωτοβολταϊκά στοιχεία έχουν αρκετά ευρεία φασματική απόκριση που περιλαμβάνει, τόσο το υπεριώδες, όσο και το ορατό και κοντινό υπέρυθρο τμήμα του φάσματος. Χρησιμοποιούνται συνήθως για φωτοβολταϊκή παραγωγή ενέργειας, αλλά και σε όργανα μέτρησης της ολικής ηλιακής ακτινοβολίας.

Οι **φωτοαγωγάμοι** ανιχνευτές, όπως δηλώνει και η ονομασία τους, κατασκευάζονται από υλικά που μεταβάλλουν την αγωγιμότητά τους ανάλογα με την προσπίπτουσα ακτινοβολία. Συνήθως, βρίσκουν εφαρμογή σε μετρήσεις της υπέρυθρης ακτινοβολίας. Βασικό μειονέκτημά τους είναι το γεγονός ότι απαιτείται συμπληρωματική διάταξη ψύξης, ώστε να αποφεύγεται η σημαντική επίδραση της θερμοκρασίας στην απόδοσή τους. Η φασματική τους απόκριση είναι ικανοποιητική κυρίως στην περιοχή του υπέρυθρου.

Οι **φωτοδίοδοι** είναι ημιαγωγικές διατάξεις οι οποίες μετατρέπουν την προσπίπτουσα ακτινοβολία σε ηλεκτρικό ρεύμα. Παράγουν ρεύμα πολύ μικρής έντασης (της τάξης των  $\mu\text{A}$ ), η οποία είναι ανάλογη της ισχύος της προσπίπτουσας ακτινοβολίας. Αυτό το σήμα,



αφού ενισχυθεί, οδηγείται στον υπολογιστή για καταγραφή, μέσω μιας μονάδας μετατροπής του σε ψηφιακό σήμα. Οι φωτοδιόδοι έχουν μεταβαλλόμενη με το μήκος κύματος φασματική απόκριση σε συγκεκριμένες φασματικές περιοχές, ανάλογα με το υλικό κατασκευής τους (Σχήμα 7.5). Χρησιμοποιούνται, συνήθως, σε ακτινόμετρα με απόκριση εύρους μερικών δεκάδων nm (π.χ. UV-A, UV-B, ορατό). Η χρήση φωτοδίοδων στα φασματοφωτόμετρα είναι πολύ περιορισμένη, κυρίως λόγω του μικρού δυναμικού εύρους απόκρισης. Ιδιαίτερα για τα φασματοφωτόμετρα που λειτουργούν στην περιοχή του υπεριώδους, απαιτείται η δυνατότητα ανίχνευσης ακτινοβολιών με αρκετές (4-6) τάξεις μεγέθους διαφορά. Σε αυτήν την περίπτωση, οι φωτοπολλαπλασιαστές αποτελούν τη μοναδική λύση.



**Σχήμα 7.5** Τυπικές καμπύλες φασματικής απόκρισης θερμοστήλης (άνω) και διαφόρων τύπων φωτοδίοδων (κάτω) που χρησιμοποιούνται σε ακτινόμετρα.

Στους φωτοπολλαπλασιαστές, τα φωτόνια που προσπίπτουν στην κάθοδο αποσπών ηλεκτρόνια (φωτοηλεκτρικό φαινόμενο) τα οποία επιταχύνονται από ένα ηλεκτρικό πεδίο και οδηγούνται σε διαδοχικούς στόχους από τους οποίους αποσπών πολύ περισσότερα ηλεκτρόνια. Έτσι πολλαπλασιάζεται ο αριθμός των ηλεκτρονίων που παράγονται στην κάθοδο, ενισχύοντας με αυτόν τον τρόπο το σήμα που αντιστοιχεί στη μέτρηση. Ο πολλαπλασιασμός των ηλεκτρονίων μπορεί να συνεχίζεται σε αρκετά στάδια, έτσι ώστε τελικά να έχουμε ενίσχυση της τάξης του  $10^6$ . Τα ηλεκτρόνια παράγουν ηλεκτρικούς παλμούς οι οποίοι, είτε καταμετρούνται από μία ηλεκτρονική μονάδα απαρίθμησης είτε ανιχνεύονται υπό τη μορφή ηλεκτρικού ρεύματος (η ένταση του οποίου είναι ανάλογη της συχνότητας των παλμών). Και στις δύο περιπτώσεις, η συχνότητα εμφάνισης και το μέγεθος των παλμών είναι ανάλογα της προσπίπτουσας ακτινοβολίας. Στη συνέχεια, το σήμα μετατρέπεται σε ψηφιακό σήμα για αναγνωριστεί από μια διάταξη καταγραφής (π.χ. από ένα υπολογιστή).

Επειδή η εκπομπή φωτο-ηλεκτρονίων εξαρτάται από την ενέργεια των φωτονίων (άρα και από το μήκος κύματος), η φασματική απόκριση των φωτοπολλαπλασιαστών είναι συνάρτηση του υλικού κατασκευής τους. Κατά τον Einstein, ένα φωτόνιο για να απο-

σπάσει ένα ηλεκτρόνιο, πρέπει να ικανοποιείται η συνθήκη  $h\nu \geq e\phi$ , όπου  $h$  η σταθερά του Planck,  $\nu$  είναι η συχνότητα του φωτονίου,  $e$  το στοιχειώδες φορτίο του ηλεκτρονίου και  $\phi$  η συνάρτηση έργου του υλικού. Συνεπώς, τα υλικά κατασκευής των φωτοπολλαπλασιαστών επιλέγονται έτσι ώστε να παρουσιάζουν μικρή συνάρτηση έργου. Τέτοια υλικά είναι αυτά που περιλαμβάνονται στον περιοδικό πίνακα των στοιχείων μεταξύ του λιθίου και του καισίου. Παρόλα αυτά, όμως, το  $\phi$  είναι αρκετά σημαντικό, ώστε να μην επιτρέπει τη χρήση των φωτοπολλαπλασιαστών σε περιοχές με μήκη κύματος μεγαλύτερα του 1  $\mu\text{m}$  (δηλαδή στο υπέρυθρο).

Μία σημαντική παράμετρος στη χρήση των ανιχνευτών είναι ο προσδιορισμός του **σήματος σκότους**, δηλαδή του ρεύματος, της τάσης ή των παλμών που παράγονται, όταν ο ανιχνευτής δεν δέχεται ακτινοβολία. Το σήμα αυτό είναι αποτέλεσμα θερμικής εκπομπής ηλεκτρονίων και πρέπει να αφαιρείται από τη μέτρηση. Είναι επιθυμητό το σήμα αυτό να είναι όσο το δυνατόν μικρότερο, ώστε να ελαχιστοποιείται η εισαγόμενη αβεβαιότητα στη μέτρηση. Η διατήρηση των ανιχνευτών σε χαμηλές θερμοκρασίες κατά τη διάρκεια λειτουργίας τους είναι μία καλή μέθοδος ελάττωσης του σήματος σκότους. Όταν οι φωτοδιόδοι και οι φωτοπολλαπλασιαστές εκτίθενται σε ισχυρή ακτινοβολία (υπερέκθεση), τότε εμφανίζονται μεγάλες τιμές του σήματος σκότους, δημιουργώντας σοβαρά προβλήματα στη λειτουργία τους και την απόδοσή τους.

Το πρόβλημα του σήματος σκότους είναι λιγότερο σημαντικό στην περίπτωση των φωτοπολλαπλασιαστών, όταν αυτοί λειτουργούν ως απεριθμητές, επειδή υπάρχει η δυνατότητα απομόνωσης των παλμών με μέγεθος μικρότερο από μία τιμή, εφόσον οι θερμικά παραγόμενοι παλμοί έχουν πολύ μικρότερο μέγεθος. Κατά τη διάρκεια της λειτουργίας τους, κάποια όργανα έχουν τη δυνατότητα εκτέλεσης μετρήσεων του σήματος σκότους, εμποδίζοντας προσωρινά την εισερχόμενη ακτινοβολία. Διαφορετικά, το σήμα σκότους μπορεί να εκτιμηθεί από τις μετρήσεις που καταγράφονται κατά τη διάρκεια της νύχτας.

Όσον αφορά δε στις διατάξεις καταγραφής, σήμερα χρησιμοποιούνται σχεδόν αποκλειστικά ηλεκτρονικές διατάξεις μετατροπής αναλογικού σε ψηφιακό σήμα και ηλεκτρονικοί υπολογιστές ή data loggers με κατάλληλο λογισμικό που αναλαμβάνουν προβολή των μετρήσεων σε μορφή αξιοποιήσιμη από τους χρήστες.

#### 7.2.4 Βαθμονόμηση

Η **απόλυτη βαθμονόμηση** (absolute calibration) των οργάνων μέτρησης της ακτινοβολίας αποτελεί μία από τις πιο σημαντικές διαδικασίες στη λειτουργία τους, επειδή καθορίζει την ακρίβεια και γενικότερα την ποιότητα των μετρήσεων. Μέσω της διαδικασίας βαθμονόμησης, μετατρέπεται το ηλεκτρικό (ή ηλεκτρονικό) σήμα που παράγει το όργανο σε μονάδες μέτρησης της ακτινοβολίας. Επειδή οι πιο συνηθισμένες μετρήσεις ακτινοβολίας για τις ατμοσφαιρικές επιστήμες είναι αυτές της ολικής ή της διάχυτης ακτινοβολίας, δηλαδή της πυκνότητας ροής σε οριζόντιο επίπεδο, οι μέθοδοι βαθμονόμησης που αναπτύχθηκαν αναφέρονται κυρίως σε αυτό το ακτινομετρικό μέγεθος. Οι διαδικασίες βαθμονόμησης των οργάνων για τη μέτρηση της άμεσης ακτινοβολίας ή της έντασης είναι αρκετά περίπλοκες, και αποφεύγεται η λεπτομερής τους περιγραφή στα πλαίσια του παρόντος συγγράμματος.

Η διαδικασία βαθμονόμησης μπορεί να επιτευχθεί:

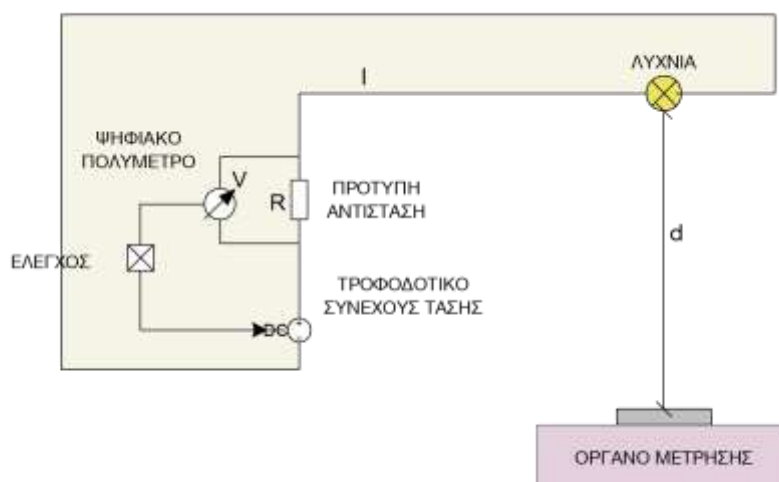
- α) μέσω της σύγκρισης των μετρήσεων του οργάνου στην ατμόσφαιρα με τη μέτρηση της ακτινοβολίας που εκπέμπεται από μία πηγή γνωστής εκπομπής. Οι πηγές αυτές ονομάζονται **πρότυπες λυχνίες βαθμονόμησης**.

β) μέσω συγκριτικών μετρήσεων του υπό βαθμονόμηση οργάνου με ένα άλλο πρότυπο όργανο όταν και τα δύο εκτίθενται στο ίδιο πεδίο ακτινοβολίας (π.χ., ήλιος, λυχνία).

Η επιλογή της καταλληλότερης διαδικασίας εξαρτάται από τον τύπο του οργάνου, αλλά και από τη διαθεσιμότητα της κατάλληλης υποδομής. Η πρώτη μέθοδος εφαρμόζεται συνήθως στα φασματοφωτόμετρα όπου απαιτείται και μεγαλύτερη ακρίβεια, ενώ η δεύτερη στα ακτινόμετρα. Παρακάτω συζητούνται λεπτομερώς οι πρότυπες λυχνίες και η διαδικασία χρήσης τους, ενώ η εφαρμογή των δύο τρόπων βαθμονόμησης για την πυκνότητα ροής της ακτινοβολίας αναπτύσσεται ξεχωριστά για τα φασματοφωτόμετρα και τα ακτινόμετρα στις αντίστοιχες ενότητες.

### Πρότυπες λυχνίες

Οι πρότυπες λυχνίες εκπέμπουν ακτινοβολία είτε σε ολόκληρο το φάσμα (λευκό φως) είτε, σπανιότερα, σε συγκεκριμένες περιοχές του φάσματος. Η εκπεμπόμενη ακτινοβολία σε διάφορα μήκη κύματος και σε μία συγκεκριμένη απόσταση είναι γνωστή από μετρήσεις που πραγματοποιούνται σε εξειδικευμένα εργαστήρια, και περιέχονται στο πιστοποιητικό βαθμονόμησης της κάθε λυχνίας. Το πιστοποιητικό βαθμονόμησης περιλαμβάνει τον αριθμό αναγνώρισης της λυχνίας, το ρεύμα λειτουργίας της (επειδή η εκπεμπόμενη ακτινοβολία από μία λυχνία είναι ανάλογη της έντασης του ρεύματος που τη διαρρέει), την απόσταση στην οποία αναφέρονται οι τιμές της φασματικής πυκνότητας ροής της ακτινοβολίας και ένα πίνακα που περιέχει τις τιμές της πυκνότητας ροής σε επιλεγμένα μήκη κύματος.



**Σχήμα 7.6** Τυπική διάταξη για την απόλυτη βαθμονόμηση ενός οργάνου μέτρησης της πυκνότητας ροής της ακτινοβολίας.

Από τα πλέον γνωστά και αξιόπιστα εργαστήρια είναι τα: National Institute of Standards and technology (NIST) στις ΗΠΑ, National Physical Laboratory (NPL) στην Αγγλία και Physikalisch-Technische Bundesanstalt (PTB) στη Γερμανία. Οι λυχνίες βαθμονομούνται συνήθως σε σύγκριση με την ακτινοβολία που εκπέμπει ένα μέλαν σώμα γνωστής θερμοκρασίας, ακολουθώντας πολύπλοκες διαδικασίες ώστε να επιτευχθούν ακρίβειες που πλησιάζουν το 0.5%. Οι υπό βαθμονόμηση λυχνίες εξετάζονται προσεκτικά ως προς την σταθερότητά τους παρακολουθώντας συστηματικά τα χαρακτηριστικά τους για περίπου 70-100 ώρες συνεχούς λειτουργίας. Μόνο ένα μικρό ποσοστό από τις δοκιμα-

ζόμενες λυχνίες πληρούν τις προϋποθέσεις για να χαρακτηριστούν σαν πρότυπες και να προχωρήσει η διαδικασία βαθμονόμησης τους. Από την στιγμή της βαθμονόμησης τους οι λυχνίες αυτές πιστοποιούνται για ένα περιορισμένο αριθμό ωρών λειτουργίας (συνήθως 50-70 ώρες). Μετά την πάροδο αυτού του χρονικού διαστήματος απαιτείται επανάληψη της βαθμονόμησης ή αντικατάσταση. Οι επίμονες διαδικασίες μεταφοράς της απόλυτης βαθμονόμησης από το μέλαν σώμα στη λυχνία έχουν ως αποτέλεσμα την αύξηση του κόστους το οποίο μπορεί να ανέλθει σε μερικές χιλιάδες Ευρώ.

Η μεταφορά της βαθμονόμησης της λυχνίας στο όργανο μέτρησης γίνεται με την εκτέλεση μετρήσεων υπό συνθήκες ανάλογες με αυτές στις οποίες έγινε η βαθμονόμηση της λυχνίας από το πρότυπο εργαστήριο. Το υπό βαθμολόγηση όργανο τοποθετείται έτσι ώστε το επίπεδο αναφοράς (π.χ. το πλακίδιο διάχυσης) να είναι κάθετο στον άξονα που συνδέει το κέντρο του με το κέντρο του νήματος της λυχνίας και σε απόσταση όση ορίζει το πιστοποιητικό της λυχνίας. Η λυχνία τίθεται σε λειτουργία με κατάλληλη διάταξη ώστε να διαρρέεται καθ' όλη τη διάρκεια των μετρήσεων από σταθερό ρεύμα ίσο με αυτό που ορίζει το πιστοποιητικό της. Επειδή η θερμοκρασία της λυχνίας αυξάνεται κατά τη διάρκεια της λειτουργίας της, με αποτέλεσμα να αλλάζει η αντίσταση του νήματος, είναι απαραίτητη η ύπαρξη ενός συστήματος αυτόματης αναπροσαρμογής της τάσης τροφοδοσίας της λυχνίας ώστε το ρεύμα να διατηρείται σταθερό. Αν η λυχνία δεν βρίσκεται σε πολύ περιορισμένο χώρο σταδιακά αποκαθίσταται ισορροπία στη θερμοκρασία της. Προκειμένου να εξασφαλιστεί ικανοποιητική ακρίβεια στη μέτρηση του ρεύματος που διαρρέει τη λυχνία χωρίς να παρεμβληθεί στο κύκλωμα η εσωτερική αντίσταση άλλου οργάνου μέτρησης (π.χ. ενός αμπερομέτρου), χρησιμοποιείται για τη μέτρηση του ένας έμμεσος τρόπος, σύμφωνα με το σχήμα 7.6. Η πρότυπη αντίσταση είναι πολύ μικρή, της τάξης του  $0.1 \Omega$  και έχει βαθμονομηθεί με ακρίβεια τουλάχιστον 6 δεκαδικών. Με το ψηφιακό πολύμετρο μετράται συνεχώς η τάση στα άκρα της αντίστασης. Για παράδειγμα, για μία λυχνία 1000 W που λειτουργεί υπό τάση 125 V και ρεύμα 8 A η τάση στα άκρα της αντίστασης θα πρέπει να είναι 0.8 V. Κάθε απόκλιση από αυτή την τιμή ανιχνεύεται από το ηλεκτρονικό σύστημα ελέγχου το οποίο αυξομειώνει αντίστοιχα την τάση τροφοδοσίας ώστε να διατηρείται το ρεύμα σταθερό.

Για να εξασφαλιστεί μία αξιόπιστη βαθμονόμηση πρέπει να τηρούνται κάποιιοι κανόνες, ώστε να ελαχιστοποιούνται τα σφάλματα, τα οποία ούτως ή άλλως υπεισέρχονται στη διαδικασία αυτή. Αυτοί κατά σειρά σημαντικότητας μπορούν να συνοψιστούν στα εξής:

- σταθεροποίηση του ρεύματος και τάσης λειτουργίας της λυχνίας καλύτερο από 0.1%. Ας σημειωθεί ότι μεταβολή κατά 0.1% στο ρεύμα που διαρρέει τη λυχνία προκαλεί σφάλμα 1% στην εκπεμπόμενη ακτινοβολία που εκτέμπεται από τη λυχνία σε μήκη κύματος του υπεριώδους.
- ακρίβεια στην απόσταση οργάνου πηγής καλύτερη από 1 mm. Σφάλμα 1 mm στην απόσταση των 50 cm, αντιστοιχεί σε αβεβαιότητα 0.5% στην εκπεμπόμενη ακτινοβολία.
- εξάλειψη κάθε άλλης πηγής φωτός. Διενέργεια των μετρήσεων βαθμονόμησης σε σκοτεινό θάλαμο.
- ακριβής τοποθέτηση της πηγής στον άξονα που είναι κάθετος στο επίπεδο αναφοράς του οργάνου (απόκλιση μικρότερη των  $2^\circ$ )
- διατήρηση σταθερής θερμοκρασίας χωρίς ισχυρά ρεύματα αέρος
- κάλυψη με μαύρο ύφασμα ή απομάκρυνση των αντικειμένων που ανακλούν το φως μέσα στο σκοτεινό θάλαμο

- καταγραφή και παρακολούθηση των ωρών λειτουργίας της λυχνίας.

Η τήρηση των δύο πρώτων κανόνων είναι εξαιρετικά σημαντική διότι η μεν ένταση της λυχνίας είναι ευθέως ανάλογη του ρεύματος που τη διαρρέει, η δε ροή της ακτινοβολίας σε κάποια απόσταση από τη λυχνία μεταβάλλεται αντιστρόφως ανάλογα του τετραγώνου της απόστασης. Αν δε ληφθεί υπόψη και η μεταβολή της αντίστασης της λυχνίας με την αύξηση της θερμοκρασίας, θα πρέπει το σύστημα τροφοδοσίας να ελέγχει αυτόματα το ρεύμα και να το διατηρεί σταθερό ανεξάρτητα από τις μεταβολές της θερμοκρασίας.

Λόγω του μεγάλου κόστους των προτύπων λυχνιών, συνήθως χρησιμοποιούνται για τις βαθμονομήσεις των οργάνων δευτερεύουσες πηγές ακτινοβολίας οι οποίες κατά διαστήματα (π.χ. κάθε έξι μήνες) συγκρίνονται με την πρότυπη πηγή χρησιμοποιώντας ένα φασματοφωτόμετρο. Έτσι ελαττώνεται ο χρόνος χρήσης της πρότυπης πηγής, προσθέτοντας βέβαια ένα μικρό σφάλμα λόγω της μεσολάβησης ενός επιπλέον σταδίου βαθμολόγησης της δευτερεύουσας λυχνίας.

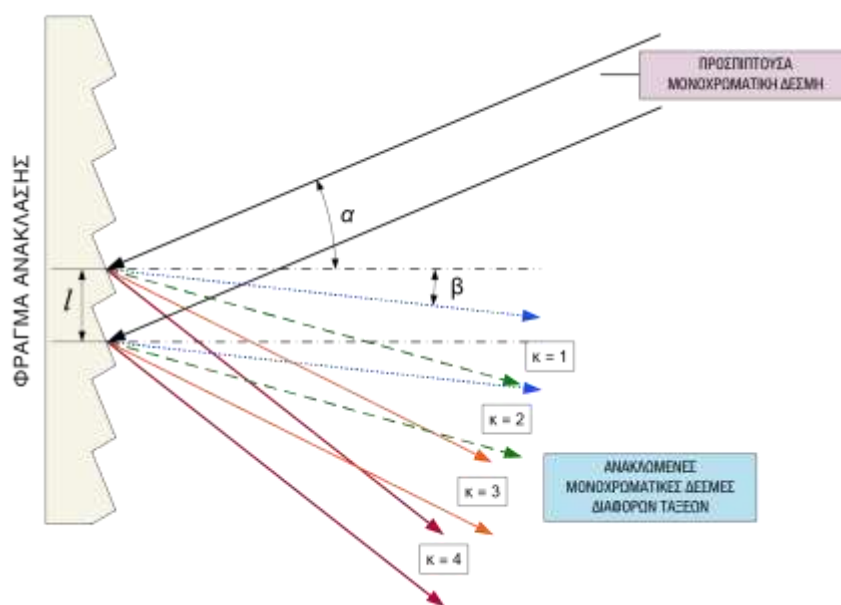
### 7.3 Φασματοφωτόμετρα

Τα φασματοφωτόμετρα είναι μία ειδική κατηγορία οργάνων τα οποία χρησιμοποιούνται για τη μέτρηση του φάσματος της ακτινοβολίας. Αρχικά χρησιμοποιήθηκαν συνήθως σε εφαρμογές μέσα στο εργαστήριο, σταδιακά όμως επεκτάθηκε η χρήση τους σε ατμοσφαιρικές μετρήσεις ακτινοβολίας, όπου βρήκαν ποικίλες και πολύ σημαντικές εφαρμογές. Σήμερα φασματοφωτόμετρα χρησιμοποιούνται για μετρήσεις του φάσματος της ηλιακής ή της ατμοσφαιρικής ακτινοβολίας από το έδαφος, αλλά και από αεροσκάφη, αερόστατα ή δορυφόρους. Τα φασματοφωτόμετρα, σε αντίθεση με τα ακτινόμετρα, προσφέρουν τη δυνατότητα λεπτομερών μετρήσεων της ακτινοβολίας σε ένα πλήθος μικρών κύματος που περιέχονται σε μία συγκεκριμένη φασματική περιοχή. Ουσιαστικά, εκτελούν διαδοχικές μετρήσεις της ακτινοβολίας που περιέχεται σε πολύ στενές φασματικές περιοχές, τόσο στενές, ώστε να αναφερόμαστε σε μετρήσεις σχεδόν μονοχρωματικών ακτινοβολιών. Οι λεπτομερείς μετρήσεις είναι απαραίτητες για τη μελέτη των επιδράσεων των διαφόρων ακτινοβολιών στα έμβια όντα, τα φυτά και τα διάφορα υλικά, για τον υπολογισμό την συγκέντρωσης διαφόρων συστατικών της ατμόσφαιρας, αλλά και για πλήθος άλλων εφαρμογών, όπως για την πιστοποίηση της ακρίβειας υπολογισμών από μοντέλα διάδοσης της ακτινοβολίας και για τη μελέτη φωτοχημικών διεργασιών στην ατμόσφαιρα. Επειδή τα φασματοφωτόμετρα δεν αποτελούν όργανα που αναφέρονται αποκλειστικά σε εφαρμογές της ατμοσφαιρικής τεχνολογίας, θα αναφέρουμε μόνο τις βασικές αρχές λειτουργίας τους και θα επικεντρωθούμε σε κάποια ιδιαίτερα χαρακτηριστικά τα οποία είναι σημαντικά για τις ατμοσφαιρικές μετρήσεις.

Τα φασματοφωτόμετρα είναι οπτικές διατάξεις με τις οποίες η συλλεγόμενη ακτινοβολία αναλύεται στα μήκη κύματος (ή συχνότητες) που την αποτελούν και, στη συνέχεια, γίνεται επιλεκτική μέτρηση των διαφόρων μικρών κύματος. Στην πράξη, μετράται ο αριθμός των φωτονίων ανά μονάδα χρόνου που περιέχονται σε ένα φασματικό εύρος Δλ. Η μέτρηση αυτή μπορεί να αντιστοιχιστεί σε ένα από τα ακτινομετρικά μεγέθη που αναφέρθηκαν στην §7.1, ανάλογα με την γεωμετρία της ακτινοβολίας που προσπίπτει (βλ. §7.2.1).

Όπως όλα τα όργανα μέτρησης της ακτινοβολίας, ένα φασματοφωτόμετρο μπορεί να θεωρηθεί ότι αποτελείται από τρία κύρια μέρη: το τμήμα εισόδου του φωτός (συλλέκτης της ακτινοβολίας), τη διάταξη ανάλυσης του φωτός (η οποία ονομάζεται και **μονοχρωμάτορας**) και τη διάταξη ανίχνευσης και καταγραφής της ακτινοβολίας.

Σε ένα μονοχρωμάτορα, για την ανάλυση της προσπίπτουσας ακτινοβολίας μπορεί να χρησιμοποιηθεί είτε ένα πρίσμα είτε ένα φράγμα ανάκλασης. Και στις δύο περιπτώσεις, στην έξοδο της μονάδας ανάλυσης έχουμε εμφάνιση του φάσματος του εισερχόμενου φωτός, λόγω του ότι τα διάφορα μήκη κύματος εκτρέπονται κατά διαφορετικές γωνίες. Αν στο φάσμα αυτό παρεμβληθεί ένα διάφραγμα στο οποίο είναι χαραγμένη μία σχισμή, τότε από τη σχισμή διέρχονται φωτόνια που αντιστοιχούν σε ένα συγκεκριμένο μήκος κύματος, ανάλογα με τη θέση της κατά μήκος του φάσματος. Στην πραγματικότητα, από τη σχισμή διέρχονται φωτόνια με μήκη κύματος που περιέχονται σε μια στενή φασματική περιοχή  $\Delta\lambda$ , το εύρος της οποίας καθορίζεται από το πάχος της σχισμής και τη γεωμετρία του μονοχρωμάτορα. Επίσης, διέρχονται σε μικρότερο ποσοστό φωτόνια από γειτονικά μήκη κύματος λόγω περίθλασης (βλ. §7.3.2.3).



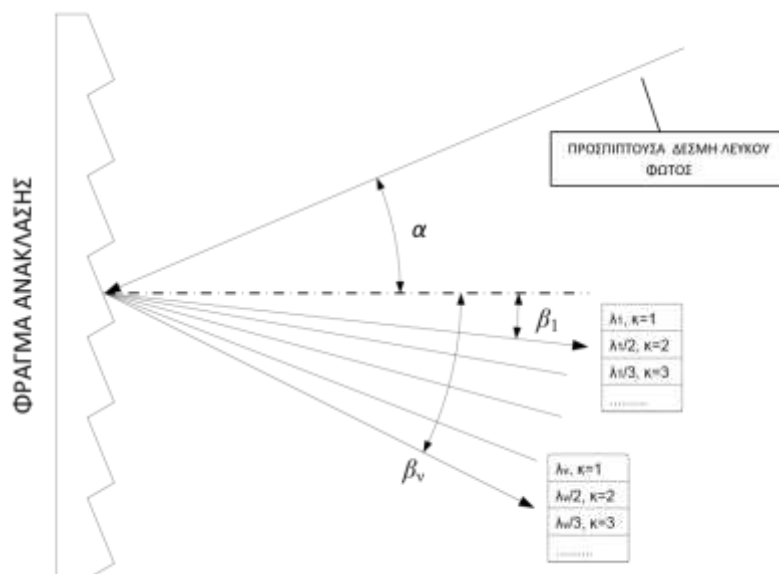
**Σχήμα 7.7** Σχηματική παράσταση της πορείας μιας μονοχρωματικής δέσμης παράλληλων ακτίνων μετά την πρόσπτωσή της σε ένα φράγμα ανάκλασης.

Στα σύγχρονα φασματοφωτόμετρα χρησιμοποιούνται κατά προτίμηση φράγματα ανάκλασης. Αυτά είναι επίπεδες ή κοίλες λείες επιφάνειες οι οποίες έχουν επικαλυφθεί με ανακλαστικό επίχρισμα (συνήθως από αλουμίνιο), πάνω στο οποίο έχουν χαραχθεί, σε σταθερές αποστάσεις, παράλληλες γραμμές. Τυπικό σχεδιάγραμμα της λειτουργίας ενός φράγματος ανάκλασης φαίνεται στο Σχήμα 7.7. Στο ίδιο σχήμα έχουν χαραχθεί, επίσης, οι πορείες των δεσμών της ακτινοβολίας όπως αυτές περιγράφονται παρακάτω:

Έστω μία δέσμη ακτινοβολίας η οποία προσπίπτει με γωνία  $\alpha$  στην επιφάνεια του φράγματος, και  $l$  ο αριθμός των γραμμών του φράγματος ανά μονάδα μήκους (τυπικές τιμές του  $l$  κυμαίνονται μεταξύ 300 και 6000 γραμμές ανά χιλιοστό του μέτρου). Τότε, για κάθε μήκος κύματος  $\lambda$ , η ακτινοβολία αυτού του μήκους κύματος εκτρέπεται υπό γωνία  $\beta$ , η οποία υπολογίζεται από τη σχέση:

$$\sin \alpha + \sin \beta = \kappa \lambda \quad (7-20)$$

όπου  $\kappa$  είναι ένας ακέραιος αριθμός (θετικός ή αρνητικός) που δηλώνει την τάξη της ανάκλασης.



**Σχήμα 7.8** Ανάλυση μιας δέσμης λευκού φωτός μετά την πρόσπτωσή της σε ένα φράγμα ανάκλασης για διάφορα μήκη κύματος και τάξεις ανάκλασης.

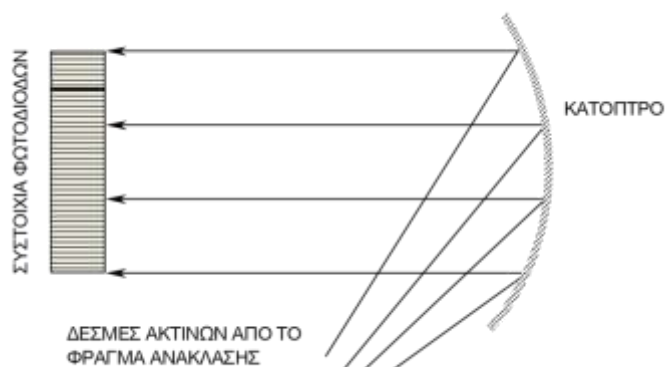
Επειδή το  $\kappa$  παίρνει διάφορες τιμές, από την (7-20) προκύπτει ότι για κάθε  $\lambda$  θα μπορούν να υπολογιστούν διάφορες γωνίες εκτροπής. Όταν το  $\kappa = 0$  (μηδενική τάξη), τότε δεν έχουμε ανάλυση του φωτός και όλα τα μήκη κύματος εκτρέπονται κατά την ίδια γωνία  $\beta$ . Για κάθε άλλη τιμή του  $\kappa$  προκύπτει και ένα διαφορετικό φάσμα.

Από την (7-20) προκύπτει, επίσης, ότι για το ίδιο  $\beta$  υπάρχουν διάφορα μήκη κύματος που εκτρέπονται κατά την ίδια γωνία, προερχόμενα από διαφορετικές τάξεις ανάκλασης. Αυτά τα μήκη κύματος απέχουν πολύ μεταξύ τους (Σχήμα 7.8).

Για παράδειγμα, αν σε μία γωνία  $\beta$  παίρνουμε ένα μήκος κύματος  $\lambda = 600 \text{ nm}$  (ορατό) από την πρώτη τάξη ανάκλασης ( $\kappa = 1$ ), τότε η δεύτερη τάξη ( $\kappa = 2$ ) θα δώσει στην ίδια γωνία  $\beta$  το μήκος κύματος  $\lambda/2 = 300 \text{ nm}$  (υπεριώδες). Έτσι, όταν ενδιαφερόμαστε να μετρήσουμε ένα συγκεκριμένο μήκος κύματος, μπορούμε εύκολα με τη χρήση κατάλληλων φίλτρων να απορρίψουμε όλα τα άλλα μήκη κύματος τα οποία θα δημιουργούσαν προβλήματα στη μέτρηση. Βέβαια, η χρήση φίλτρων εισάγει άλλα προβλήματα (συνήθως, εξασθένιση του σήματος και θερμική εξάρτηση) και γι' αυτό απαιτείται προσεκτική μελέτη πριν επιλεγεί για την εφαρμογή που ενδιαφερόμαστε ο τύπος του φράγματος και η τάξη στην οποία θα λειτουργεί.

Όπως αναφέραμε προηγουμένως, παρεμβάλλοντας μία σχισμή στο φάσμα που προκύπτει από το φράγμα, μπορούμε να επιλέξουμε το μήκος κύματος που μας ενδιαφέρει να μετρηθεί. Αν η σχισμή αυτή μετακινηθεί κατά μήκος του φάσματος, τότε κάποιο άλλο μήκος κύματος διέρχεται από αυτή και είναι δυνατόν να μετρηθεί. Όμως, επειδή η παράλληλη μετατόπιση της σχισμής είναι δύσκολο να επιτευχθεί με ακρίβεια, συνήθως, η επιλογή του μετρούμενου μήκους κύματος γίνεται με περιστροφή του φράγματος περί έναν κάθετο άξονα που περνάει από το κέντρο του και συμπίπτει με το επίπεδο που καθορίζει η επιφάνειά του. Με την περιστροφή, μεταβάλλονται τόσο η γωνία  $\alpha$  όσο και η γωνία  $\beta$ , με αποτέλεσμα να μεταβάλλεται και το μήκος κύματος που διέρχεται από τη σχισμή. Εκτός από το μήκος κύματος που ενδιαφέρει, από τη σχισμή διέρχονται και γειτονικά μήκη κύματος, αφενός μεν λόγω του πάχους της, αφετέρου λόγω φαινομένων περίθλασης.

Γενικά, όσο λεπτότερη είναι η σχισμή, τόσο περισσότερο μονοχρωματική είναι η ακτινοβολία που διέρχεται. Παρουσιάζεται, όμως, το μειονέκτημα της εξασθένησης του σήματος που μετρά το όργανο, λόγω της ελάττωσης της έντασης της διερχόμενης ακτινοβολίας.



**Σχήμα 7.9** Σχηματική διάταξη λειτουργίας συστοιχίας φωτοдиодων σε ένα φασματοφωτόμετρο.

Η μέτρηση τώρα της διερχόμενης ακτινοβολίας γίνεται με τη βοήθεια των φωτοπολλαπλασιαστών. Ο φωτοπολλαπλασιαστής τοποθετείται πίσω από τη σχισμή εξόδου και ανιχνεύει όλα τα φωτόνια που περνούν από τη σχισμή. Μια κατηγορία ανιχνευτών που βρίσκει εφαρμογή τα τελευταία χρόνια στα φασματοφωτόμετρα είναι οι **συστοιχίες φωτοдиодων** (diode arrays). Αποτελούνται από ένα μεγάλο αριθμό φωτοдиодων διατεταγμένων σε σειρά (Σχήμα 7.9), οι οποίες παράγουν ξεχωριστά σήματα. Αν η συστοιχία αυτή τοποθετηθεί στην έξοδο ενός μονοχρωμάτορα, κατά μήκος του αναπτυγμένου φάσματος της ακτινοβολίας, τότε κάθε δίοδος ανιχνεύει και ένα διαφορετικό μήκος κύματος. Έτσι, παρέχεται η δυνατότητα ταυτόχρονης μέτρησης πολλών μηκών κύματος, χωρίς να είναι απαραίτητη η ύπαρξη της σχισμής εξόδου, η περιστροφή του φράγματος ή η κίνηση κάποιου άλλου τμήματος του φασματοφωτομέτρου. Το πλεονέκτημα των διατάξεων αυτών είναι ότι η μέτρηση του φάσματος γίνεται ταυτόχρονα για όλα τα μήκη κύματος, ενώ στα κλασικά φασματοφωτόμετρα σάρωσης του φάσματος, η μέτρηση διαρκεί για αρκετά λεπτά, με αποτέλεσμα τα διάφορα μήκη κύματος να μην μετρώνται ταυτόχρονα.

### 7.3.1 Προσδιορισμός της φασματικής κλίμακας

Μια σημαντική παράμετρος στη λειτουργία ενός φασματοφωτομέτρου είναι ο ακριβής προσδιορισμός του μήκους κύματος της ακτινοβολίας που πρόκειται να μετρηθεί, δηλαδή της **φασματικής κλίμακας** του οργάνου. Όπως αναφέρθηκε προηγουμένως, το μήκος κύματος επιλέγεται μέσω της περιστροφής του φράγματος ανάκλασης. Θεωρητικά, από τη γεωμετρία του φασματοφωτομέτρου και τις σχέσεις λειτουργίας των φραγμάτων ανάκλασης είναι δυνατόν να υπολογιστεί η γωνία περιστροφής που αντιστοιχεί σε κάθε μήκος κύματος. Όμως, είναι δύσκολο να εκτιμηθούν τα διάφορα σφάλματα που υπεισέρχονται, τόσο στα χαρακτηριστικά των διαφόρων οπτικών τμημάτων, όσο και στη γεωμετρία γενικότερα. Έτσι, για τον ακριβή προσδιορισμό της σχέσης μεταξύ της γωνίας περιστροφής και του μήκους κύματος που αντιστοιχεί σε κάθε θέση του φράγματος, ακολουθείται η παρακάτω διαδικασία:



Με το φασματοφωτόμετρο εκτελούνται μετρήσεις της ακτινοβολίας που εκπέμπουν μία ή περισσότερες *φασματικές λυχνίες*<sup>1</sup> (π.χ. υδραργύρου, καδμίου, νέον) επιλεγμένων έτσι ώστε οι γραμμές εκπομπής τους να καλύπτουν όλο το φασματικό εύρος του οργάνου. Έτσι προκύπτει μία σειρά μετρήσεων της έντασης των διαφόρων γραμμών εκπομπής για διάφορες γωνίες περιστροφής του φράγματος. Με τη χρήση πινάκων που αναφέρουν το μήκος κύματος των διαφόρων γραμμών εκπομπής των λυχνιών αυτών, αντιστοιχίζεται το φάσμα που μετρήθηκε με το πραγματικό φάσμα των λυχνιών. Έτσι προκύπτει η αντιστοιχία μήκους κύματος  $\lambda$  και γωνίας περιστροφής του φράγματος  $\varphi(\lambda)$ . Η σχέση αυτή είναι μία σχετικά ομαλή συνάρτηση του μήκους κύματος, έτσι ώστε να είναι δυνατή η αναπαραγωγή της με κάποιο στατιστικό μοντέλο (fit). Κατά την κανονική λειτουργία του φασματοφωτομέτρου, από τη σχέση αυτή υπολογίζεται η γωνία με την οποία πρέπει να περιστραφεί το φράγμα, ώστε να αντιστοιχεί η κάθε μέτρηση στο επιθυμητό μήκος κύματος.

### 7.3.2 Σφάλματα στη λειτουργία των φασματοφωτομέτρων

Όπως όλες οι οπτικές διατάξεις, έτσι και τα διάφορα τμήματα που απαρτίζουν ένα φασματοφωτόμετρο παρουσιάζουν σφάλματα, με άμεση επίπτωση την ελάττωση της ακρίβειας και της αξιοπιστίας των μετρήσεων. Στα επόμενα περιγράφονται συνοπτικά μερικά από τα πλέον σημαντικά σφάλματα.

#### 7.3.2.1 Σκεδαζόμενο φως

Το πρόβλημα του σκεδαζόμενου φωτός (stray η scattered light) εμφανίζεται όταν από τη σχισμή εξόδου του φασματοφωτομέτρου διέρχονται και προσπίπτουν στον ανιχνευτή φωτόνια με μήκη κύματος διαφορετικά του μήκους κύματος στο οποίο, σε μια δεδομένη στιγμή, ο μονοχρωμάτορας είναι ρυθμισμένος να οδηγήσει προς τη σχισμή εξόδου. Τα φωτόνια αυτά προέρχονται συνήθως από σκέδαση της ακτινοβολίας -κατά τη διαδρομή της από την σχισμή εισόδου, μέχρι την σχισμή εξόδου- σε διάφορα τμήματα του μονοχρωμάτορα (οπτικά ή μηχανικά), όπως, επίσης, και σε σωματίδια που πιθανόν να αιωρούνται μέσα στο χώρο του μονοχρωμάτορα. Επίσης, λόγω ατελειών στην κατασκευή του φράγματος ή των κατόπτρων, κάποια φωτόνια εκτρέπονται με γωνίες διαφορετικές από αυτές που αναμένονται από τη θεωρία [βλέπε σχέση (7-20)]. Τέλος, στο πρόβλημα του σκεδαζόμενου φωτός συνεισφέρουν, επίσης, φωτόνια που προέρχονται από τάξεις ανάκλασης διαφορετικές από αυτήν που χρησιμοποιείται, και οι οποίες δεν απομονώθηκαν αποτελεσματικά από τα χρησιμοποιούμενα φίλτρα. Το πρόβλημα γίνεται πολύ σημαντικό, όταν το φασματοφωτόμετρο λειτουργεί σε φασματικές περιοχές με μεγάλο δυναμικό εύρος<sup>2</sup>, όπως π.χ. η υπεριώδης περιοχή.

#### **Παράδειγμα:**

Έστω ότι στον μονοχρωμάτορα εισέρχεται ηλιακή ακτινοβολία για ανάλυση και μέτρηση. Σε μια συγκεκριμένη στιγμή, ο μονοχρωμάτορας έχει ρυθμιστεί έτσι ώστε να οδηγεί στη σχισμή εξόδου ένα μήκος κύματος (π.χ. 300 nm) στο οποίο η ακτινοβολία είναι γε-

<sup>1</sup> Οι φασματικές λυχνίες είναι ειδικές λυχνίες οι οποίες εκπέμπουν έντονη ακτινοβολία σε συγκεκριμένα μήκη κύματος, τα οποία καθορίζονται από το αέριο (ή τους ατμούς κάποιου στοιχείου) που περιέχουν. Τα άτομα του αερίου διεγείρονται ηλεκτρικά και, κατά την αποδιέγερση, εκπέμπουν ακτινοβολία, το μήκος κύματος της οποίας καθορίζεται από τις επιτρεπτές ενεργειακές στάθμες των ηλεκτρονίων του.

<sup>2</sup> Δυναμικό εύρος ονομάζεται το εύρος διακύμανσης της έντασης της ακτινοβολίας σε όλα τα μήκη κύματος που ανήκουν σε μία δεδομένη φασματική περιοχή.

νικά ασθενική. Το ηλιακό φως, όμως, περιέχει και μήκη κύματος με μεγαλύτερη ένταση (π.χ. 340 nm με περίπου 1000 φορές μεγαλύτερη ένταση). Αν ένα ελάχιστο ποσοστό φωτονίων από αυτό το μήκος κύματος (π.χ. 1 στα 10000) σκεδαστούν και καταλήξουν στη σχισμή εξόδου, τότε η ένταση της ακτινοβολίας που μετράται θα είναι κατά 5% μεγαλύτερη από την πραγματική. Αν παρόμοια συνεισφορά έχουμε και από άλλα μήκη κύματος (εκτός των 340 nm που θεωρήσαμε), τότε το σφάλμα γίνεται τεράστιο.

Σε μερικά όργανα, το πρόβλημα του σκεδαζόμενου φωτός είναι τόσο σημαντικό, ώστε οι μετρήσεις του σε περιοχές με ασθενική ακτινοβολία να είναι σχεδόν άχρηστες. Παρόλο που το πρόβλημα αυτό αντιμετωπίζεται μερικώς με την εισαγωγή διαφραγμάτων, ώστε να αποκόπτονται όσα φωτόνια παρεκκλίνουν της αναμενόμενης πορείας τους ή με την χρήση καλύτερης ποιότητας οπτικών τμημάτων, η πλέον ενδεδειγμένη μέθοδος για την ελαχιστοποίηση του φαινομένου είναι η χρήση φασματοφωτομέτρων με διπλό μονοχρωμάτορα.

Οι **διπλοί μονοχρωμάτορες** αποτελούνται από δύο απλούς μονοχρωμάτορες συζευγμένους, έτσι ώστε η σχισμή εξόδου του πρώτου να συμπίπτει με τη σχισμή εισόδου του δεύτερου. Με αυτόν τον τρόπο, ο δεύτερος μονοχρωμάτορας χρησιμοποιείται για να αναλύσει την θεωρητικά μονοχρωματική ακτινοβολία που παράγει ο πρώτος μονοχρωμάτορας. Η δεύτερη αυτή προσπάθεια ανάλυσης του φωτός απορρίπτει σχεδόν εξ ολοκλήρου τις ανεπιθύμητες ακτινοβολίες. Αυτό συμβαίνει, κυρίως, διότι μόνο ένα μικρό μέρος των σκεδαζόμενων φωτονίων έχει την κατάλληλη διεύθυνση ώστε να συλληχθεί από τον δεύτερο μονοχρωμάτορα. Επιπλέον, όμως, και όσα φωτόνια κατορθώσουν να εισέλθουν στον δεύτερο μονοχρωμάτορα, εκτρέπονται από το φράγμα ανάκλασης υπό γωνίες που δεν επιτρέπουν την πρόσπτωσή τους στη σχισμή εξόδου. Το βασικό μειονέκτημα της χρήσης διπλών μονοχρωματόρων είναι η εξασθένηση του σήματος, λόγω της προσθήκης και άλλων οπτικών τμημάτων, αλλά και λόγω του ότι η ροή της ακτινοβολίας ελαττώνεται ανάλογα με το τετράγωνο της απόστασης που διανύει και, φυσικά, η χρήση του δεύτερου μονοχρωμάτορα διπλασιάζει τη διαδρομή.

### 7.3.2.2 Θερμοκρασιακές μεταβολές

Μεταβολές της θερμοκρασίας μπορούν να οδηγήσουν σε σφάλματα από δύο κυρίως πηγές:

Πρώτον, λόγω της μεταβολής των οπτικών χαρακτηριστικών του μονοχρωμάτορα από μηχανικές στρεβλώσεις ή μετατοπίσεις οπτικών τμημάτων του. Η φασματική ανάλυση της ακτινοβολίας καθορίζεται από τη γεωμετρία του μονοχρωμάτορα, σε επίπεδο νανομέτρων (nm). Συνεπώς, ανεπαίσθητες μεταβολές της θέσης των οπτικών τμημάτων μπορούν να οδηγήσουν σε αλλαγές της ευαισθησίας του οργάνου ή του μετρούμενου μήκους κύματος. Το αποτέλεσμα είναι να μεταβάλλεται η απόλυτη βαθμολόγηση του οργάνου, με συνέπεια, οι μετρήσεις κάτω από διαφορετικές θερμοκρασίες να μην είναι πλέον συγκρίσιμες.

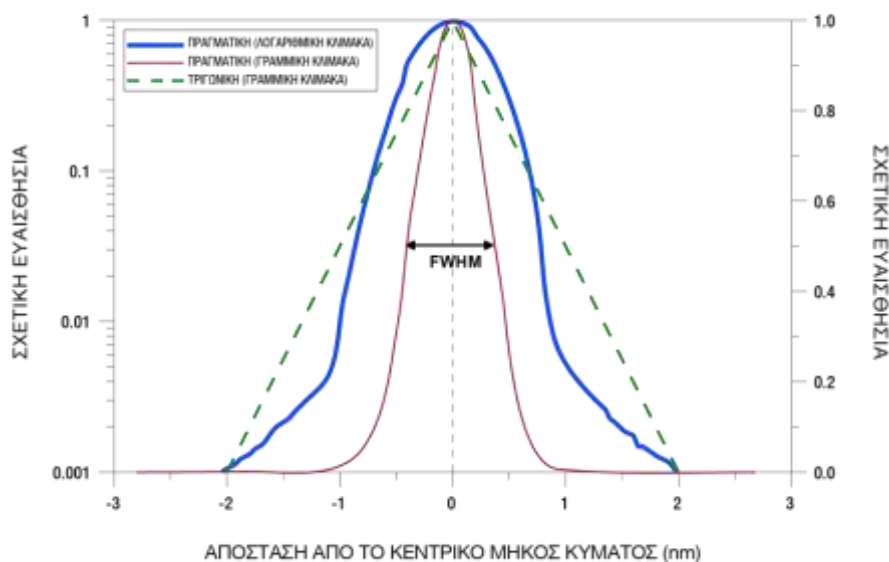
Η δεύτερη πηγή σφάλματος είναι η μεταβολή της ευαισθησίας του ανιχνευτή, αλλά και η αύξηση του θορύβου ή του σήματος σκότους.

Αντιμετώπιση των σφαλμάτων που εισάγονται από μεταβολές της θερμοκρασίας μπορεί να γίνει με την εφαρμογή στατιστικών διορθώσεων στις μετρήσεις, οι οποίες όμως αυξάνουν την αβεβαιότητα. Η πλέον αξιόπιστη μέθοδος είναι η διατήρηση σταθερής θερμοκρασίας λειτουργίας με τη συνδυασμένη χρήση ψυκτικών και θερμαντικών στοιχείων. Προφανώς, η τελευταία επιλογή αυξάνει σημαντικά το κόστος κατασκευής και συντήρησης του φασματοφωτομέτρου.

### 7.3.2.3 Διακριτική ικανότητα

Όπως αναφέρθηκε σε προηγούμενη παράγραφο, η δέσμη που εξέρχεται από την σχισμή εξόδου του μονοχρωμάτορα δεν είναι απολύτως μονοχρωματική, εφόσον, εκτός από το κεντρικό μήκος κύματος το οποίο μετράται για μία συγκεκριμένη θέση του φράγματος ανάκλασης, εξέρχονται από τη σχισμή και φωτόνια με μήκη κύματος γειτονικά στο κεντρικό. Αυτό οφείλεται στο πεπερασμένο πλάτος της σχισμής εξόδου, αλλά καθορίζεται και από τη γενικότερη γεωμετρία του μονοχρωμάτορα. Η πιθανότητα να περάσουν από τη σχισμή εξόδου γειτονικά μήκη κύματος ελαττώνεται, όσο απομακρυνόμαστε από το κεντρικό μήκος κύματος. Η πιθανότητα αυτή εκφράζεται με μία συνάρτηση του μήκους κύματος, χαρακτηριστική για το κάθε όργανο, τη **συνάρτηση σχισμής** (slit function). Μέτρο της συνάρτησης σχισμής είναι το εύρος της στο μισό της μέγιστης τιμής της, αναφερόμενο συνήθως στη βιβλιογραφία ως FWHM (Full Width at Half Maximum).

Στο σχήμα 7.10 παρουσιάζεται η συνάρτηση σχισμής ενός τυπικού φασματοφωτομέτρου σε γραμμική, αλλά και σε λογαριθμική κλίμακα, ώστε να αναδειχθεί η ιδιόμορφη συμπεριφορά της στα απομακρυσμένα από το κεντρικό μήκος κύματος. Για αναφορά, έχει σχεδιαστεί και μία ιδανική τριγωνική συνάρτηση σχισμής.



**Σχήμα 7.10** Τυπική μορφή μιας πραγματικής συνάρτησης σχισμής ενός φασματοφωτομέτρου και μιας ιδανικής τριγωνικής συνάρτησης σχισμής.

Σύμφωνα με τα παραπάνω, σε ένα μήκος κύματος  $\lambda$  η μετρούμενη ακτινοβολία  $I_{\mu}(\lambda)$  θα είναι ανάλογη της πραγματικής ακτινοβολίας  $I(\lambda)$  που προκύπτει από το μονοχρωμάτορα στο φασματικό εύρος  $\lambda_1$  έως  $\lambda_2$  (όπου η συνάρτηση σχισμής  $w(\lambda)$  έχει μη μηδενικές τιμές), βε-βαρημένη με τη συνάρτηση σχισμής. Ορίζεται δηλαδή από τη σχέση:

$$I_{\mu}(\lambda) = C \int_{\lambda_1}^{\lambda_2} I(\lambda') w(\lambda') d\lambda' \quad (7-21)$$

όπου  $C$  είναι ένας συντελεστής αναλογίας ο οποίος δίνεται από τη σχέση:

$$C = \left[ \int_{\lambda_1}^{\lambda_2} w(\lambda') d\lambda' \right]^{-1} \quad (7-22)$$

### 7.3.3 Απόλυτη βαθμονόμηση φασματοφωτομέτρων

Η απόλυτη βαθμονόμηση των φασματοφωτομέτρων αποτελεί μία από τις πιο σημαντικές διαδικασίες στη λειτουργία τους, και συνήθως απαιτεί διατάξεις συγκρίσιμες σε κόστος με αυτό της προμήθειας του ίδιου του φασματοφωτομέτρου. Η μετατροπή του σήματος σε ακτινομετρικές μονάδες γίνεται σχεδόν αποκλειστικά μέσω της σύγκρισης των μετρήσεων του οργάνου στην ατμόσφαιρα με τη μέτρηση της ακτινοβολίας που εκπέμπεται από μία πρότυπη λυχνία βαθμονόμησης.

Αν το ηλεκτρικό σήμα που παράγεται είναι  $S(\lambda)$  και η αναμενόμενη από την λυχνία πυκνότητα ροής της ακτινοβολίας είναι  $E_\lambda(\lambda)$ , ο φασματικός συντελεστής βαθμονόμησης  $C(\lambda)$  του οργάνου δίδεται από τη σχέση:

$$C(\lambda) = \frac{S(\lambda)}{E_\lambda(\lambda)} \quad (7-23)$$

και εκφράζεται σε μονάδες σήματος προς πυκνότητα ροής ακτινοβολίας (π.χ.  $V/Wm^{-2}$ ). Υπό συνθήκες κανονικών μετρήσεων του οργάνου στην ατμόσφαιρα η πραγματική τιμή της μετρούμενης ακτινοβολίας  $E_\pi(\lambda)$  σε μια δεδομένη στιγμή δίδεται από τη σχέση:

$$E_\pi(\lambda) = \frac{S(\lambda)}{C(\lambda)} \quad (7-24)$$

Κάθε μέτρηση λοιπόν του οργάνου (όταν αυτό βρίσκεται σε κανονική λειτουργία) διαιρείται με τον συντελεστή αυτό για να μετατραπεί σε απόλυτες μονάδες μέτρησης της ακτινοβολίας. Όπως φαίνεται από τα παραπάνω, η διαδικασία της βαθμονόμησης ενός οργάνου είναι μια διαδικασία συγκριτικών μετρήσεων της ροής της πρότυπης λυχνίας και της υπό μέτρηση ροής της ακτινοβολίας.

## 7.4 Ακτινόμετρα

Με τον όρο ακτινόμετρα, αναφερόμαστε σε όργανα ευρείας ή στενής φασματικής περιοχής τα οποία μετρούν συνολικά την ακτινοβολία η οποία περιλαμβάνεται σε μία καθορισμένη φασματική περιοχή (αντίστοιχα ευρεία ή στενή με τον ορισμό που δόθηκε στην §7.2). Προφανώς, δεν έχουν την δυνατότητα να ανιχνεύσουν μεταβολές του φάσματος της ακτινοβολίας στην περιοχή λειτουργίας τους αλλά ανταποκρίνονται σε μεταβολές της συνολικής ροής της ακτινοβολίας στη συγκεκριμένη περιοχή. Αν  $E(\lambda)$  είναι η φασματική πυκνότητα ροής που προσπίπτει σε ένα ακτινόμετρο και  $s(\lambda)$  είναι η φασματική του απόκριση, τότε η συνολική πυκνότητα ροής που μετράται είναι:

$$E_{oz} = \int_{\lambda_1}^{\lambda_2} E(\lambda) s(\lambda) d\lambda \quad (7-25)$$

όπου τα  $\lambda_1$  και  $\lambda_2$  ορίζουν την περιοχή της φασματικής απόκρισης του οργάνου, η την περιοχή στην οποία η συνάρτηση  $s(\lambda)$  έχει μη μηδενικές τιμές.

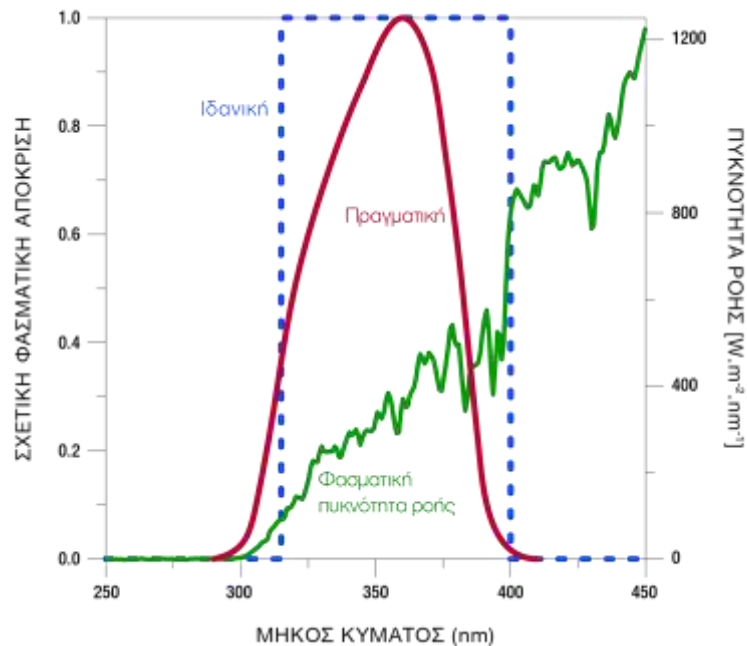
Η φασματική απόκριση των διαφόρων οργάνων καθορίζεται κατασκευαστικά, συνήθως με την χρήση φίλτρων των οποίων η μέγιστη διαπερατότητα συμπίπτει με την φασματική περιοχή που ενδιαφέρει. Επειδή είναι δύσκολο να κατασκευαστούν φίλτρα που να ανταποκρίνονται απολύτως σε συγκεκριμένη φασματική περιοχή, συνήθως χρησιμοποιείται συνδυασμός φίλτρων που απορροφούν σε αλληλεπικαλυπτόμενες φασματικές περιοχές. Το τελικό αποτέλεσμα είναι ένα σύνθετο φίλτρο που παρουσιάζει την επιθυμητή φασματική απόκριση. Παρόλο που η χρησιμοποίηση συνθέτων φίλτρων ικανοποιεί εύκολα τις απαιτήσεις για καθορισμένο φασματικό εύρος ενός ακτινόμετρου, εισάγει ένα σημαντικό μειονέκτημα, την ελάττωση της διαπερατότητας του οργάνου. Αυτό συμβαίνει διότι η διαπερατότητα του σύνθετου φίλτρου προκύπτει ως το γινόμενο της διαπερατότητας κάθε ξεχωριστού φίλτρου. Για παράδειγμα, αν η διαπερατότητα ενός φίλτρου σε κάποιο μήκος κύματος είναι 0.8 και ενός δευτέρου στο ίδιο μήκος κύματος είναι 0.7, τότε το σύνθετο φίλτρο θα έχει διαπερατότητα  $0.8 \times 0.7 = 0.56$  στο συγκεκριμένο μήκος κύματος. Αυτό το μειονέκτημα γίνεται πολύ σημαντικό όταν η περιοχή ενδιαφέροντος είναι το υπεριώδες, όπου η ένταση της ηλιακής ακτινοβολίας είναι ήδη πολύ μικρή, με αποτέλεσμα να δημιουργείται πρόβλημα ευαισθησίας των οργάνων.

Κάποια φίλτρα παρουσιάζουν το μειονέκτημα να μεταβάλλουν τις ιδιότητές τους με την πάροδο του χρόνου (σαν αποτέλεσμα της μακροχρόνιας έκθεσής τους στην ακτινοβολία) ή λόγω της μεταβολής των εξωτερικών συνθηκών (θερμοκρασία, υγρασία). Οι επιδράσεις αυτές είναι πιο έντονες όσο ελαττώνεται το φασματικό τους εύρος λειτουργίας τους. Τέτοιου είδους φίλτρα είναι πολλά «*φίλτρα συμβολής*». Αποτέλεσμα της υποβάθμισης των χαρακτηριστικών των φίλτρων είναι η ασταθής απόκριση του οργάνου με το χρόνο. Τέλος, ένα επιπλέον μειονέκτημα των φίλτρων συμβολής είναι το γεγονός ότι η φασματική τους απόκριση είναι συνάρτηση και της γωνίας πρόσπτωσης της ακτινοβολίας. Για να ελαχιστοποιηθούν αυτά τα προβλήματα τα φίλτρα συμβολής (αλλά και άλλα φίλτρα) τοποθετούνται συνήθως σε περιβάλλον με ελεγχόμενη θερμοκρασία και υγρασία, ενώ επιβάλλεται ο έλεγχος κατά διαστήματα τόσο της διαπερατότητας όσο και της φασματικής τους απόκρισης, ο οποίος γίνεται με τη χρήση ειδικών διατάξεων. Η ανάπτυξη της τεχνολογίας οδηγεί σε συνεχείς βελτιώσεις των χαρακτηριστικών των διαφόρων φίλτρων, έτσι ώστε τα προαναφερθέντα προβλήματα να γίνονται συνεχώς λιγότερο σημαντικά.

Ο προσδιορισμός της φασματικής απόκρισης απαιτεί επίπονες μετρήσεις οι οποίες γίνονται στο εργαστήριο. Στην απλούστερη περίπτωση γίνεται με τη συνδυασμένη χρήση φασματικών λυχνιών εκπομπής και φίλτρων αποκοπής, μέθοδο που οδηγεί σε αποτελέσματα μικρότερης ακρίβειας. Η πλέον ακριβής, αλλά και εξαιρετικά δαπανηρή μέθοδος, συνίσταται στη χρήση ενός μονοχρωμάτορα ο οποίος παρέχει σχεδόν μονοχρωματικές ακτινοβολίες αναλύοντας την ακτινοβολία που εκπέμπεται από μία ισχυρή πηγή λευκού φωτός (π.χ. από μία λυχνία τόξου). Η φασματική απόκριση σε κάθε μήκος κύματος καθορίζεται από το λόγο της μετρούμενης ακτινοβολίας προς την προσπίπτουσα. Αν  $E_o(\lambda)$  είναι η φασματική πυκνότητα ροής της μονοχρωματικής ακτινοβολίας μήκους κύματος  $\lambda$  που δέχεται το ακτινόμετρο και  $S(\lambda)$  το σήμα που παράγει, τότε η *σχετική φασματική απόκριση*  $s(\lambda)$  δίδεται για όλα τα μήκη κύματος από τη σχέση:

$$s(\lambda) = \frac{\frac{S(\lambda)}{E_o(\lambda)}}{\frac{S(\lambda_{\max})}{E_o(\lambda_{\max})}} \quad (7-26)$$

όπου  $\lambda_{\max}$  είναι το μήκος κύματος της μέγιστης φασματικής απόκρισης. Πρακτικά αυτό σημαίνει ότι  $s(\lambda_{\max})=1$ .



**Σχήμα 7.11** Παράδειγμα ιδανικής και πραγματικής σχετικής φασματικής απόκρισης ενός ακτινόμετρου μέτρησης της UV-A (αριστερός άξονας). Στο σχήμα έχει σχεδιαστεί επίσης και ένα τυπικό φάσμα της πυκνότητας ροής της ηλιακής ακτινοβολίας στο έδαφος (δεξιός άξονας).

Ας σημειωθεί ότι πολλά όργανα ευρείας φασματικής περιοχής έχουν τόσο μικρή ευαισθησία ώστε να μην διεγείρονται εύκολα από μονοχρωματικές ακτινοβολίες. Στην περίπτωση αυτή ακολουθούνται πιο πολύπλοκες διαδικασίες.

Στις περισσότερες περιπτώσεις απαιτείται για την ατμοσφαιρική έρευνα η μέτρηση της συνολικής ισχύος της ηλιακής ακτινοβολίας σε σχετικά ευρείες φασματικές περιοχές (π.χ. υπεριώδες Α, ορατή ακτινοβολία). Η φασματική απόκριση ενός ιδανικού οργάνου θα έπρεπε να είναι ίση με τη μονάδα στη περιοχή ενδιαφέροντος και να μηδενίζεται σε όλα τα μήκη κύματος εκτός της περιοχής αυτής. Όπως προαναφέρθηκε όμως, κατασκευαστικά είναι σχεδόν αδύνατο να επιτευχθούν αποκρίσεις που να συμπίπτουν απολύτως με τις απαιτήσεις της κάθε εφαρμογής. Στο σχήμα 7.11 παρουσιάζεται ένα παράδειγμα της ιδανικής και της πραγματικής απόκρισης ενός οργάνου μέτρησης της UV-A ακτινοβολίας. Όπως φαίνεται, η πραγματική απόκριση διαφέρει από την ιδανική. Επειδή όμως, σύμφωνα με την (7-25), η συνολική πυκνότητα ροής για την ιδανική και την πραγματική φασματική απόκριση δίδονται από το ολοκλήρωμα κάτω από κάθε καμπύλη, οι διαφορές που προκύπτουν είναι συνήθως αρκετά μικρές ώστε να μην επηρεάζουν

σημαντικά την ακρίβεια της μέτρησης, η εφαρμόζονται διορθωτικοί παράγοντες για να ελαχιστοποιηθούν οι αποκλίσεις.

#### 7.4.1 Απόλυτη βαθμονόμηση ακτινομέτρων

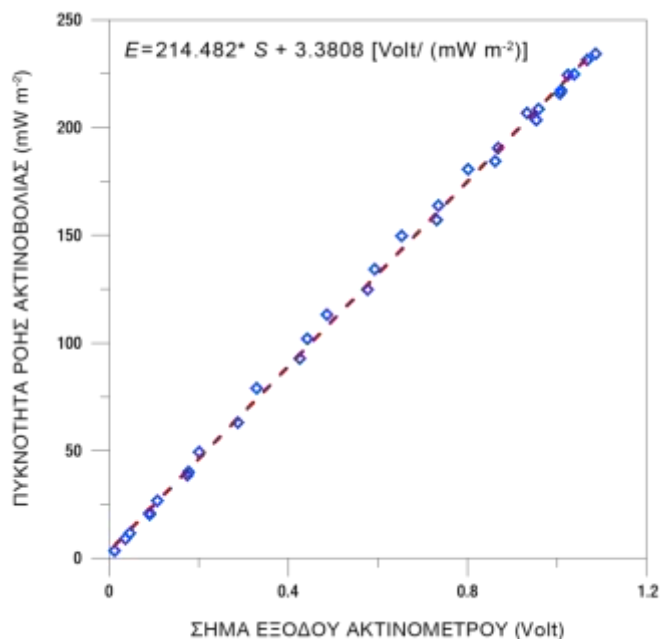
Λόγου του υψηλού κόστους ανάπτυξης και λειτουργίας ενός συστήματος βαθμονόμησης με πρότυπες λυχνίες, για τη βαθμονόμηση των ακτινομέτρων χρησιμοποιούνται συνήθως έμμεσοι τρόποι.

##### Σύγκριση με πρότυπα όργανα

Τα πρότυπα όργανα είναι όργανα του ίδιου τύπου με αυτά που χρησιμοποιούνται στις καθημερινές μετρήσεις, τα οποία όμως δεν χρησιμοποιούνται σε καθημερινή βάση αλλά φυλάσσονται προσεκτικά σε περιβάλλον με ιδανικές συνθήκες θερμοκρασίας και υγρασίας, ώστε να εξασφαλίζεται η σταθερότητα της ευαισθησίας τους για μεγάλα χρονικά διαστήματα. Σε τακτά χρονικά διαστήματα τα πρότυπα όργανα τοποθετούνται δίπλα στα υπό βαθμονόμηση όργανα και πραγματοποιούνται παράλληλες μετρήσεις για διάστημα μερικών ημερών. Κατόπιν το πρότυπο όργανο αποσύρεται και οι μετρήσεις των δύο οργάνων συγκρίνονται μεταξύ τους. Οι μετρήσεις του προτύπου οργάνου είναι απόλυτα βαθμονομημένες σε ακτινομετρικές μονάδες (π.χ. μονάδες πυκνότητας ροής,  $E$ ), ενώ για το βαθμονομούμενο όργανο χρησιμοποιούνται οι μετρήσεις του σήματος του οργάνου  $S$ , το οποίο είναι συνήθως τάση ή ένταση ρεύματος. Η σταθερά βαθμονόμησης του οργάνου  $C$  δίδεται τότε από τη σχέση:

$$C = \frac{S}{E} \quad (7-27)$$

εκφράζεται δε σε μονάδες σήματος προς ροή ακτινοβολίας (π.χ. Volts /  $\text{Wm}^{-2}$ ).



**Σχήμα 7.12** Παράδειγμα προσδιορισμού της βαθμονόμησης ενός ακτινόμετρου με τη μέθοδο των ελαχίστων τετραγώνων (διακεκομμένη γραμμή).

Εφόσον ο λόγος των μετρήσεων είναι σταθερός για όλο το διάστημα που πραγματοποιήθηκαν, τότε αυτός αποτελεί και τη σταθερά βαθμονόμησης του οργάνου. Αν ο λόγος μεταβάλλεται κατά τη διάρκεια της ημέρας και είναι συνάρτηση της έντασης της ακτινοβολίας, τότε η βαθμονόμηση του ακτινόμετρου προσδιορίζεται στατιστικά με τη χρήση μιας ευθείας ελαχίστων τετραγώνων (σχήμα 7.12).

Γενικά αυτή η μέθοδος βαθμονόμησης είναι αρκετά αξιόπιστη, εφόσον όμως εξασφαλίζεται η προσεκτική φύλαξη του πρότυπου οργάνου και εφόσον κατά καιρούς (περίπου δύο χρόνια) ελέγχεται η βαθμολόγησή του είτε με τη χρήση φασματοφωτομέτρου και πρότυπων πηγών ακτινοβολίας είτε μέσω σύγκρισης με άλλα πρότυπα όργανα. Απαραίτητη προϋπόθεση επίσης για την εφαρμογή της μεθόδου αυτής είναι τα δύο όργανα (βαθμονομούμενο και πρότυπο) να έχουν την ίδια φασματική απόκριση. Διαφορετικά, μεταβολές στη φασματική κατανομή της προσπίπτουσας ακτινοβολίας θα γίνονται αντιληπτές με διαφορετικό τρόπο από τα δύο όργανα.

### Σύγκριση με πηγές ακτινοβολίας

Μια πλέον λεπτομερής μέθοδος βαθμονόμησης είναι αυτή κατά την οποία το βαθμονομούμενο ακτινόμετρο μετρά την ακτινοβολία που εκπέμπεται από πηγές γνωστής φασματικής εκπομπής. Τέτοιες πηγές μπορεί να είναι είτε πρότυπες λυχνίες, είτε η ακτινοβολία που εκπέμπεται από τον ήλιο. Απαραίτητη προϋπόθεση όμως είναι η γνώση, ή δυνατότητα προσδιορισμού στο εργαστήριο, της σχετικής φασματικής απόκρισης του ακτινόμετρου  $s(\lambda)$ .

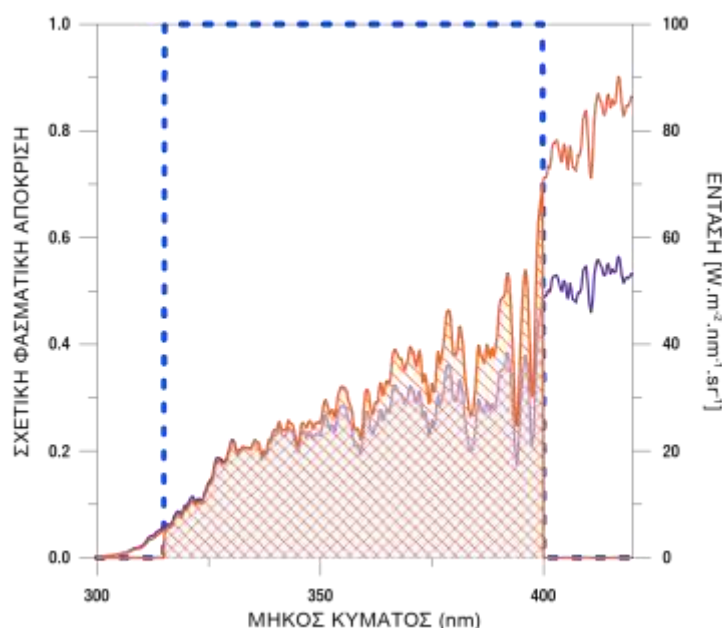
Αν  $E(\lambda)$  είναι η φασματική πυκνότητα ροής της ακτινοβολίας που προσπίπτει στο ακτινόμετρο τότε η ποσότητα:

$$E = \int E(\lambda) s(\lambda) d\lambda \quad (7-28)$$

θα ισοδυναμεί με τη μέτρηση  $S$  που εκτελεί το ακτινόμετρο την ίδια χρονική στιγμή και η σταθερά βαθμονόμησης θα δίδεται από την (7-27). Σχηματικά, ο υπολογισμός της ποσότητας  $E$ , δηλαδή της πυκνότητας ροής της προσπίπτουσας ακτινοβολίας βαρυμένης με τη φασματική απόκριση παρουσιάζεται στο σχήμα 7.13 για ένα ακτινόμετρο με ιδανική φασματική απόκριση και για δύο διαφορετικά φάσματα της προσπίπτουσας ακτινοβολίας. Το Παρατηρείστε ότι το φάσμα της ακτινοβολίας δεν μεταβάλλεται με τον ίδιο τρόπο σε όλα τα μήκη κύματος λόγω της διαφορετικής απορρόφησης και σκέδασης που προκαλούν τα ατμοσφαιρικά συστατικά, με αποτέλεσμα η συνεισφορά της φασματικής ροής της ακτινοβολίας στη συνολική ροή να είναι εντονότερη για τα μεγαλύτερα μήκη κύματος.

Σε ό,τι αφορά στις πρότυπες πηγές, η φασματική πυκνότητα ροής  $E(\lambda)$  της ακτινοβολίας που εκπέμπουν παρέχεται απευθείας από το πιστοποιητικό βαθμονόμησης. Η λυχνία θα πρέπει βέβαια να λειτουργεί υπό τις συνθήκες και προϋποθέσεις που αναπτύχθηκαν στην 7.2.4 Στην περίπτωση που χρησιμοποιείται ως πηγή η ηλιακή ακτινοβολία, είναι απαραίτητη η διενέργεια ταυτόχρονων μετρήσεων με ένα φασματοφωτόμετρο, διότι το ακριβές φάσμα της ηλιακής ακτινοβολίας που φθάνει στο ακτινόμετρο είναι γενικά άγνωστο. Όπως προαναφέρθηκε, το φασματοφωτόμετρο παρέχει λεπτομερείς μετρήσεις του φάσματος της ηλιακής ακτινοβολίας  $E(\lambda)$  στην φασματική περιοχή λειτουργίας του.





**Σχήμα 7.13** Παράδειγμα υπολογισμού της πυκνότητας ροής που θα μετρούσε ένα ακτινόμετρο με ιδανική φασματική απόκριση στο UV-A όταν μεταβάλλεται το φάσμα της προσπίπτουσας ακτινοβολίας. Το εμβαδόν των δύο γραμμοσκιασμένων περιοχών αντιστοιχεί στο ολοκλήρωμα της σχέσης (7-28) για κάθε ένα από τα δύο φάσματα.

Το πλεονέκτημα της δεύτερης μεθόδου είναι ότι οι μετρήσεις του ακτινόμετρου συγκρίνονται με μετρήσεις ενός ιδεατού οργάνου το οποίο έχει την ίδια ακριβώς φασματική απόκριση. Όμως απαραίτητη προϋπόθεση είναι να γνωρίζουμε με ακρίβεια την φασματική απόκριση του ακτινόμετρου, πράγμα το οποίο είναι σε πολλές περιπτώσεις δύσκολο, ενώ η διαδικασία προσδιορισμού της είναι αρκετά επίπονη και δαπανηρή (βλέπε §7.4). Επίσης θα πρέπει να σημειωθεί ότι στην περίπτωση χρήσης ως πρότυπης πηγής της ηλιακής ακτινοβολίας, η περιοχή λειτουργίας του φασματοφωτομέτρου θα πρέπει να καλύπτει τουλάχιστον τη φασματική περιοχή στην οποία η απόκριση του ακτινόμετρου είναι μη μηδενική.

#### 7.4.2 Τύποι μετρήσεων με ακτινόμετρα

Τα ακτινόμετρα χρησιμοποιούνται συνήθως για τη μέτρηση της ολικής, της άμεσης και της διάχυτης συνιστώσας της ηλιακής ακτινοβολίας, σε διάφορες φασματικές περιοχές. Ιδιαίτερα αυτά που χρησιμοποιούνται για τη μέτρηση της πυκνότητας ροής σε ολόκληρο το φάσμα της ηλιακής ακτινοβολίας, από 280 nm μέχρι περίπου 3.000 nm (**ολοφασματική** ακτινοβολία) ονομάζονται **πυρανόμετρα**. Αυτά που χρησιμοποιούνται για την μέτρηση της άμεσης συνιστώσας ονομάζονται **πυρηλιόμετρα** και μετρούν την ολοφασματική ακτινοβολία ή την ακτινοβολία σε μεγάλες περιοχές με τη χρήση φίλτρων.

Εναλλακτικά η άμεση συνιστώσα μπορεί να εκτιμηθεί με τη χρήση δύο όμοιων ακτινόμετρων μέτρησης της ολικής ακτινοβολίας, το ένα εκ των οποίων τοποθετείται κάτω από ένα σκιάδιο, όπως περιγράφεται στη επόμενη παράγραφο.

Η διάχυτη συνιστώσα μπορεί να μετρηθεί με ένα ακτινόμετρο ολικής ακτινοβολίας (π.χ. ένα πυρανόμετρο) με τη χρήση ενός σκιαδίου (βλέπε εικόνα 7.1). Το σκιάδιο αποτελείται από μία κυκλική μεταλλική ταινία, εύρους δύο περίπου φορές μεγαλύτερου από τη διάμετρο του παραθύρου εισόδου του οργάνου, η οποία τοποθετείται έτσι ώστε το επίπεδό της να συμπίπτει με το επίπεδο της εκλειπτικής. Το όργανο τοποθετείται στο κέντρο του ημικυκλίου (ή κύκλου) που ορίζει η ταινία, έτσι ώστε ένα τμήμα της ταινίας να παρεμβάλλεται συνεχώς μεταξύ του οργάνου και του ήλιου. Με τον τρόπο αυτό αποκόπτεται η άμεση συνιστώσα, αλλά και ένα μικρό ποσοστό της διάχυτης το οποίο όμως μπορεί να εκτιμηθεί και να ληφθεί υπόψη ως διορθωτικός παράγοντας. Τέλος επειδή όπως είναι γνωστό η γωνία της εκλειπτικής μεταβάλλεται μέσα στο χρόνο κατά περίπου  $46^\circ$  από την χειμερινή μέχρι την θερινή τροπή, απαιτείται κατά διαστήματα (συνήθως κάθε εβδομάδα) διόρθωση της θέσης του σκιαδίου ώστε να συμπίπτει πάντα με το επίπεδο της εκλειπτικής. Είναι προφανές ότι η μέθοδος αυτή είναι λιγότερο ακριβής, είναι όμως εύχρηστη και σημαντικά οικονομικότερη.

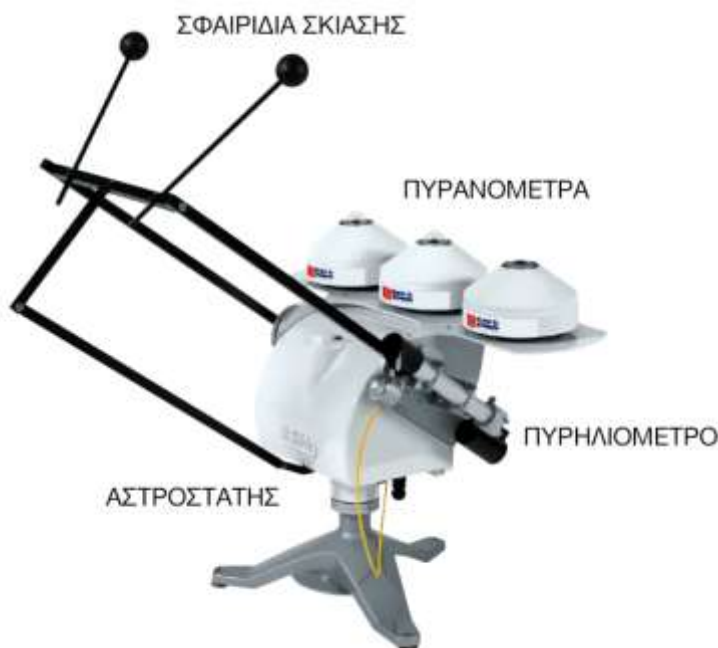


***Εικόνα 7.1** Ακτινόμετρα ευρείας φασματικής απόκρισης για τη μέτρηση της πυκνότητας ροής της ηλιακής ακτινοβολίας σε διάφορες φασματικές περιοχές. Δεξιά διακρίνεται ένα σκιάδιο για τη μέτρηση της διάχυτης συνιστώσας της ηλιακής ακτινοβολίας. (Εργαστήριο Φυσικής της Ατμόσφαιρας, τμήμα Φυσικής, ΑΠΘ)*

Το ρόλο του σκιαδίου μπορεί να παίξει και ένα σφαιρίδιο (ή δίσκος) που τοποθετείται συνεχώς με τη χρήση ενός κινητήρα μεταξύ του ηλιακού δίσκου και του ακτινόμετρου. Το πλεονέκτημά του συγκριτικά με το σκιάδιο είναι ότι το σφαιρίδιο δεν αποκόπτει σημαντικό μέρος της διάχυτης συνιστώσας από τον ουράνιο θόλο, είναι όμως πολύ πιο δαπανηρή μέθοδος γιατί απαιτεί τη χρήση **αστροστάτη** (solar tracker), δηλαδή μιας μηχανοκίνητης ηλεκτρονικής διάταξης για τη συνεχή κίνηση του σφαιριδίου. Στην εικόνα 7.2 παρουσιάζεται ένα τυπικό σύστημα για τη μέτρησης της ολικής, διάχυτης και άμεσης πυκνότητας ροής της ηλιακής ακτινοβολίας, με τη χρήση σφαιριδίων για τη μέτρηση της διάχυτης ακτινοβολίας.

Σήμερα είναι διαθέσιμοι πολλοί τύποι ακτινομέτρων με φασματική απόκριση σε διάφορες περιοχές του ηλιακού φάσματος ανάλογα με τις εφαρμογές που χρησιμοποιούνται. Επίσης είναι διαθέσιμα ακτινόμετρα με που παρέχουν την δυνατότητα ταυτόχρονης μέ-

τρησης σε διάφορες φασματικές περιοχές με τη χρήση πολλαπλών φίλτρων (multi-filter radiometers).



**Εικόνα 7.2** Ακτινόμετρα του οίκου Kipp & Zonen σε σύστημα παρακολούθησης της κίνησης του ήλιου με σφαιρίδια σκίασης για δύο από αυτά για τη μέτρηση της διάχυτης ακτινοβολίας. Ο κυλινδρικός αισθητήρας στη δεξιά άκρη του συστήματος είναι ένα πυρηλιόμετρο για τη μέτρηση της ροής της άμεσης ακτινοβολίας.

## 7.5 Παράγοντες που επηρεάζουν τα όργανα ακτινοβολίας

### 7.5.1 Διαπερατότητα

Ένα σημαντικό χαρακτηριστικό των οργάνων μέτρησης της ακτινοβολίας είναι η διαπερατότητά τους. Αυτή εκφράζεται σαν ο λόγος της ποσότητας (π.χ. της έντασης) της ακτινοβολίας που φθάνει στον ανιχνευτή, αφού δηλαδή διανύσει όλα τα ενδιάμεσα τμήματα του οργάνου, προς την ποσότητα της προσπίπτουσας ακτινοβολίας στην είσοδο του οργάνου. Επειδή η επίδραση των διαφόρων οπτικών τμημάτων του οργάνου είναι γενικά διαφορετική στις διάφορες περιοχές του φάσματος η διαπερατότητα του οργάνου να εξαρτάται από το μήκος κύματος της ακτινοβολίας. Οπτικά μέρη όπως φίλτρα, φακοί, φράγματα ανάκλασης, κάτοπτρα, εξασθενίζουν την προσπίπτουσα σε αυτά ακτινοβολία σε ποσοστά που διαφέρουν ανάλογα με την ποιότητα κατασκευής τους. Επίσης ένα μέρος της ακτινοβολίας ανακλάται στην είσοδο του οργάνου (π.χ. στο πλακίδιο διάχυσης), ενώ τέλος ο ίδιος ο ανιχνευτής ανακλά ένα σημαντικό της μέρος. Τελικά ένα μέρος μόνο της προσπίπτουσας ακτινοβολίας μετράται από τον ανιχνευτή. Επειδή το ποσοστό της ακτινοβολίας που "χάνεται" είναι σταθερό και εξαρτάται μόνο από τα κατασκευαστικά χαρακτηριστικά των διαφόρων τμημάτων του οργάνου, είναι ένας παράγοντας που μπορεί σχετικά εύκολα να εκτιμηθεί, βοηθώντας έτσι στον σωστό σχεδιασμό του οργάνου. Φυσικά αυτός ο σταθερός παράγοντας συμπεριλαμβάνεται στον συντελεστή βαθμονόμησης του οργάνου [βλέπε σχέση (7-27)] όταν διαιρείται το σήμα εξόδου του οργάνου με την προσπίπτουσα γνωστή ακτινοβολία.

## 7.5.2 Θερμοκρασία

Ένας άλλος παράγοντας είναι η θερμοκρασία του οργάνου συνολικά ή επί μέρους τμημάτων του. Συνήθως αύξηση της θερμοκρασίας συνεπάγεται και αύξηση του σήματος εξόδου του οργάνου (είτε αυτό είναι τάση, ρεύμα ή αγωγιμότητα). Αυτή η αύξηση οφείλεται κατά κύριο λόγο στη μεταβολή των χαρακτηριστικών του ανιχνευτή. Τα διάφορα φίλτρα ή άλλα οπτικά τμήματα συμπεριφέρονται διαφορετικά στις μεταβολές της θερμοκρασίας, δηλαδή προκαλούν είτε αύξηση είτε ελάττωση του σήματος του οργάνου. Η αντιμετώπιση των επιδράσεων της θερμοκρασίας στη μέτρηση γίνεται με δύο τρόπους.

### 7.5.2.1 Σταθεροποίηση της θερμοκρασίας λειτουργίας

Αυτή είναι η αποτελεσματικότερη μέθοδος διότι ουσιαστικά αποτρέπει την ύπαρξη μεταβολών στη θερμοκρασία του οργάνου και επιτυγχάνεται είτε με ψύξη, είτε με θέρμανση του οργάνου. Όλα τα τμήματα του οργάνου των οποίων τα χαρακτηριστικά και η απόδοση εξαρτώνται από την θερμοκρασία τοποθετούνται σε έναν κλειστό θερμικά μονωμένο θάλαμο. Η προς μέτρηση ακτινοβολία φθάνει στο όργανο είτε μέσω ενός “παραθύρου” με μεγάλη διαπερατότητα στη φασματική περιοχή λειτουργίας του οργάνου, είτε μέσω μια οπτικής ίνας. Ο θάλαμος μπορεί είτε να θερμαίνεται σε κάποια σταθερή και ελεγχόμενη συνεχώς θερμοκρασία με τη χρήση αντιστάσεων, είτε να ψύχεται με τη χρήση ψυκτικών μονάδων ή στοιχείων Peltier. Πολλές φορές χρησιμοποιείται συνδυασμός διατάξεων θέρμανσης και ψύξης ελεγχόμενες ηλεκτρονικά από έναν υπολογιστή. Γενικά οι διατάξεις θέρμανσης είναι φθηνότερες και πιο εύκολο να κατασκευασθούν, αλλά παρουσιάζουν το μειονέκτημα ότι αυξάνουν το θερμικό θόρυβο στις μετρήσεις του οργάνου, ιδιαίτερα αν οι κυρίαρχες στην περιοχή περιβαλλοντικές συνθήκες απαιτούν υψηλές θερμοκρασίες λειτουργίας. Είναι ευνόητο ότι η θερμοκρασία του οργάνου πρέπει να διατηρείται σε υψηλότερα επίπεδα από την μέγιστη θερμοκρασία που μπορεί να εμφανισθεί σε έναν τόπο. Η ψύξη του οργάνου σε θερμοκρασίες χαμηλότερες της θερμοκρασίας περιβάλλοντος είναι συνήθως καλύτερη λύση διότι έτσι μειώνεται ο θερμικός θόρυβος στις μετρήσεις. Οι ψυκτικές μονάδες είναι συνήθως ογκώδεις, δύσχρηστες και δαπανηρές, ενώ η χρήση ψυκτικών στοιχείων Peltier, είναι σαφώς πιο συμφέρουσα λύση. Μειονέκτημα της ψύξης των οργάνων σε πολύ χαμηλές θερμοκρασίες είναι η πιθανότητα εμφάνισης υδροσταγονιδίων σε οπτικά τμήματα, λόγω συμπύκνωσης των υδρατμών του ατμοσφαιρικού αέρα σε περιβάλλοντα με υψηλή υγρασία, που μεταβάλλουν τις οπτικές τους ιδιότητες.

### 7.5.2.2 Διόρθωση του σήματος λόγω μεταβολών της θερμοκρασίας

Αυτή είναι μία μέθοδος που χρησιμοποιείται ευρύτατα, ιδιαίτερα σε όργανα μικρού κόστους στα οποία είναι οικονομικά ασύμφορο να χρησιμοποιηθούν σταθεροποιητές θερμοκρασίας. Αν θεωρήσουμε για ένα όργανο ότι η μεταβολή της έντασης της μετρούμενης ακτινοβολίας  $I$  είναι γραμμική συνάρτηση της θερμοκρασίας του οργάνου  $T$ , τότε:

$$\frac{I_o - I}{I_o} = c + aT \quad (7-29)$$

όπου  $I_o$  είναι η ένταση της ακτινοβολίας σε μία θερμοκρασία αναφοράς  $T_o$ . Για  $T = T_o$ , είναι  $I = I_o$ , οπότε από την (7-29) προκύπτει η τιμή της σταθεράς  $c$ :

$$c = -aT_o \quad (7-30)$$

και συνεπώς:

$$\frac{I_o - I}{I_o} = a(T_o - T) \Rightarrow \frac{I}{I_o} = 1 + a(T_o - T) \quad (7-31)$$

Η σταθερά  $a$  αποτελεί το συντελεστή διόρθωσης για μεταβολές της θερμοκρασίας του οργάνου από μια θερμοκρασία αναφοράς, για την οποία υπολογίζεται ο συντελεστής  $a$ . Ο προσδιορισμός του  $a$  μπορεί να γίνει πειραματικά, διενεργώντας μετρήσεις της ακτινοβολίας που εκπέμπει μια σταθερή πηγή για διάφορες θερμοκρασίες του οργάνου. Κατασκευάζοντας ένα διάγραμμα του λόγου  $(I / I_o)$ , ως συνάρτηση της διαφοράς της θερμοκρασίας από την θερμοκρασία αναφοράς  $(T_o - T)$  μπορούμε καταρχήν να διαπιστώσουμε το κατά πόσο η εξάρτηση είναι γραμμική. Στη συνέχεια ο συντελεστής  $a$  προσδιορίζεται από την κλίση της ευθείας των ελαχίστων τετραγώνων. Τέλος, αν από το διάγραμμα προκύψει ότι η σχέση δεν είναι γραμμική, τότε θα πρέπει να αναζητηθούν άλλες μαθηματικές εκφράσεις της εξάρτησης του λόγου  $(I / I_o)$  από τη θερμοκρασία μια να προσδιοριστούν αντίστοιχα οι σταθερές της συνάρτησης.

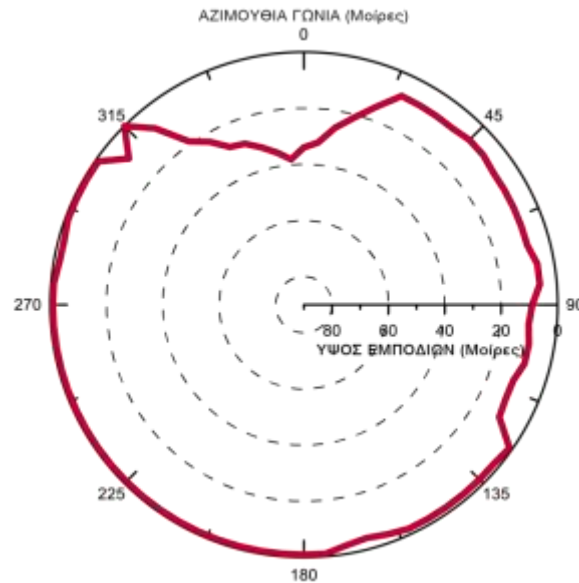
Είναι ευνόητο ότι η μέθοδος αυτή είναι μία στατιστική διόρθωση που έχει σαν αποτέλεσμα την εισαγωγή κάποιας αβεβαιότητας στις μετρήσεις, γι αυτό και σε περιπτώσεις που απαιτείται μεγάλη ακρίβεια, δεν συνίσταται η χρησιμοποίησή της.

## 7.6 Τοποθέτηση και συντήρηση

Τα όργανα που χρησιμοποιούνται για τη μέτρηση της πυκνότητας ροής της ακτινοβολίας τοποθετούνται έτσι ώστε η επιφάνεια του συλλέκτη να είναι απολύτως οριζόντια. Επειδή μετρούν την ολική ακτινοβολία, αυτή δηλαδή που εκπέμπεται από όλο το ημισφαίριο πάνω από το όργανο, το οπτικό τους πεδίο πρέπει να είναι ελεύθερο από όλες τις διευθύνσεις έτσι ώστε να είναι δυνατόν να μετρηθεί η ακτινοβολία από όλα τα σημεία του ουράνιου θόλου. Επειδή στην πραγματικότητα είναι δύσκολο να ικανοποιείται αυτή η συνθήκη, φροντίζουμε τα εμπόδια να αποκόπτουν όσο το δυνατόν μικρότερη στερεά γωνία από το οπτικό πεδίο του οργάνου. Επίσης επειδή, για το βόρειο ημισφαίριο, η ακτινοβολία που προέρχεται από το νότιο τμήμα του ουρανού είναι ισχυρότερη από αυτή του βορείου τμήματος (εφόσον περιλαμβάνει την άμεση ηλιακή ακτινοβολία), είναι προτιμότερο το οπτικό πεδίο του οργάνου να είναι ελεύθερο από το νότο.

Τα όργανα μέτρησης της άμεσης ακτινοβολίας (π.χ. πυρηλιόμετρα) συνοδεύονται από διάταξη που τα κατευθύνει συνεχώς προς τον ήλιο, έτσι ώστε ο οπτικός τους άξονας να είναι παράλληλος με τις ηλιακές ακτίνες. Οι διατάξεις παρακολούθησης της κίνησης του ήλιου λειτουργούν συνήθως με τη βοήθεια ενός υπολογιστή ο οποίος υπολογίζει για κάθε στιγμή τις πολικές συντεταγμένες του ήλιου (αζιμούθια και ζενίθεια γωνία) με βάση τις γεωγραφικές της θέσης μέτρησης, την ημερομηνία και την ώρα της ημέρας.

Μια καλή πρακτική για κάθε σταθμό μέτρησης της ηλιακής ακτινοβολίας είναι να αποτυπώνεται το οπτικό πεδίο του οργάνου με μετρήσεις του ύψους των εμποδίων, όπως στο παράδειγμα του σχήματος 7.14, ώστε να είναι δυνατόν να εκτιμηθεί -και με την εφαρμογή κατάλληλης μεθοδολογίας να διορθωθεί- το σφάλμα που υπεισέρχεται στις μετρήσεις.



**Σχήμα 7.14** Διάγραμμα του ύψους των εμποδίων στο οπτικό πεδίο των ακτινομετρικών οργάνων στο σταθμό του Εργαστηρίου Φυσικής της Ατμόσφαιρας στο ΑΠΘ συναρτήσει του αζιμούθιας γωνίας του τόπου (μετρούμενης από το Βορρά).

Η καλή συντήρηση εξασφαλίζει την αξιοπιστία των μετρήσεων. Αυτή περιλαμβάνει τουλάχιστον:

- Τακτικό καθάρισμα του θόλου ή του συλλέκτη του οργάνου, ώστε να μην μεταβάλλεται η διαπερατότητά του από την επίθεση σκόνης, υγρασίας ή άλλων σωματιδίων.
- Εξασφάλιση περιβάλλοντος απαλλαγμένου υγρασίας στο εσωτερικό του οργάνου με τη συχνή αντικατάσταση των υγροσκοπικών ουσιών που είναι για το σκοπό αυτό τοποθετημένες στο εσωτερικό του οργάνου.
- Έλεγχο κατά τακτά διαστήματα της απόλυτης βαθμονόμησης του οργάνου και διόρθωση της σταθεράς βαθμονόμησης αν κριθεί απαραίτητο.
- Έλεγχο της σταθερότητας της μονάδας καταγραφής του σήματος του οργάνου. Είναι συχνό φαινόμενο, αναξιόπιστες μονάδες καταγραφής να υποβιβάζουν την απόδοση ενός πολύ καλού οργάνου.

Έλεγχο της ακρίβειας της ημερομηνίας και ώρας του συστήματος καταγραφής εφόσον από αυτό καθορίζεται ο χρόνος που αντιστοιχεί στη μέτρηση. Το ζήτημα αυτό γίνεται σημαντικότερο σε όργανα μέτρησης της άμεσης ακτινοβολίας, εφόσον στον ακριβή χρόνο στηρίζεται και η ακριβής στόχευση του ηλιακού δίσκου. Σφάλματα μερικών λεπτών στο χρόνο έχουν σαν αποτέλεσμα το όργανο να μην μετρά την άμεση συνιστώσα αλλά την πολύ μικρότερη ένταση της διάχυτης ακτινοβολίας του ουρανού.

## ΒΙΒΛΙΟΓΡΑΦΙΑ

Abbot, C. G., and F. E. Fowle (1908), Methods of determining the "solar constant" of radiation (the Langley method), in *Annals of the Astrophysical Observatory of the Smithsonian Institution.*, edited, pp. 13-20, Gov. Printing Office, Washington, D.C.

- Brewer, A. W. (1973). A replacement for the Dobson Spectrophotometer?, *Pure Appl Geophys*, 106, 918-927.
- Dobson, G. M. B. (1931). A photoelectric spectrophotometer for measuring the amount of atmospheric ozone, *P Phys Soc*, 43, 324-339.
- Dobson, G. M. B., and D. N. Harrison (1926). Measurement of the amount of ozone in the earth's atmosphere., *P Phys Soc*, 38, 74-76.
- Gotz, F. W. P., and R. Ladenburg (1931). The content of the lower atmospheric layers of the ozone, *Naturwissenschaften*, 19, 373-374.
- Hansen, J. E., and L. D. Travis (1974). Light scattering in planetary atmospheres, *Space Science Reviews*, 16, 527-610.
- Kostkowski, H. J. (1997). *Reliable spectroradiometry* 610 pp., Spectroradiometry Consulting, La Plata, MD.
- Liou, K. N. (2001). *An Introduction to Atmospheric Radiation (Second Edition)*, Academic Press, San Diego, Ca, USA.
- Platt, U., and D. Perner (1980). Direct measurements of atmospheric CH<sub>2</sub>O, HNO<sub>2</sub>, O<sub>3</sub>, NO<sub>2</sub>, and SO<sub>2</sub> by differential optical absorption in the near UV., *J. Geophys. Res-Atmos.*, 85(12), 7453-7458.
- Platt, U., D. Perner, and H. W. Patz (1979). Simultaneous Measurement of Atmospheric CH<sub>2</sub>O, O<sub>3</sub>, and NO<sub>2</sub> by differential optical absorption, *J. Geophys. Res.*, 84(10), 6329-6335.

## ΚΕΦΑΛΑΙΟ 8: ΜΕΤΡΗΣΕΙΣ ΠΟΙΟΤΗΤΑΣ ΤΟΥ ΑΕΡΑ

### Σύνοψη

Στο κεφάλαιο αυτό παρουσιάζεται ο σχεδιασμός, οι αρχές λειτουργίας και οι αντιπροσωπευτικοί τύποι διατάξεων που χρησιμοποιούνται για τη μέτρηση της ποιότητας του αέρα στην επιφάνεια του εδάφους. Δίνεται έμφαση στις διατάξεις που συγκροτούν έναν τυπικό σταθμό του ευρωπαϊκού δικτύου παρακολούθησης της ποιότητας του αέρα στην επιφάνεια του εδάφους, ο οποίος περιλαμβάνει το όζον, τα οξειδία του αζώτου, το μονοξείδιο του άνθρακα, το διοξείδιο του θείου και τα αιωρούμενα σωματίδια.

### 8.1 Σύστημα Αέριας Ρύπανσης

Προκειμένου να οικοδομηθεί μια αποτελεσματική στρατηγική περιορισμού της ατμοσφαιρικής ρύπανσης είναι σημαντικό να διαγνωσθούν τα περιβαλλοντικά προβλήματα, να προσδιορισθεί η συνεισφορά των διαφόρων πηγών και να αναγνωρισθούν οικονομικά ανεκτές και βιώσιμες λύσεις.

Το σύστημα της ατμοσφαιρικής ρύπανσης συντίθεται από ένα αριθμό συνιστωσών:

- Τις *εκπομπές των ατμοσφαιρικών ρύπων*, τόσο από ανθρωπογενείς όσο και από φυσικές πηγές.
- Τον *έλεγχο που ασκείται πάνω στις πηγές*. Η έννοια αυτή χρησιμοποιείται εδώ για να δηλώσει συσκευές, συστήματα και λειτουργικές διαδικασίες που χρησιμοποιούνται για να εμποδίσουν ένα μέρος των ρύπων να καταλήξει στην ατμόσφαιρα.
- Τους *μηχανισμούς διασποράς και απόθεσης* καθώς και τους χημικούς μετασχηματισμούς που δρουν στην ατμόσφαιρα.
- Την *ποιότητα του αέρα* η οποία προσδιορίζεται σαν το συνολικό αποτέλεσμα των εκπομπών των ρύπων και της επίδρασης των ατμοσφαιρικών μηχανισμών πάνω σ' αυτούς.
- Τις *νομοθετικές ρυθμίσεις για τον έλεγχο* της ατμοσφαιρικής ρύπανσης.
- Τους *μηχανισμούς ελέγχου* οι οποίοι βασίζονται στο δίκτυο παρακολούθησης της ρύπανσης.

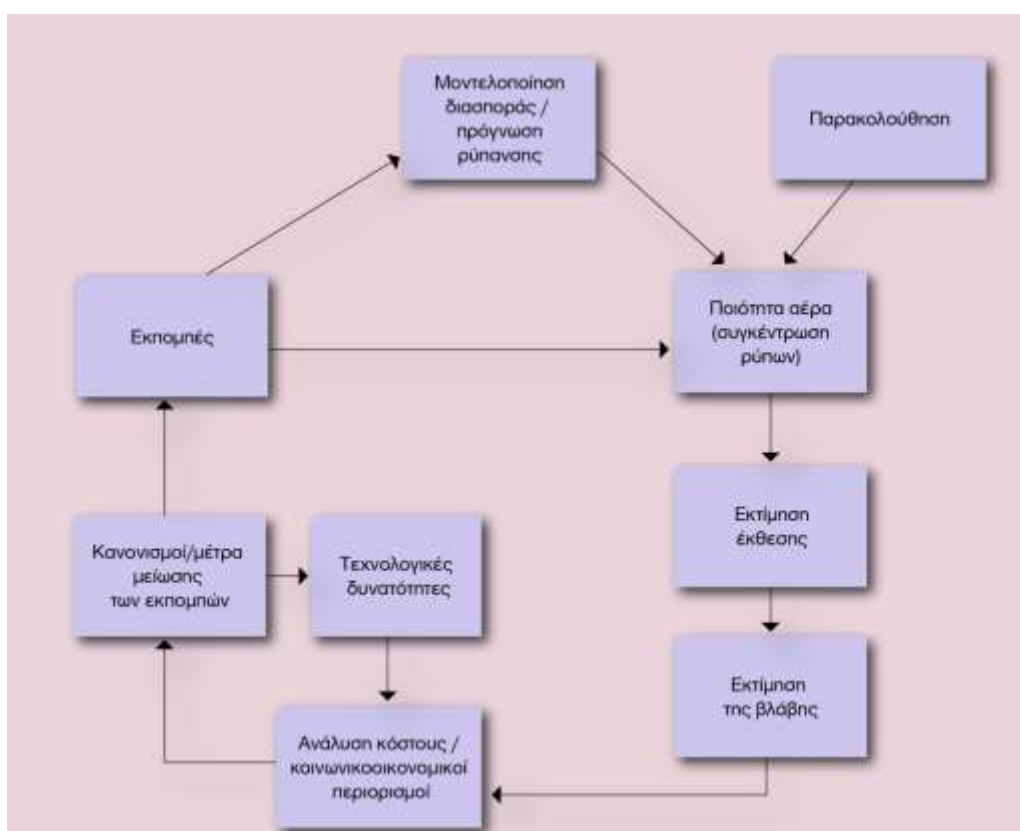
Διαχείριση της ποιότητας του αέρα είναι η παρακολούθηση των επιπέδων ρύπανσης και ο έλεγχος των εκπομπών ώστε να εξαιρεθούν ή να περιορισθούν οι συνέπειές τους στην υγεία των ανθρώπων αλλά και γενικότερα στο περιβάλλον. Η διαχείριση της ποιότητας του αέρα σε αστικές περιοχές είναι ένα διεπιστημονικό πεδίο και σημαντικές συνιστώσες της είναι οι παρακάτω:

- Απογραφή των ρυπογόνων δραστηριοτήτων και των εκπομπών.
- Παρακολούθηση των επιπέδων ρύπανσης και των παραμέτρων διασποράς.
- Υπολογισμός/ πρόγνωση των επιπέδων ρύπανσης με την βοήθεια μοντέλων ατμοσφαιρικής ρύπανσης.
- Απογραφή του πληθυσμού και υπολογισμού της έκθεσης στην ατμοσφαιρική ρύπανση.
- Υπολογισμός του αποτελέσματος συγκεκριμένων μέτρων μείωσης/ ελέγχου εκπομπών.



- Εγκαθίδρυση/ βελτίωση κανονισμών ατμοσφαιρικής ρύπανσης

Από τα παραπάνω γίνεται φανερό ότι η παρακολούθηση των επιπέδων ρύπανσης είναι θεμελιώδους σημασίας για την διαχείριση της ποιότητας του αέρα. Η ανάπτυξη της τεχνολογίας κατά τα τελευταία 50 χρόνια έχει δώσει την δυνατότητα ανάπτυξης μεγάλης ποικιλίας οργάνων και τεχνικών που μπορούν να χρησιμοποιηθούν ώστε να μετρηθούν αποτελεσματικά ένα μεγάλων αριθμός ρύπων και χημικών ενώσεων στην ατμόσφαιρα. Μετρήσεις γίνονται είτε με δειγματοληπτικό τρόπο και ανάλυση στο εργαστήριο είτε με συνεχή μέτρηση επιτόπου αλλά και με παρατήρηση από μακριά (τηλεπαρατήρηση) γεγονός που διευκολύνει μια τρισδιάστατη χωροχρονική καταγραφή της σύνθεσης της ατμόσφαιρας που μας περιβάλλει. Κατά την μέτρηση ατμοσφαιρικών ρύπων έχουμε υπόψη δυο βασικούς στόχους: (α) την ορθή ταυτοποίηση των ρύπων και (β) τον ποσοτικό τους προσδιορισμό.



Σχήμα 8.1 Διαχείριση της ποιότητας του αέρα..

## 8.2 Μονάδες μέτρησης των συγκεντρώσεων των ρύπων στον αέρα

Οι συγκεντρώσεις των ρύπων στην ατμόσφαιρα μετρούνται, ανάλογα με την αρχή λειτουργίας της διάταξης, είτε σε αναλογία μείγματος κατά όγκο σε μέρη στο εκατομμύριο (ppm) είτε σε πυκνότητα σε  $\mu\text{g m}^{-3}$ . Η νομοθεσία (εθνική, ευρωπαϊκή) θέτει όρια στη συγκέντρωση των ρύπων, κατόπιν συστάσεων του Διεθνούς Οργανισμού Υγείας (World Health Organization – WHO). Τα όρια αυτά αφορούν είτε τιμές συγκεντρώσεων πάνω από τις οποίες πρέπει να ενημερώνεται το κοινό, είτε τιμές που δεν πρέπει να υπερβαί-

νονται συχνά<sup>1</sup>, και είναι διαφορετικά για κάθε είδος ρύπου. Κατά κανόνα, η μονάδα που χρησιμοποιούμε για την παρουσίαση των μετρήσεων και τη σύγκρισή τους με τα θεσμοθετημένα όρια είναι το μικρογραμμάριο ανά κυβικό μέτρο ( $\mu\text{g}/\text{m}^{-3}$ ), τόσο για τους αέριους ρύπους όσο και για τα αιωρούμενα σωματίδια.

Η αναλογία μείγματος σε μέρη στο εκατομμύριο είναι στην ουσία ένα αδιάστατο κλάσμα όγκου, το οποίο ορίζεται από τη σχέση:

$$\text{συγκέντρωση ενός στοιχείου } i \text{ σε ppm} = (c_i / c) \cdot 10^6$$

όπου  $c_i$  είναι ο αριθμός των γραμμομορίων του στοιχείου  $i$  στη μονάδα του όγκου και  $c$  είναι ο αριθμός των γραμμομορίων του αέρα στη μονάδα του όγκου για πίεση  $p$  και θερμοκρασία  $T$ .

Αν η συγκέντρωση ενός στοιχείου σε ppm ισούται με  $A$  και θέλουμε να μετατρέψουμε τη συγκέντρωση σε  $\mu\text{g}/\text{m}^{-3}$ , χρησιμοποιούμε την παρακάτω σχέση:

$$\text{συγκέντρωση του στοιχείου } i \text{ σε } \mu\text{g}/\text{m}^{-3} = A \cdot \frac{100 \cdot p \cdot M_i}{8.314 \cdot T} \quad (8-1)$$

όπου  $p$  είναι η πίεση του αέρα σε hectopascal (hPa),  $T$  είναι η θερμοκρασία του αέρα σε Kelvin (K) και  $M_i$  είναι το μοριακό βάρος του στοιχείου  $i$ .

Πρέπει εδώ να τονιστεί ότι, για πολλούς ρύπους, η χρήση του ppm έχει ως αποτέλεσμα οι συγκεντρώσεις να λαμβάνουν πολύ μικρά νούμερα. Σ' αυτήν την περίπτωση χρησιμοποιούμε ορισμένες μικρότερες μονάδες, συνήθως μέρη στο δισεκατομμύριο (ppb) ή μέρη στο τρισεκατομμύριο (ppt). Η σχέση ανάμεσα σ' αυτές τις μονάδες είναι:

συγκέντρωση του στοιχείου  $i$  σε ppb =  $10^3$  x συγκέντρωση του ίδιου στοιχείου σε ppm και συγκέντρωση του στοιχείου  $i$  σε ppt =  $10^3$  x συγκέντρωση του ίδιου στοιχείου σε ppb.

**Παράδειγμα:** Το όριο επιφυλακής για μέσες ωριαίες τιμές του  $\text{O}_3$  είναι  $180 \mu\text{g m}^{-3}$ . Να μετατραπεί αυτό το όριο σε μονάδες ppm και ppb όταν η πίεση ισούται με 1013 mbar και η θερμοκρασία με  $25^\circ\text{C}$ .

Για την εφαρμογή της εξίσωσης (8-1), χρησιμοποιούμε τα παρακάτω:

$$M_i = 48 \text{ (το μοριακό βάρος του } \text{O}_3\text{)}$$

$$P = 1013 \text{ hPa}$$

$$T = 298.2 \text{ K}$$

Από τα παραπάνω προκύπτει:

$$\text{συγκέντρωση του } \text{O}_3 \text{ σε ppm} = 180 \times 0.00051 = 0.0918$$

$$\text{συγκέντρωση του } \text{O}_3 \text{ σε ppb} = 10^3 \times 0.0918 \approx 92$$

<sup>1</sup> Περισσότερες πληροφορίες είναι διαθέσιμες στην ιστοσελίδα του Υπουργείου Παραγωγικής Ανασυγκρότησης, Περιβάλλοντος και Ενέργειας, <http://www.ypeka.gr>.

Ρύπος	Μετατροπή από $\mu\text{g m}^{-3}$ σε ppm	Μετατροπή από ppm σε $\mu\text{g m}^{-3}$
	Συντελεστής μετατροπής:	Συντελεστής μετατροπής:
Οζον (O <sub>3</sub> )	$0.51 \times 10^{-3}$	1960
Διοξείδιο του αζώ- του (NO <sub>2</sub> )	$0.53 \times 10^{-3}$	1880
Οξειδίο του αζώ- του (NO)	$0.81 \times 10^{-3}$	1230
Διοξείδιο του άν- θρακα (CO <sub>2</sub> )	$0.56 \times 10^{-3}$	1800
Μονοξείδιο του άνθρακα (CO)	$0.87 \times 10^{-3}$	1150
Διοξείδιο του θεί- ου (SO <sub>2</sub> )	$0.38 \times 10^{-3}$	2620
Αμμωνία (NH <sub>3</sub> )	$1.44 \times 10^{-3}$	695

**Πίνακας 8.1** Συντελεστές μετατροπής των συγκεντρώσεων από  $\mu\text{g m}^{-3}$  σε ppm και το αντίστροφο.

### 8.3 Ταξινόμηση – Επεξεργασία – Παρουσίαση μετρήσεων

#### 8.3.1 Γενικά

Για τον έλεγχο της ποιότητας του ατμοσφαιρικού περιβάλλοντος είναι απαραίτητη η συνεχής καταγραφή όλων των παραμέτρων που σχετίζονται μ' αυτήν, όχι μόνο για την άμεση λήψη προστατευτικών μέτρων, αλλά και για τη συλλογή στοιχείων που θα βοηθήσουν στην ερμηνεία των φαινομένων και στον σχεδιασμό μελλοντικής αντιμετώπισης των προβλημάτων που σχετίζονται με την ποιότητα του περιβάλλοντος.

Προκειμένου να επιτευχθεί αυτός ο στόχος, θα πρέπει να γίνονται οι ακόλουθες μετρήσεις σε έναν ολοκληρωμένο σταθμό ελέγχου ποιότητας του ατμοσφαιρικού περιβάλλοντος:

- α. Μετρήσεις αέριων ρύπων,
- β. μετεωρολογικές μετρήσεις,
- γ. μετρήσεις ακτινοβολίας.

#### 8.3.2 Συλλογή μετρήσεων

Σε έναν σύγχρονο σταθμό ελέγχου ποιότητας του περιβάλλοντος, η συλλογή των στοιχείων είναι αυτοματοποιημένη και δεν απαιτεί τη συνεχή παρουσία ενός παρατηρητή. Αυτό είναι σήμερα εφικτό, διότι οι περισσότερες διατάξεις που χρησιμοποιούμε για τη

μέτρηση των παραμέτρων που προαναφέρθηκαν είναι πλέον σύγχρονης τεχνολογίας και επιτρέπουν τη συνεχή καταγραφή των μετρήσεων.

Όπως προαναφέρθηκε στο εισαγωγικό κεφάλαιο του βιβλίου, η αποθήκευση των παρατηρήσεων γίνεται:

- Σε συμβατικά καταγραφικά.
- Σε ηλεκτρονικό υπολογιστή.
- Σε ηλεκτρονικούς καταγραφείς δεδομένων (data loggers).

Σημαντική είναι επίσης η δυνατότητα τηλεμεταφοράς των δεδομένων, την οποία πλέον διαθέτουν οι περισσότεροι σταθμοί παρακολούθησης της ποιότητας του αέρα. Με τον τρόπο αυτό είναι δυνατή η αποστολή σε πραγματικό χρόνο των μετρήσεων από τον σταθμό μέτρησης σε κεντρική μονάδα έτσι ώστε να είναι άμεσα διαθέσιμα στους επιστήμονες που είναι επιφορτισμένοι με την παρακολούθηση της ποιότητας του αέρα.

Για την καλή και σωστή λειτουργία των συστημάτων καταγραφής απαιτείται τακτικός έλεγχος και συντήρηση. Ειδικότερα, για τους ηλεκτρονικούς υπολογιστές είναι απαραίτητη η συχνή δημιουργία αντιγράφων των αρχείων στα οποία αποθηκεύονται τα δεδομένα, ώστε, σε περίπτωση βλάβης του υπολογιστή, τα δεδομένα να εξακολουθούν να είναι διαθέσιμα.

Για τη συλλογή και αποθήκευση των μετρήσεων που αφορούν τη σύσταση της ατμόσφαιρας έχουν καθοριστεί από τους διεθνείς οργανισμούς (π.χ. πρόγραμμα Global Atmosphere Watch του World Meteorological Organization) συγκεκριμένα πρωτόκολλα μεταφοράς των δεδομένων, καθώς και συγκεκριμένοι τύποι αρχείων αποθήκευσης (netcdf, hdf, xml), ώστε να διευκολύνεται η άμεση ανταλλαγή και επεξεργασία των μετρήσεων.

### 8.3.3 Έλεγχος και αξιοπιστία των μετρήσεων

Για να είναι αξιόπιστες οι μετρήσεις των οργάνων ενός σταθμού παρακολούθησης της ποιότητας του ατμοσφαιρικού περιβάλλοντος, θα πρέπει, απαραίτητα να τηρούνται κοινά αποδεκτοί κανόνες που αφορούν τη λειτουργία και συντήρησή τους, οι οποίοι είναι:

- α. Τακτικός έλεγχος της σωστής λειτουργίας σύμφωνα με τις οδηγίες του κατασκευαστή,
- β. συντήρηση σε τακτά χρονικά διαστήματα, όπως καθορίζονται από την κατασκευάστρια εταιρεία,
- γ. τήρηση βιβλίου παρατηρήσεων από τον υπεύθυνο τεχνικό του σταθμού, στο οποίο καταγράφονται όλες οι πληροφορίες που αφορούν τη λειτουργία κάθε οργάνου (βλάβες, αλλαγές εξαρτημάτων, βαθμονομήσεις κτλ.),
- δ. περιοδική βαθμονόμηση των οργάνων.

### 8.3.4 Βαθμονόμηση οργάνων

Ανάλογα με το είδος των μετρήσεων και την αρχή λειτουργίας κάθε οργάνου, ακολουθείται διαφορετική διαδικασία σε ό,τι αφορά τη βαθμονόμησή του. Στη συνέχεια παρατίθενται συνοπτικά ορισμένα παραδείγματα βαθμονόμησης οργάνων που χρησιμοποιούνται σε σταθμούς μέτρησης αέριων ρύπων. Η αξιοπιστία των μετρήσεων των αναλυτών

εξασφαλίζεται με συχνές – ανά εβδομάδα – βαθμονομήσεις. Ανάλογα με το μετρούμενο ρύπο και την αρχή λειτουργίας του αναλυτή, η βαθμονόμησή του γίνεται ως εξής:

- α. Για το διοξείδιο του αζώτου (NO<sub>2</sub>), το διοξείδιο του θείου (SO<sub>2</sub>) και το υδρόθειο (H<sub>2</sub>S), με ειδικά φυσίγγια διαπερατότητας, τα οποία υπάρχουν στο εσωτερικό του αναλυτή.
- β. Για το όζον (O<sub>3</sub>), με γεννήτρια σταθερής συγκέντρωσης όζοντος. Η γεννήτρια, συνήθως, βρίσκεται και αυτή στο εσωτερικό του αναλυτή.
- γ. Για το μονοξείδιο του αζώτου (NO) και το μονοξείδιο του άνθρακα (CO), με φιάλες γνωστής συγκέντρωσης.

Παράλληλα, σε τακτά χρονικά διαστήματα, γίνονται έλεγχοι των επιμέρους τμημάτων (οπτικών ή ηλεκτρονικών) των αναλυτών για την πιστοποίηση της σωστής και αξιόπιστης λειτουργίας τους.

### **8.3.5 Επεξεργασία και παρουσίαση δεδομένων αέριας ρύπανσης**

#### **8.3.5.1 Σκοπός**

Για τη σωστή κατανόηση και αντιμετώπιση των προβλημάτων που σχετίζονται με τη ρύπανση του ατμοσφαιρικού περιβάλλοντος, πρέπει να γίνεται ταξινόμηση και επεξεργασία των μετρήσεων των αερίων ρύπων με τέτοιο τρόπο, ώστε να είναι δυνατόν να μπορούν να πραγματοποιηθούν οι εξής στόχοι:

- α. Να γίνεται έλεγχος των υπερβάσεων των ορίων επιφυλακής των ορίων λήψης έκτακτων μέτρων που θεσπίζονται είτε από τις τοπικές αρχές είτε από διεθνείς οργανισμούς, όπως η Ευρωπαϊκή Ένωση, ο Παγκόσμιος Οργανισμός Υγείας κ.ά.,
- β. να γίνουν κατανοητοί οι φυσικοί και χημικοί μηχανισμοί που συνθέτουν το πρόβλημα,
- γ. με βάση τους δύο προηγούμενους στόχους, να καθίσταται δυνατή η αντιμετώπιση του προβλήματος με επιστημονικά τεκμηριωμένες προτάσεις από την επιστημονική κοινότητα και από τις αρμόδιες υπηρεσίες.

Προς αυτή την κατεύθυνση έχουν καθιερωθεί συγκεκριμένοι τρόποι ταξινόμησης και επεξεργασίας, ανάλογα με το είδος του ρύπου.

#### **8.3.5.2 Χρονική κλίμακα επεξεργασίας**

Η επιλογή της χρονικής κλίμακας επεξεργασίας των μετρήσεων αέριας ρύπανσης εξαρτάται από τρεις κυρίως παράγοντες:

1. Τα όρια που έχουν τεθεί είτε από την πολιτεία είτε από υγειονομικούς οργανισμούς, τα οποία καθορίζουν τον ελάχιστο χρόνο εντός του οποίου η αυξημένη συγκέντρωση ενός ρύπου μπορεί να θεωρηθεί επικίνδυνη, και είναι διαφορετική για κάθε ρύπο.
2. Την ανθρώπινη δραστηριότητα και το πώς αυτή μεταβάλλεται κατά τη διάρκεια της ημέρας, αλλά και κατά τη διάρκεια του έτους. Για παράδειγμα, οι ώρες αιχμής της κυκλοφορίας ή οι ώρες, κατά τις οποίες συνήθως λειτουργούν οι κεντρικές θερμάνσεις, καθορίζουν, σε μεγάλο ποσοστό, την επιλογή της χρονικής κλίμακας.

3. Το πώς μεταβάλλονται – είτε περιοδικά είτε όχι – διάφοροι φυσικοί παράγοντες, όπως η θερμοκρασία, η ηλιοφάνεια κτλ, οι οποίοι επηρεάζουν έμμεσα ή άμεσα τις συγκεντρώσεις των ρύπων.

Για να μπορούμε, λοιπόν, να εξασφαλίσουμε τη σωστή επεξεργασία των μετρήσεων, θα πρέπει κατά τη διάρκεια καταγραφής των δεδομένων να επιλέξουμε την ελάχιστη χρονική κλίμακα που καθορίζεται από τους παραπάνω παράγοντες, ούτως ώστε να είναι δυνατή εκ των υστέρων η οποιαδήποτε επεξεργασία.

Σύμφωνα με τα παραπάνω, οι χρονικές κλίμακες επεξεργασίας είναι:

- α. 1-10 λεπτά,
- β. 1 ώρα,
- γ. 1 οκτώωρο,
- δ. 1 εβδομάδα,
- ε. 1 μήνας,
- στ. θερμή περίοδος - ψυχρή περίοδος,
- ζ. 1 έτος - μεταβολή μέσα στα χρόνια.

### 8.3.5.3 Στατιστική επεξεργασία μετρήσεων

Για την παρουσίαση και επεξεργασία των μετρήσεων, σύμφωνα με τις χρονικές κλίμακες που προαναφέρθηκαν, είναι απαραίτητη η στατιστική επεξεργασία των καταγραμμένων πρωτογενών δεδομένων (raw data). Η επεξεργασία αυτή περιλαμβάνει τον υπολογισμό διαφόρων στατιστικών μεγεθών που εναρμονίζονται με τις παραπάνω χρονικές κλίμακες και καθιστούν δυνατή την ερμηνεία, αξιολόγηση και κατανόηση των μετρήσεων.

Τα μεγέθη αυτά είναι τα εξής:

- α. Ο αριθμητικός μέσος,
- β. η τυπική απόκλιση,
- γ. η διάμεσος τιμή,
- δ. οι μέγιστες και ελάχιστες τιμές, τόσο σε στιγμιαίες μετρήσεις, όσο και σε ολοκληρωμένες τιμές (ωριαίες, μηνιαίες κτλ.),
- ε. οι κυλιόμενες μέσες τιμές, όπως, για παράδειγμα, η κυλιόμενη μέση τιμή οκταώρου,
- στ. η σύγκριση των παραπάνω μεγεθών με τα όρια επιφυλακής ή υπέρβασης για τον αριθμητικό προσδιορισμό των υπερβάσεων,
- ζ. ο υπολογισμός των μακροχρόνιων τάσεων στις συγκεντρώσεις των ρύπων,
- η. ο υπολογισμός των κανονικών τιμών (normals).

### 8.3.5.4 Παρουσίαση των μετρήσεων

Η παρουσίαση των μετρήσεων πρέπει να γίνεται με τέτοιο τρόπο, ώστε να είναι δυνατή η παροχή όλης της απαραίτητης πληροφορίας, τόσο όσον αφορά θέματα ελέγχου όσο και θέματα έρευνας. Γι' αυτό τον σκοπό, θα πρέπει να γίνεται με τέτοιο τρόπο, ώστε να

είναι εμφανή όλα τα στάδια της επεξεργασίας και να δηλώνονται όλοι οι παράγοντες που οδήγησαν στο παρουσιαζόμενο αποτέλεσμα. Μ' αυτόν τον τρόπο, είναι δυνατή η ερμηνεία και αξιολόγηση των μετρήσεων και των αποτελεσμάτων όχι μόνο από τους υπεύθυνους των σταθμών ελέγχου, αλλά και από άλλες υπηρεσίες, επιστήμονες κτλ.

Η ολοκληρωμένη παρουσίαση των μετρήσεων (report) θα πρέπει να γίνεται ανά τακτά χρονικά διαστήματα, έχοντας ήδη εξασφαλίσει και ελέγξει την ποιότητα των μετρήσεων με τη σωστή βαθμονόμηση και συντήρηση των οργάνων μέτρησης.

Η παρουσίαση αυτή πρέπει να περιλαμβάνει:

- α. περιγραφή των σταθμών, δηλαδή τοποθεσία, συνθήκες μέτρησης και γενικά πληροφορίες για την περιοχή (π.χ. αν είναι πάνω σε δρόμο, δίπλα σε κάποια βιοτεχνία κτλ.),
- β. πίνακες με όλες τις μετρήσεις έτσι όπως αυτές καταγράφονται, προτού υποστούν οποιαδήποτε επεξεργασία,
- γ. πίνακες με επεξεργασμένες τιμές σε όλες τις χρονικές κλίμακες που απαιτούνται,
- δ. πίνακες με στατιστικά στοιχεία κανονικής λειτουργίας των οργάνων,
- ε. πίνακες με στατιστικά των υπερβάσεων,
- στ. γραφικές παραστάσεις όλων των παραπάνω, ώστε να υπάρχει, με μια πρώτη προσέγγιση, μια εποπτική εικόνα της υπάρχουσας κατάστασης,
- ζ. τέλος, σε μια τέτοια παρουσίαση, θα πρέπει να συμπεριλαμβάνεται ένα μέρος, το οποίο θα περιγράφει τα συμπεράσματα που προκύπτουν από την επεξεργασία των μετρήσεων, αλλά και προτάσεις, τόσο για πιθανές λύσεις καταπολέμησης της ρύπανσης στις συγκεκριμένες περιοχές, όσο και προτάσεις βελτίωσης του τρόπου παρακολούθησης του προβλήματος (π.χ. εγκαθίδρυση νέων σταθμών, υιοθέτηση πιο σύγχρονης τεχνολογίας για αρτιότερη ποιότητα μετρήσεων κτλ.).

## 8.4 Σημαντικότεροι ρύποι του αέρα

Οι ρύποι στον αέρα μπορούν να ταξινομηθούν είτε σε αέριους ρύπους είτε σε αιωρούμενα υγρά ή/και στερεά σωματίδια. Επιπλέον, οι ρύποι μπορούν να ταξινομηθούν σε δύο γενικές κατηγορίες:

- α. Πρωτογενείς ρύποι: είναι αυτοί που εκπέμπονται απευθείας από τις πηγές.
- β. Δευτερογενείς ρύποι: παράγονται στον αέρα είτε από την αλληλεπίδραση δύο ή περισσοτέρων πρωτογενών ρύπων είτε από την αλληλεπίδραση πρωτογενών ρύπων με τα φυσικά συστατικά της ατμόσφαιρας.

Οι σημαντικότεροι αέριοι ρύποι περιγράφονται στις ακόλουθες υποενότητες.

### 8.4.1 Διοξείδιο του θείου (SO<sub>2</sub>)

Τη σημαντικότερη πηγή του διοξειδίου του θείου αποτελεί η καύση καυσίμων που εμπεριέχουν θείο. Τέτοια είναι το κάρβουνο, το μαζούτ (3% περιεκτικότητα) και το diesel (0.05%). Οι μηχανισμοί απομάκρυνσης του διοξειδίου του θείου από τον αέρα είναι η βροχή με τη μορφή θειούχων ενώσεων (π.χ. H<sub>2</sub>SO<sub>4</sub>) και η ξηρή εναπόθεση με τη μορφή αιωρημάτων. Το θείο δημιουργεί ένα μεγάλο αριθμό οξειδίων, αλλά μόνο το SO<sub>2</sub> και το SO<sub>3</sub> θεωρούνται σημαντικοί αέριοι ρύποι. Το διοξείδιο του θείου είναι άχρωμο αέριο με χαρακτηριστική οσμή. Θεωρείται επιβλαβές για το αναπνευστικό σύστημα.

#### 8.4.2 Οξείδια του αζώτου (NOx)

Τα οξείδια του αζώτου περιλαμβάνουν το μονοξείδιο του αζώτου (NO), το διοξείδιο του αζώτου (NO<sub>2</sub>), καθώς και άλλα οξείδια που δεν είναι σημαντικά για την αέρια ρύπανση. Το μονοξείδιο του αζώτου είναι άχρωμο και άοσμο. Παράγεται στη φύση από βιολογικές διεργασίες, καθώς και από διαδικασίες καύσης. Στον αέρα οξειδώνεται αστραπιαία από το ατμοσφαιρικό όζον, φωτοχημικές διεργασίες και, με πιο αργούς ρυθμούς, από το οξυγόνο, οπότε δημιουργείται το διοξείδιο του αζώτου. Το διοξείδιο του αζώτου είναι ένα κόκκινο-καφέ αέριο, με χαρακτηριστική ενοχλητική οσμή. Είναι ιδιαίτερα ενοχλητικό και διαβρωτικό, αλλά και καθοριστικής σημασίας για τις φωτοχημικές διεργασίες που ορίζουν τα επίπεδα της αέριας ρύπανσης μιας περιοχής.

#### 8.4.3 Όζον (O<sub>3</sub>)

Το όζον είναι ένα αέριο 1,6 φορές βαρύτερο από τον αέρα και ιδιαίτερα δραστικό. Παράγεται, κυρίως, σε μεγάλα ύψη, μέσω φωτοχημικών αντιδράσεων που συμπεριλαμβάνουν το μοριακό και το ατομικό οξυγόνο. Το όζον, καθώς και άλλοι οξειδωτικοί ρύποι, παράγεται και σε συνθήκες ρύπανσης της ατμόσφαιρας, ως αποτέλεσμα ενός πλήθους φωτοχημικών αντιδράσεων. Σε υψηλές συγκεντρώσεις είναι ιδιαίτερα ενοχλητικό για τα μάτια, καθώς και επιβλαβές για το αναπνευστικό σύστημα.

#### 8.4.4 Μονοξείδιο του άνθρακα

Το μονοξείδιο του άνθρακα είναι αέριο ελαφρύτερο από τον αέρα, άχρωμο και άοσμο. Είναι πολύ επικίνδυνο, καθώς μειώνει την ικανότητα του αίματος να μεταφέρει οξυγόνο στα κύτταρα. Το μονοξείδιο του άνθρακα είναι προϊόν της ατελούς καύσης ενώσεων του άνθρακα. Κύρια πηγή του είναι τα καύσιμα. Τα αυτοκίνητα αποτελούν με διαφορά τη μεγαλύτερη πηγή εκπομπής CO.

#### 8.4.5 Υδρογονάνθρακες πλην μεθανίου

Οι υδρογονάνθρακες που σχετίζονται με την αέρια ρύπανση χωρίζονται σε τέσσερις κατηγορίες: τα αλκάνια, τα αλκένια, τα αλκίνια και τους αρωματικούς υδρογονάνθρακες. Απο μόνους οι υδρογονάνθρακες που βρίσκονται στον αέρα δεν παρουσιάζουν ιδιαίτερη τοξικότητα. Είναι, όμως, πρωταρχικής σημασίας, λόγω της υψηλής φωτοχημικής τους δραστηριότητας, σε συνθήκες παρουσίας ηλιακού φωτός και οξειδίων του αζώτου, οπότε οδηγούν στην παραγωγή όζοντος. Ορισμένα από αυτά (π.χ. βενζόλιο) θεωρούνται καρκινογόνα. Επειδή το μεθάνιο παρουσιάζει πολύ μικρή φωτοχημική δραστηριότητα μετράται χωριστά από τους υπόλοιπους υδρογονάνθρακες.

#### 8.4.6 Αιωρούμενα σωματίδια

Με την ευρύτερη έννοια, θεωρούμε ως αιωρούμενα σωματίδια αυτά με διάμετρο μεταξύ 10<sup>-3</sup> μm και 100 μm. Ο χρόνος παραμονής των λεπτόκοκκων (fine) σωματιδίων στην ατμόσφαιρα είναι της τάξης των ολίγων ημερών, ενώ των χονδρόκοκκων (coarse) είναι μόνο λίγες ώρες, διότι απομακρύνονται πολύ γρήγορα λόγω καθίζησης ή λόγω βροχής. Τα μικρά σωματίδια δημιουργούνται από τη συμπύκνωση και πήξη αέριων ρύπων, ενώ τα μεγάλα σωματίδια παράγονται με μηχανικές διαδικασίες. Τα μικρά σωματίδια εισβάλλουν στο αναπνευστικό σύστημα και μπορούν να έχουν ιδιαίτερα επιβλαβείς επιπτώσεις στην υγεία. Σε έναν σταθμό παρακολούθησης της αέριας ρύπανσης μετρούνται κατά κανόνα οι συγκεντρώσεις των αιωρούμενων σωματιδίων με διάμετρο μικρότερη



των 10  $\mu\text{m}$  (ΑΣ10 ή PM10), τα οποία συμπεριλαμβάνουν τόσο τα μικρά όσο και τα μεγάλα αιωρούμενα σωματίδια που μπορούν να εισβάλλουν στο αναπνευστικό σύστημα, καθώς και τα σωματίδια με διάμετρο μικρότερη των 2,5  $\mu\text{m}$  (ΑΣ2.5 ή PM2.5), τα οποία συμπεριλαμβάνουν μόνο τα λεπτόκοκκα σωματίδια που παρουσιάζουν βαθύτερη διείσδυση στο αναπνευστικό σύστημα.

Στις επόμενες παραγράφους παρουσιάζονται τρόποι μέτρησης της συγκέντρωσης των κυριότερων ρύπων, καθώς και οι αρχές λειτουργίας των διατάξεων που χρησιμοποιούνται ευρέως σε έναν τυπικό σταθμό παρακολούθησης της ποιότητας του αέρα (Εικόνα 8.1).



**Εικόνα 8.1** Τυπικός σταθμός παρακολούθησης της ποιότητας του αέρα.

## 8.5 Μέτρηση του όζοντος

Προκειμένου να υπολογίσουμε τη συγκέντρωση του όζοντος σε ένα αέριο δείγμα, στηρίζομαστε στο γεγονός ότι το όζον απορροφά ηλιακό φως με μέγιστο απορρόφησης τα 253,7 nm, το οποίο αποτελεί επίσης και την κύρια γραμμή εκπομπής του υδράργυρου. Μία λάμπα υδραργύρου είναι τοποθετημένη στην άκρη ενός σωλήνα, ενώ στην άλλη άκρη του σωλήνα υπάρχει ανιχνευτής που μετράει την ένταση του φωτός της λάμπας στα 253,7 nm. Μέσα από τον σωλήνα περνάει ο αέρας, του οποίου θέλουμε να μετρήσουμε το περιεχόμενο σε όζον. Μία αντλία τραβάει τον αέρα μέσα στο όργανο μέσω σωλήνα από Teflon. Ανάμεσα στον σωλήνα Teflon και το οζονόμετρο παρεμβάλλεται φίλτρο από μεμβράνη Teflon για να εμποδίζεται η είσοδος σκόνης στο όργανο. Το φίλτρο αυτό πρέπει να αλλάζεται σε τακτικά διαστήματα, γιατί συσσωρεύεται πάνω του σκόνη που καταστρέφει το όζον. Επειδή υπάρχουν και άλλα συστατικά του αέρα που απορροφούν ακτινοβολία στην ίδια περιοχή που απορροφά το όζον, το όργανο κάνει πρώτα μια μέτρηση αναφοράς, κατά την οποία ο εισαγόμενος αέρας περνάει μέσα από φίλτρο που περιέχει  $\text{MnO}_2$  και καταστρέφει το όζον.

Με τη βοήθεια του νόμου των Beer-Lambert η συγκέντρωση του όζοντος θα δίνεται από τη σχέση:

$$[O_3] \text{ ppm} = (10^6/aL)\ln(I_0/I) \quad (8-2)$$

σε συνθήκες  $P_0$  και  $T_0$ , ενώ σε συνθήκες μέτρησης

$$[O_3] \text{ ppm} = (10^6/aL) \ln(I_0/I) (P_0 T / P T_0) \quad (8-3)$$

όπου:

$K = aL$ : σταθερά βαθμονόμησης,

$L$ : οπτικός δρόμος,

$a$ : διατομή απορρόφησης,

$I_0$ : η ένταση της υπεριώδους ακτινοβολίας που μετριέται στο θάλαμο μέτρησης, όταν το δείγμα αέρα δεν περιέχει όζον,

$I$ : η ένταση της υπεριώδους ακτινοβολίας από δείγμα αέρα που περιέχει το προς μέτρηση όζον.

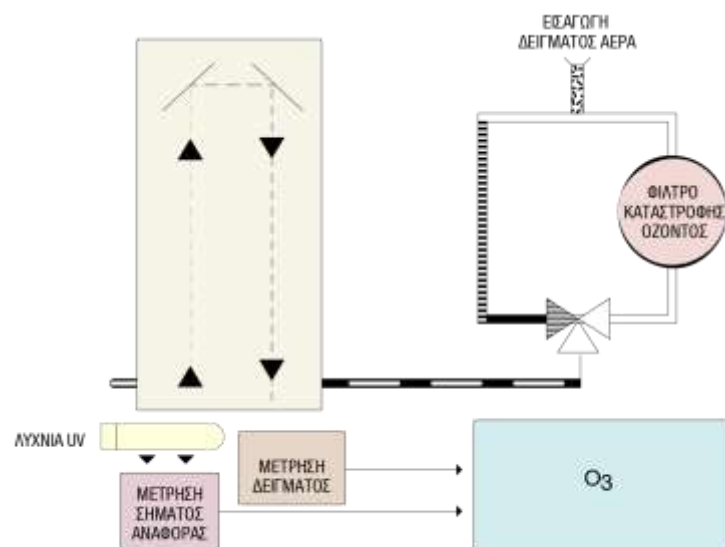
Οι μετρήσεις των  $I_0$  και  $I$  γίνονται κάτω από τις ίδιες συνθήκες, με τη βοήθεια ενός αισθητήρα της λάμπας που ελέγχει τυχόν διακυμάνσεις της έντασής της.

Η όλη διάταξη του οργάνου παρουσιάζεται στο σχήμα 8.2.

Ένας ενδεικτικός κύκλος μέτρησης έχει ως εξής:

- Διοχέτευση του δείγματος αέρα από ειδικό φίλτρο καταστροφής του όζοντος και αερισμός του θαλάμου μέτρησης για 4 δευτερόλεπτα,
- μέτρηση της  $I_0$ ,
- διοχέτευση του δείγματος αέρα απευθείας στον θάλαμο μέτρησης, παρακάμπτοντας το ειδικό φίλτρο καταστροφής του όζοντος, και αερισμός του θαλάμου μέτρησης για 4 δευτερόλεπτα,
- μέτρηση της  $I$ .

Ο όλος κύκλος διαρκεί περίπου 10 δευτερόλεπτα.



Σχήμα 8.2 Η διάταξη του αναλυτή όζοντος.

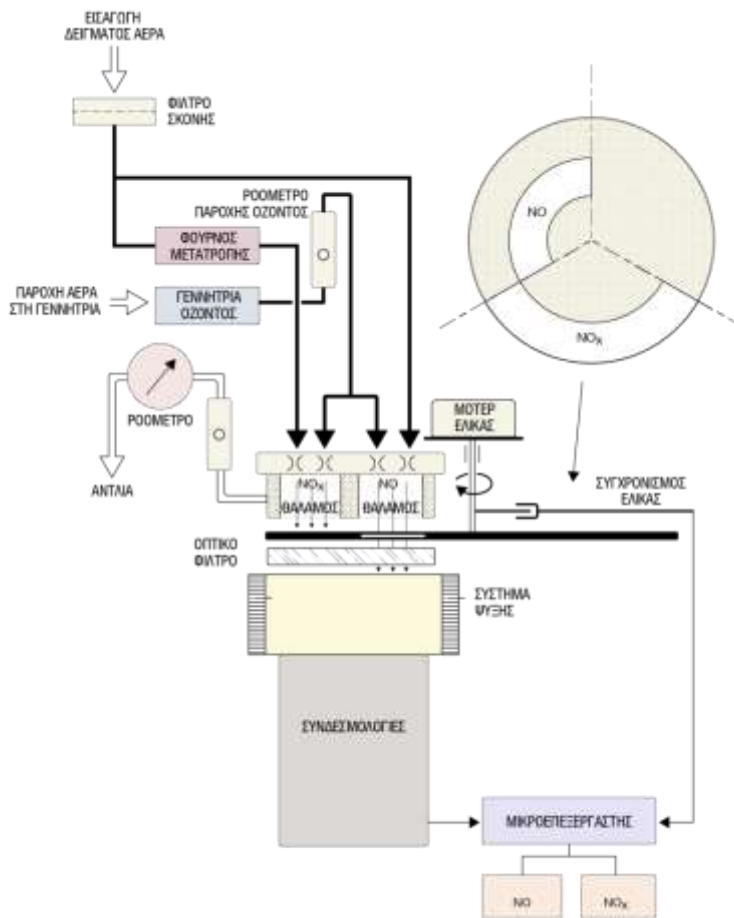
## 8.6 Μέτρηση των οξειδίων του αζώτου

Η ευρεία διάδοση των αυτόματων αναλυτών έχει καταστήσει τα όργανα αυτά την πιο συνηθισμένη μέθοδο μέτρησης των οξειδίων του αζώτου.

Το όργανο βασίζεται στη μέτρηση της συγκέντρωσης στον αέρα με τη μέθοδο της χημειοφωταύγειας. Αρχικά, το δείγμα εισάγεται σε σημείο όπου υπάρχει παροχή όζοντος. Με την αντίδραση του NO με το O<sub>3</sub> έχουμε παραγωγή NO<sub>2</sub> σε διεγερμένη κατάσταση, από την οποία επιστρέφει σε κατάσταση κανονικής ενέργειας με την εκπομπή ακτινοβολίας. Η ένταση της ακτινοβολίας συσχετίζεται από το όργανο με τη συγκέντρωση του NO. Η συγκέντρωση του NO<sub>2</sub> υπολογίζεται αφού το προϊόν της προηγούμενης διαδικασίας διασπάται σε NO και ακολουθεί την ίδια επεξεργασία. Η διαφορά της συγκέντρωσης της δεύτερης από την πρώτη διαδικασία είναι η ζητούμενη συγκέντρωση NO<sub>2</sub>.

Αναλυτικότερα, η διάταξη λειτουργεί ως εξής:

- Στον αναλυτή εισέρχεται δείγμα αέρα μέσω μιας αντλίας και οδηγείται παράλληλα σε δύο θαλάμους. Ο ένας είναι ο θάλαμος μετατροπής του NO<sub>2</sub> σε NO (NO<sub>x</sub> channel) και ο άλλος ο θάλαμος αντίδρασης του NO (NO channel). Στον θάλαμο αντίδρασης του NO διοχετεύεται όζον παραγόμενο από μία γεννήτρια όζοντος, η οποία βρίσκεται μέσα στον αναλυτή. Το NO του δείγματος του αέρα αντιδρά με το όζον και παράγεται από την αντίδραση αυτή NO<sub>2</sub> σε διεγερμένη κατάσταση, το οποίο αποδιεγειρόμενο εκπέμπει ακτινοβολία. Η ακτινοβολία αυτή ανιχνεύεται από τον φωτοπολλαπλασιαστή που βρίσκεται μέσα στον αναλυτή και είναι ανάλογη της συγκέντρωσης του NO.
- Στον θάλαμο μετατροπής τα μόρια του NO<sub>2</sub> που περιέχονται στο δείγμα αέρα μετατρέπονται σε NO, περνώντας από μετατροπέα μολυβδενίου υψηλής θερμοκρασίας. Στη συνέχεια, το NO οδηγείται σε δεύτερο θάλαμο αντίδρασης, όπου και εκεί διοχετεύεται όζον από τη γεννήτρια. Η συνολική ποσότητα του NO (NO παραγόμενο από το NO<sub>2</sub> και συνολικό NO στο δείγμα του αέρα) αντιδρά με το όζον, όπως στον προηγούμενο θάλαμο. Με την παραδοχή ότι μόνο το NO<sub>2</sub> από τα οξείδια του αζώτου δίνει μετατρέπομενο ικανοποιητική ποσότητα NO, η διαφορά των συγκεντρώσεων του NO, όπως μετρήθηκαν στους δύο θαλάμους, δίνει τη συγκέντρωση του NO<sub>2</sub> στο δείγμα του αέρα. Στην πραγματικότητα, στους εμπορικούς αναλυτές στο θάλαμο μετατροπής έχουμε και παράλληλη διάσπαση των PAN (peroxyacetyl nitrates, π.χ. -CH<sub>3</sub>COONO<sub>2</sub>) και HNO<sub>3</sub> σε NO, γεγονός που οδηγεί σε υπερτίμηση της συγκέντρωσης του NO<sub>2</sub> έως και 30%, ανάλογα με τα επίπεδα ρύπανσης. Οι νεότεροι αναλυτές ενσωματώνουν έναν επιπλέον μετατροπέα (blue light converter), ο οποίος απομακρύνει από το δείγμα τα PAN και το HNO<sub>3</sub>.
- Η ακτινοβολία φωταύγειας από τους δύο θαλάμους αντίδρασης ανιχνεύεται από τον ίδιο φωτοπολλαπλασιαστή υψηλής ευαισθησίας. Ένας ρότορας χωρισμένος σε τρεις τομείς περιστρέφεται με μεγάλη ταχύτητα μπροστά από τον φωτοπολλαπλασιαστή και επιτρέπει διαδοχικά τη λήψη σήματος από τον θάλαμο αντίδρασης του NO, από τον θάλαμο αντίδρασης των NO<sub>x</sub> και μηδενικού σήματος, πολλές φορές το δευτερόλεπτο. Το σήμα από τον φωτοπολλαπλασιαστή ενισχύεται και μετατρέπεται σε ψηφιακές τιμές από ένα μικροϋπολογιστή, ο οποίος υπολογίζει και τις μέσες τιμές των μετρήσεων. Η όλη διάταξη παρουσιάζεται στο σχήμα 8.3.



Σχήμα 8.3 Η διάταξη του αναλυτή οξειδίων του αζώτου.

## 8.7 Μετρήσεις διοξειδίου του θείου

### 8.7.1 Μέθοδος με αναλυτή υπεριώδους φθορισμού

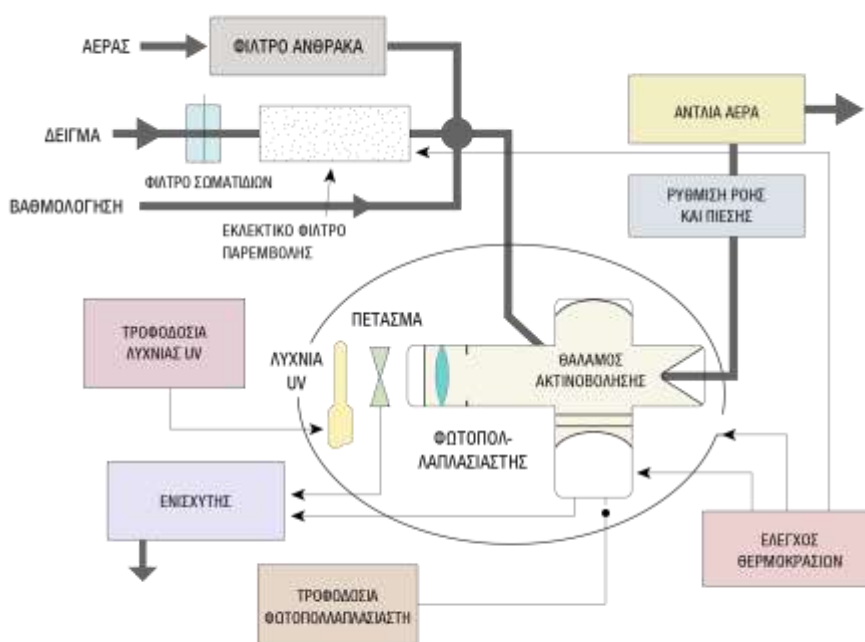
Το όργανο αυτό επιτρέπει λεπτομερή καταγραφή της συγκέντρωσης  $\text{SO}_2$  έως και ανά 10 λεπτά, καθώς και υπό τη μορφή μέσων ωριαίων συγκεντρώσεων. Δειγματοληψία και μέτρηση γίνονται συνεχώς με άντληση αέρα και προώθησή του στο εσωτερικό συσκευής που εκτελεί αυτόματα τη διαδικασία της μέτρησης. Αυτή πραγματοποιείται σε θάλαμο, όπου το δείγμα ακτινοβολείται από λάμπα υπεριώδους ακτινοβολίας στα μήκη κύματος απορρόφησης του  $\text{SO}_2$ , έτσι ώστε το  $\text{SO}_2$  μεταπίπτει σε διεγερμένη κατάσταση και αποδιεγείρεται μετά με φθορισμό, και ενώ το ρεύμα αέρα διέρχεται μπροστά από ανιχνευτή που καταγράφει την ένταση της ακτινοβολίας φθορισμού και, κατά συνέπεια, τη συγκέντρωση του διοξειδίου του θείου.

Η μέθοδος είναι αξιόπιστη και ακριβής σε μεγάλο βαθμό. Παράλληλα, αποτελεί το όργανο που χρησιμοποιείται σε οργανωμένους σταθμούς παρακολούθησης των συγκεντρώσεων  $\text{SO}_2$ .

Αναλυτικότερα, η λειτουργία του αναλυτή του διοξειδίου του θείου μπορεί να περιγραφεί ως εξής:

Το δείγμα αέρα διέρχεται μέσω ενός φίλτρου Teflon στον αναλυτή και, στη συνέχεια, περνά από ένα ειδικό φίλτρο άνθρακα για να εξαλειφθούν οι αρωματικοί υδρογονάνθρακες. Το φίλτρο αυτό συνίσταται από δύο ομοαξονικούς κυλίνδρους, από τους οποίους ο εσωτερικός αποτελείται από ειδικό πολυμερές σιλκόνης. Το δείγμα αέρα εισέρχεται σ' αυτόν τον εσωτερικό κύλινδρο. Τα μόρια των αρωματικών υδρογονανθράκων με απορρόφηση μεταφέρονται έξω από τον σωλήνα και, με τη χρήση μίας αντλίας, μειώνεται η μερική πίεση των αρωματικών συστατικών και έτσι τα μόριά τους διαφεύγουν στον εξωτερικό χώρο.

Το δείγμα, απαλλαγμένο πλέον από αρωματικά συστατικά, οδηγείται σε ένα θάλαμο αντίδρασης, όπου ακτινοβολείται με υπεριώδη ακτινοβολία 214 nm. Σ' αυτό το μήκος κύματος απορροφούν χαρακτηριστικά τα μόρια του διοξειδίου του θείου. Η αποδιέγερσή τους έχει ως αποτέλεσμα την εκπομπή ακτινοβολίας φθορισμού. Κάθε 40 sec πέφτει ένα πέτασμα για 40 sec ανάμεσα στη λάμπα υπεριώδους και στην είσοδο του θαλάμου αντίδρασης. Με αυτό τον τρόπο, ο ανιχνευτής (ένας φωτοπολλαπλασιαστής) «βλέπει» την αντίδραση φθορισμού για 40 sec και μηδενικό σήμα για 40 sec, το διάστημα δηλαδή που είναι κλειστό το πέτασμα. Το σήμα από τον φωτοπολλαπλασιαστή ενισχύεται και μετατρέπεται σε ψηφιακές τιμές από ένα μικροϋπολογιστή, ο οποίος υπολογίζει και τις μέσες τιμές των μετρήσεων. Η όλη διάταξη παρουσιάζεται στο σχήμα 8.4.



Σχήμα 8.4 Η διάταξη του αναλυτή διοξειδίου του θείου.

## 8.8 Μέτρηση του μονοξειδίου του άνθρακα

Το δείγμα του αέρα εισέρχεται στον αναλυτή και, πριν εισέλθει στο θάλαμο αντίδρασης, η ροή του ελέγχεται συνεχώς από ένα ροόμετρο. Για τη μέτρηση της συγκέντρωσης του CO, εκμεταλλευόμαστε το γεγονός ότι απορροφά στην υπέρυθη περιοχή του φάσματος. Γι' αυτό τον σκοπό, είναι απαραίτητη μια πηγή υπέρυθρης ακτινοβολίας. Η πηγή βρίσκεται μέσα στον αναλυτή και αποτελείται από ανθεκτικό σύρμα τυλιγμένο γύρω από ένα κεραμικό υλικό. Όταν επιτευχθεί μια συγκεκριμένη θερμοκρασία, η πηγή πα-

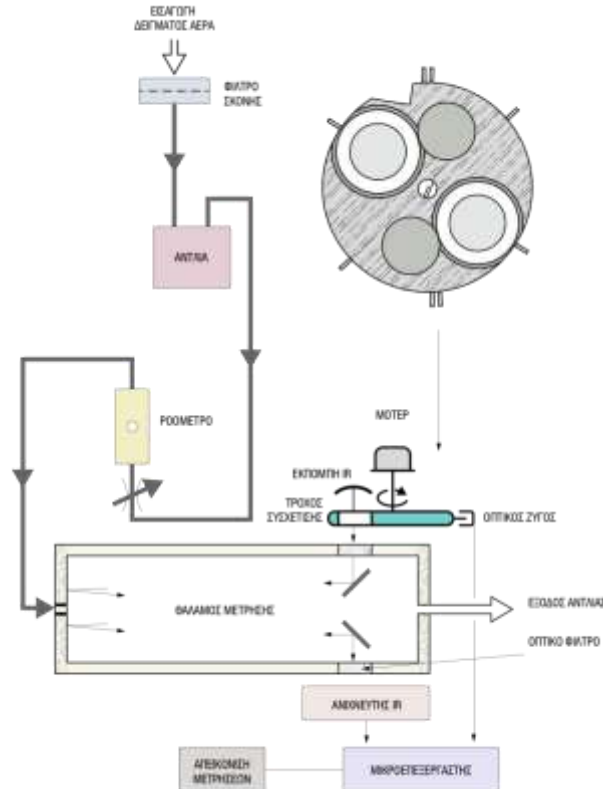
ράγει υπέρυθη ακτινοβολία εύρους μερικών  $\mu\text{m}$ . Η ακτινοβολία αυτή, πριν φτάσει σε έναν ανιχνευτή υπέρυθρης ακτινοβολίας, περνά μέσα από ένα τροχό συσχέτισης και ένα οπτικό φίλτρο των  $4,7 \mu\text{m}$ . Ο τροχός συσχέτισης φέρει δύο διαπερατούς στο υπέρυθρο θαλάμους και μια αδιαφανή περιοχή. Ο πρώτος θάλαμος περιέχει  $\text{N}_2$ , το οποίο δεν απορροφά την ακτινοβολία και ο δεύτερος περιέχει υψηλή συγκέντρωση  $\text{CO}$ , ο οποίος απορροφά όλες τις συχνότητες του φάσματος απορρόφησης του  $\text{CO}$  του προσπίπτοντος φωτός. Η υπέρυθη ακτινοβολία περνά πολλές φορές το δευτερόλεπτο από κάθε περιοχή του τροχού συσχέτισης και, στη συνέχεια, οδηγείται στον θάλαμο της μέτρησης, όπου η υπέρυθη ακτινοβολία υφίσταται πολλαπλές ανακλάσεις, ώστε να αυξηθεί η οπτική διαδρομή.

Με το πέρασμα από τις τρεις διαφορετικές περιοχές του τροχού, έχουμε:

- Μέτρηση μηδενός: Το πέρασμα από την αδιαφανή περιοχή αντιστοιχεί σε μηδενισμό της υπέρυθρης ακτινοβολίας και δίνει μηδενικό σήμα.
- Μέτρηση σήματος: Το πέρασμα από το θάλαμο  $\text{N}_2$  δίνει το σήμα μέτρησης, το οποίο λαμβάνει ο ανιχνευτής, εξαιτίας της συγκέντρωσης του  $\text{CO}$  που βρίσκεται στον οπτικό δρόμο της δέσμης.
- Μέτρηση σήματος αναφοράς: Το πέρασμα από το θάλαμο υψηλής συγκέντρωσης  $\text{CO}$  αντιστοιχεί σε σήμα αναφοράς, αφού απορροφώνται πλήρως όλες οι χαρακτηριστικές φασματικές γραμμές του μονοξειδίου του άνθρακα.

Η διαφορά του σήματος και του σήματος αναφοράς είναι ανάλογη της συγκέντρωσης του  $\text{CO}$  στο δείγμα αέρα.

Η διάταξη του οργάνου παρουσιάζεται στο σχήμα 8.5.



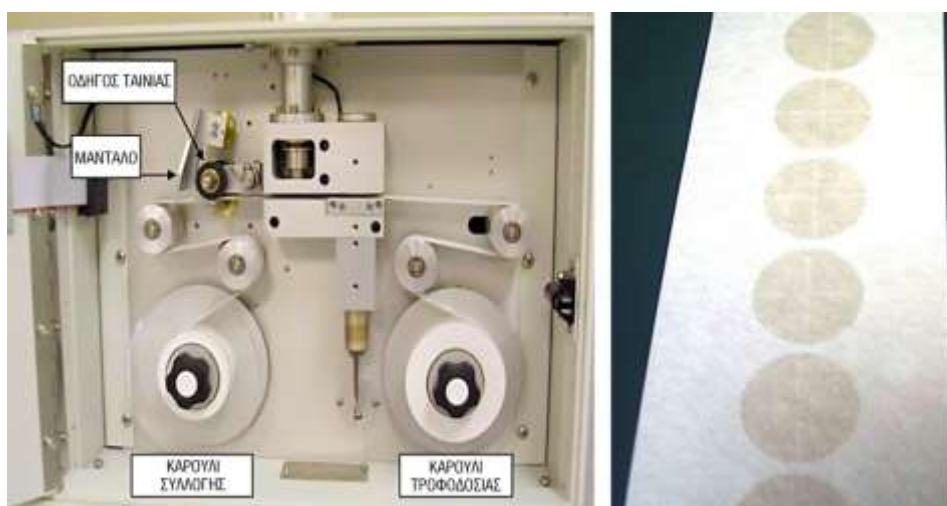
Σχήμα 8.5 Ο αναλυτής μονοξειδίου του άνθρακα.

## 8.9 Τεχνολογία μέτρησης των αιωρούμενων σωματιδίων

Η τεχνολογία μέτρησης της συγκέντρωσης, των οπτικών, χημικών και μικροφυσικών ιδιοτήτων των αιωρούμενων σωματιδίων παρουσιάζει μεγάλη πολυπλοκότητα και πλήθος διαφορετικών προσεγγίσεων και διατάξεων. Η πολυπλοκότητα αυτή οφείλεται στο γεγονός ότι τα αιωρούμενα σωματίδια παρουσιάζουν μεγάλες διακυμάνσεις όσον αφορά το μέγεθός τους, το σχήμα τους, τις οπτικές τους ιδιότητες, καθώς και μεγάλη ανομοιομορφία όσον αφορά τη χημική τους σύσταση. Ως εκ τούτου, μια πλήρης καταγραφή της τεχνολογίας που έχει αναπτυχθεί για την παρακολούθηση της σωματιδιακής ρύπανσης δεν είναι δυνατή στο πλαίσιο του παρόντος εισαγωγικού συγγράμματος, οπότε ο αναγνώστης παραπέμπεται στην εξειδικευμένη βιβλιογραφία. Στη συγκεκριμένη ενότητα θα αναφερθούμε στις πλέον βασικές διατάξεις και σε αυτές που είναι υποχρεωτικές σε έναν σταθμό παρακολούθησης της ποιότητας του αέρα.

### 8.9.1 Μέτρηση της συγκέντρωσης αιωρούμενων σωματιδίων ΑΣ10 και ΑΣ2.5 με τη χρήση ακτινοβολίας β

Το όργανο επιτρέπει αυτόματη παρακολούθηση της τιμής της συγκέντρωσης μάζας αιωρούμενων σωματιδίων διαμέτρου μικρότερης των 10 $\mu\text{m}$  (ΑΣ10) ή αιωρούμενων σωματιδίων διαμέτρου μικρότερης των 2,5 $\mu\text{m}$  (ΑΣ2.5), ανάλογα με την κεφαλή που θα τοποθετηθεί στη σχισμή εισόδου της διάταξης. Η διάταξη απεικονίζεται στην εικόνα 8.2. Η διάταξη περιλαμβάνει ένα αυτόματο μηχανικό σύστημα το οποίο ανά τακτά χρονικά διαστήματα κινεί ένα ρολό ταινίας φίλτρου διαμέσου ενός αγωγού με τον οποίον αντλείται ο ατμοσφαιρικός αέρας. Μετά τη συλλογή ικανής μάζας δείγματος στο φίλτρο αυτό, μετακινείται στο σημείο όπου βρίσκεται ραδιενεργό υλικό που εκπέμπει β ακτινοβολία. Ακριβώς από πάνω υπάρχει μετρητής Geiger-Muller. Πραγματοποιούνται δύο μετρήσεις: με το φίλτρο καθαρό και με το φίλτρο μετά από τη δειγματοληψία από την ατμόσφαιρα. Η εξασθένιση στην ένταση της ακτινοβολίας που ανιχνεύεται είναι ακριβώς ανάλογη της σωματιδιακής μάζας και, επομένως, της συγκέντρωσης. Η αναγωγή γίνεται με βάση τη βαθμονόμηση που παρέχεται από τον κατασκευαστή. Το ραδιενεργό υλικό είναι C-14 και η μέτρηση είναι ανεξάρτητη από το μέγεθος και τη χημική σύσταση του δείγματος.



**Εικόνα 8.2** Συσκευή δειγματοληψίας ολικής συγκέντρωσης σωματιδίων με τη μέθοδο β ραδιενεργού ακτινοβολίας (αριστερά παρουσιάζεται η συσκευή και δεξιά το φίλτρο δειγματοληψίας).

### 8.9.2 Συσκευές συλλογής με φίλτρο

Η ευρύτερα χρησιμοποιούμενη μέθοδος δειγματοληψίας σωματιδίων από τον αέρα είναι αυτή της συλλογής τους σε κάποιο φίλτρο. Η απλούστερη συσκευή είναι η κασέτα φίλτρου. Η διάταξη δειγματοληψίας αποτελείται από την κασέτα φίλτρου, μία αντλία και ένα ογκόμετρο ή ροόμετρο. Η κασέτα φίλτρου είναι μία μονάδα με είσοδο του αέρα τέτοια, ώστε να διαπερνά το φίλτρο για την κατακράτηση των σωματιδίων και να επιτρέπει την έξοδό του στα μετέπειτα στάδια της διάταξης. Μετά από τη χρήση το φίλτρο αφαιρείται και μεταφέρεται για ζύγιση, εφόσον ο σκοπός της δειγματοληψίας είναι η μέτρηση της ολικής συγκέντρωσης των σωματιδίων, ή για χημική ανάλυση, εάν ενδιαφέρει η συγκέντρωση ενός ή περισσότερων συστατικών του αερολύματος. Η μέτρηση με ζύγιση προϋποθέτει ότι το φίλτρο ζυγίζεται και πριν τη δειγματοληψία. Η τιμή της συγκέντρωσης προκύπτει διαιρώντας τη σωματιδιακή μάζα με τον ολικό όγκο αέρα που αντλήθηκε. Η εξελιγμένη τεχνολογία που έχει αναπτυχθεί καθιστά δυνατή την αυτοματοποίηση της δειγματοληψίας σε έως και 16 κασετίνες.

### 8.9.3 Συσκευή συλλογής ΑΣ10 υψηλής παροχής

Το όργανο αυτό χρησιμοποιείται για τη μέτρηση της μερικής συγκέντρωσης αερολύματος κάτω από 10  $\mu\text{m}$ . Το όριο αυτό προέκυψε από την Υπηρεσία Προστασίας Περιβάλλοντος των ΗΠΑ. (Environmental Protection Agency – EPA) ως η μέγιστη διάμετρος σωματιδίων που συνδέονται με προβλήματα ρύπανσης.

Η συσκευή αποτελείται από δύο μέρη (εικόνα 8.3). Το πρώτο είναι η διάταξη διαχωρισμού του δείγματος σε δύο κατηγορίες μεγεθών. Αυτή των σωματιδίων με αεροδυναμική διάμετρο μεγαλύτερη των 10  $\mu\text{m}$ , τα οποία κατακρατούνται με διαδοχικές προσκρούσεις σε ειδικές για τον σκοπό αυτό κυβελίδες, και αυτά μικρότερου μεγέθους που συνεχίζουν την πορεία τους στο δεύτερο τμήμα.



**Εικόνα 8.3** Δειγματολήπτης ολικής συγκέντρωσης σωματιδίων με κεφαλή PM10.



Εκεί συλλέγονται στην επιφάνεια φίλτρου υαλονημάτων. Το τελευταίο προσαρμόζεται σε πλαίσιο, το οποίο εφαρμόζει στην κεφαλή του στομίου αντλίας αέρα. Η αντλία έχει παροχή 40 κυβικών ποδιών ανά λεπτό και η ροή της διατηρείται σταθερή με τη βοήθεια ηλεκτρονικής συσκευής ελέγχου ροής. Η συσκευή χρησιμοποιείται ευρέως τα τελευταία τριάντα χρόνια και αποδίδει αντιπροσωπευτική τιμή της συγκέντρωσης μάζας αερολύματος για μεγέθη κάτω από 10  $\mu\text{m}$ .

#### 8.9.4 Αιθαλόμετρο

Η συσκευή αυτή χρησιμοποιείται για τη μέτρηση του συντελεστή απορρόφησης του μαύρου άνθρακα στο δείγμα αερολύματος και βασίζεται στην απορρόφηση της ακτινοβολίας που εκπέμπεται από μια φωτεινή πηγή από το στοιχειακό άνθρακα, με διαδικασία αντίστοιχη αυτής που χρησιμοποιείται για τη μέτρηση της συγκέντρωσης των ΑΣ10 και ΑΣ2.5 μέσω της εξασθένησης της ακτινοβολίας  $\beta$  (εικόνα 8.4). Έτσι, η εξασθένηση της ακτινοβολίας σε ένα συγκεκριμένο μήκος κύματος από το δείγμα ανάγεται σε συγκέντρωση υλικού που απορροφά το φως και το οποίο θεωρείται ότι είναι ο μαύρος άνθρακας. Η βαθμονόμηση παρέχεται από τον κατασκευαστή. Πιο εξελιγμένες διατάξεις παρέχουν τη δυνατότητα προσδιορισμού του συντελεστή εξασθένησης της ακτινοβολίας από τον μαύρο άνθρακα σε παραπάνω από ένα μήκη κύματος, γεγονός που επιτρέπει τον περαιτέρω χαρακτηρισμό της πηγής εκπομπής του μαύρου άνθρακα.



**Εικόνα 8.4** Διάταξη αιθαλόμετρου για τη μέτρηση του μαύρου άνθρακα.

#### 8.9.5 Νεφελόμετρο

Το νεφελόμετρο είναι ένα όργανο που χρησιμοποιείται για τη μέτρηση της σκεδαζόμενης ακτινοβολίας από τα αιωρούμενα σωματίδια (συντελεστής σκέδασης) και αποτελεί έμμεσο τρόπο για τη μέτρηση της συγκέντρωσης των αιωρούμενων σωματιδίων στην ατμόσφαιρα. Αποτελείται από μία λυχνία (πηγή φωτός), έναν ανιχνευτή φωτός (τοποθετημένο σε γωνία 90ο) για την παρακολούθηση του σκεδαζόμενου φωτός και έναν ανιχνευτή εκπεμπόμενου φωτός. Με το όργανο αυτό υπολογίζεται η πυκνότητα των σωματιδίων ως συνάρτηση της σκεδαζόμενης ακτινοβολίας που καταλήγει στον ανιχνευτή.

### 8.9.6 Μετρητής συμπύκνωσης σωματιδίων (Condensation Particle Counter)

Η διάταξη μετρά σωματίδια με διάμετρο από λίγα nm μέχρι περίπου ένα  $\mu\text{m}$ . Επειδή η μέτρηση των πολύ μικρών σωματιδίων (υπέρλεπτων) αποτελεί μια επίπονη διαδικασία, στη μέθοδο αυτή η διάμετρος των σωματιδίων αυξάνεται πριν τον εντοπισμό τους, με διαδικασίες ελεγχόμενης συμπύκνωσης. Χρησιμοποιούνται μέθοδοι εξασθένησης φωτός από τον όγκο του δείγματος, ώστε τελικά να είμαστε σε θέση να εκτιμήσουμε την αριθμητική συγκέντρωση των αερολυμάτων.

### 8.9.7 Φασματογράφος μεγέθους των σωματιδίων (Scanning Mobility Particle Size Spectrometer – SMPS)

Τα μεγάλα σωματίδια απομακρύνονται από το δείγμα και τα υπόλοιπα θερμαίνονται, ώστε η υγρασία να είναι μικρότερη από 40%, και κατόπιν φορτίζονται από ένα διπολικό φορτιστή. Τα φορτισμένα σωματίδια διαχωρίζονται λόγω της διαφορετικής ηλεκτρικής τους κινητικότητας, η οποία εξαρτάται από το ιξώδες του αέρα, τον αριθμό των φορτιών και το μέγεθος και σχήμα των σωματιδίων.



Εικόνα 8.5 Φασματογράφος μεγέθους των σωματιδίων (IfT Leipzig, Germany).

### Βιβλιογραφία Ελληνική

Γεντεκάκης, Ι. (2010). *Ατμοσφαιρική ρύπανση, επιπτώσεις, έλεγχος και εναλλακτικές τεχνολογίες*. Εκδόσεις Κλειδάριθμος, ISBN 978-960-461-394-6.

- ΕΚΠΙΑΑ (2009). *Ελλάδα, η κατάσταση του Περιβάλλοντος το 2008*.  
[http://moper.ncsd.gr/files/Ellada\\_i\\_katastasi\\_tou\\_perivallontos.pdf](http://moper.ncsd.gr/files/Ellada_i_katastasi_tou_perivallontos.pdf)
- Περιφέρεια Κεντρικής Μακεδονίας, 2014. *Έκθεση Ατμοσφαιρικής Ρύπανσης 2013*.  
<http://envrypoi.pkm.gov.gr/reports/%CE%95%CE%BA%CE%B8%CE%B5%CF%83%CE%B7%202013%20%CE%A0%CE%9A%CE%9C.pdf>
- Ραφομανίκης, Σ. Χ. και Καστρινάκης, Ε.Γ. *Βασικές αρχές αντιρρυπαντικής τεχνολογίας ατμοσφαιρικών ρύπων*. Εκδόσεις Τζιόλα, 2009. - 364σ.
- ΥΠΕΚΑ, 2015. *Ετήσια έκθεση Ατμοσφαιρικής Ρύπανσης 2014*.  
<http://www.ypeka.gr/LinkClick.aspx?fileticket=GFJ1ricni7Q%3d&tabid=490&language=el-GR>

### Αγγλική

- Baron, P. & Willeke, K. (2005). *Aerosol measurement, Principles, Techniques and Applications*. Wiley and Sons, ISBN13 978-0-471-78492-0.
- Heard D. (2006). *Analytical Techniques for Atmospheric Measurement*. Blackwell Publishing, ISBN, 1-4051-2357-5.
- Hinds W. (1999). *Aerosol Technology, Properties, Behavior, and Measurement of Airborne Particles*. Wiley and Sons, ISBN 0-471-19410-7.
- Schnelle, K.B. (2002). *Air pollution control technology handbook* (Mechanical engineering handbook series). CRC Press.
- Vallero D. (2007). *Fundamentals of Air Pollution*. Academic Press, Inc. 936 pp.

## ΚΕΦΑΛΑΙΟ 9: ΜΕΤΡΗΣΕΙΣ ΑΝΩΤΕΡΗΣ ΑΤΜΟΣΦΑΙΡΑΣ ΚΑΙ ΜΕΤΡΗΣΕΙΣ ΚΑΘ' ΎΨΟΣ

### Σύνοψη

Η μέτρηση της κατακόρυφης κατανομής των ατμοσφαιρικών μεταβλητών γίνεται είτε επιτόπια είτε με τηλεπισκόπηση. Ιδιαίτερη προσοχή αφιερώνεται στην παρουσίαση της ραδιοβολίδας που αποτελεί το σημαντικότερο σύστημα για επιτόπιες μετρήσεις. Στη συνέχεια παρουσιάζονται τα γενικά χαρακτηριστικά των δέσμιων αεροστάτων τα οποία δίνουν τη δυνατότητα για πιο λεπτομερείς μετρήσεις στο κατώτερο χιλιόμετρο της τροπόσφαιρας. Οι οζοντοβολίδες χρησιμοποιούνται για τον προσδιορισμό της κατακόρυφης κατανομής του όζοντος. Τέλος παρουσιάζονται οι σημαντικότερες διατάξεις επίγειας τηλεπισκόπησης (ακουστικό ραντάρ και Doppler LIDAR).

### Γενικά

Για τη μέτρηση καθ' ύψος των μετεωρολογικών μεταβλητών και της σύστασης της ατμόσφαιρας έχουν αναπτυχθεί ειδικές τεχνικές. Στην κατώτερη τροπόσφαιρα, και ειδικά μέσα στο Ατμοσφαιρικό Οριακό στρώμα, οι απαιτήσεις είναι αυξημένες, καθώς υπάρχει η ανάγκη οι μετρήσεις αυτές να πραγματοποιούνται με υψηλή χωρική και χρονική ανάλυση.

Ιδιαίτερα σημαντικός στη μετεωρολογία είναι ο όρος «μετρήσεις της ανώτερης ατμόσφαιρας», με τον οποίο περιγράφονται οι μετρήσεις που πραγματοποιούνται στην ελεύθερη ατμόσφαιρα (γενικά, σε ύψη μεγαλύτερα της κορυφής του Ατμοσφαιρικού Οριακού Στρώματος). Οι μετρήσεις αυτές πραγματοποιούνται στους σταθμούς ανώτερης ατμόσφαιρας (εικόνα 9.1).

Όπως αναλύθηκε στο κεφάλαιο 1, υπάρχουν σήμερα πολλές πλατφόρμες, αλλά και τεχνολογίες, για τη μέτρηση των μετεωρολογικών μεταβλητών, καθώς και της σύστασης της ατμόσφαιρας σε μεγαλύτερα ύψη. Οι μετρήσεις διακρίνονται σε δύο ευρείες κατηγορίες:

1. Επιτόπιες μετρήσεις με ελεύθερα ή δέσμια μπαλόνια, καθώς και μετρήσεις με τη βοήθεια αεροσκάφους. Στην περίπτωση αυτή οι αισθητήρες έχουν τοποθετηθεί στην αντίστοιχη πλατφόρμα και η συλλογή των μετρήσεων γίνεται είτε τοπικά είτε με τηλεμεταφορά σε έναν σταθμό εδάφους. Χαρακτηριστικά παραδείγματα τέτοιων διατάξεων είναι η ραδιοβολίδα και το δέσμιο αερόστατο.
2. Μετρήσεις με διατάξεις τηλεπισκόπησης, όπως είναι τα ραντάρ καιρού, τα ακουστικά ραντάρ, τα LIDAR, καθώς και οι τεχνικές δορυφορικής τηλεπισκόπησης.

Στο κεφάλαιο αυτό θα παρουσιάσουμε ορισμένα από τα σημαντικότερα συστήματα μετρήσεων καθ' ύψος. Στο κεφάλαιο 6 παρουσιάστηκαν τα ραντάρ βροχής, ενώ τα LIDAR παρουσιάζονται στο κεφάλαιο 10.

### 9.1 Ραδιοβολίδα (radiosonde)

#### 9.1.1 Γενικά

Η ραδιοβολίδα είναι ένα όργανο που προορίζεται για να μεταφέρεται διαμέσου της ατμόσφαιρας από ένα μπαλόνι (εικόνα 9.2 και 9.3). Η ραδιοβολίδα είναι εξοπλισμένη με

συσκευές για τη μέτρηση ενός ή περισσότερων μετεωρολογικών μεταβλητών (συνήθως πίεση, θερμοκρασία και υγρασία). Έχουν, επίσης, σχεδιαστεί ειδικά πακέτα οργάνων για τη μέτρηση της ηλιακής και της γήινης ακτινοβολίας, της συγκέντρωσης του όζοντος, της βαθμίδας ηλεκτρικού δυναμικού, της αγωγιμότητας του αέρα και της ραδιενέργειας της ατμόσφαιρας. Οι οριζόντιοι άνεμοι μετρούνται με την παρακολούθηση του συστήματος της ραδιοβολίδας μέσω κάποιου συστήματος ανίχνευσης (π.χ. ραντάρ) ή, ακόμη, η συσκευασία μπορεί να προσδιορίσει και να αναφέρει τη δική της θέση, χρησιμοποιώντας ένα από τα πολλά βοηθήματα πλοήγησης που υπάρχουν (π.χ. GPS). Η ταχύτητα του ανέμου υπολογίζεται από τη μετακίνηση της θέσης της ραδιοβολίδας ανά μονάδα χρόνου.

Μία παραλλαγή της παραπάνω διάταξης είναι η ραδιοβολίδα με αλεξίπτωτο (dropsonde). Η ραδιοβολίδα αυτή είναι εξοπλισμένη με αλεξίπτωτο (εικόνα 9.4) και, αντί να μεταφέρεται ψηλά από ένα μπαλόνι, αφήνεται να πέσει από ένα αεροσκάφος. Η ταχύτητα καθόδου είναι περίπου  $\sim 28$  m/s σε ύψος 10 km και μειώνεται σε 11,5 m/s κοντά στην επιφάνεια της θάλασσας, στέλνοντας ατμοσφαιρικές μετρήσεις κάθε λίγα δευτερόλεπτα. Οι ραδιοβολίδες με αλεξίπτωτο χρησιμοποιούνται, κυρίως, πάνω από τους ωκεανούς, όπου υπάρχουν πολύ λίγοι σταθμοί επιφάνειας για την εκτόξευση ραδιοβολίδων με μπαλόνι.

Οι ραδιοβολίδες είναι εφοδιασμένες με έναν ραδιοφωνικό πομπό για την αποστολή των πληροφοριών στον σταθμό παρατήρησης. Οι διαθέσιμες ζώνες ραδιοσυχνοτήτων είναι 400,15-406 MHz και 1.668,4 – 1.700 MHz. Η επιλογή της ραδιοσυχνότητας για ραδιοβολίσεις σε μια δεδομένη τοποθεσία εξαρτάται από διάφορους παράγοντες. Σε περιοχές όπου εμφανίζονται συχνά ισχυροί άνεμοι ανώτερης ατμόσφαιρας, επιλέγεται συνήθως η ζώνη των 400 MHz, γιατί είναι σημαντική μια καλή επικοινωνιακή σύνδεση της ραδιοβολίδας με το επίγειο σύστημα. Όταν οι άνεμοι ανώτερης ατμόσφαιρας δεν είναι τόσο ισχυροί, η επιλογή της συχνότητας βασίζεται συνήθως στη μέθοδο μέτρησης του ανώτερου ανέμου. Η ζώνη συχνοτήτων των 400 MHz χρησιμοποιείται συνήθως σε συστήματα, όπου για τον υπολογισμό του ανέμου χρησιμοποιείται κάποιο βοήθημα πλοήγησης (π.χ. GPS), ενώ η ζώνη συχνοτήτων των 1.680 MHz, όταν χρησιμοποιούνται ραντάρ εντοπισμού ή ραδιοθεοδόλιχος (μετρά το αζιμούθιο και το ύψος των μετεωρολογικών αερόστατων που είναι εφοδιασμένα με πομπό). Σε κάθε περίπτωση, κάθε οργανισμός που σχεδιάζει να πετάξει ραδιοβολίδες πρέπει να ελέγξει ότι οι κατάλληλες ραδιοσυχνότητες είναι διαθέσιμες προς χρήση.

Ο Παγκόσμιος Μετεωρολογικός Οργανισμός (World Meteorological Organization, WMO) συντονίζει τις διεθνείς δραστηριότητες για την παρατήρηση του καιρού και καθορίζει τα πρότυπα για τις μετρήσεις. Οι μετρήσεις γίνονται ταυτόχρονα σε όλο τον κόσμο. Υπάρχει διεθνής συμφωνία έτσι, ώστε να χρησιμοποιείται ως αναφορά ο Συγχρονισμένος Παγκόσμιος Χρόνος (Coordinated Universal Time, UTC). Ο UTC έχει αντικαταστήσει την Ωρα Γκρίνουιτς (Greenwich Mean Time, GMT, ώρα του 1ου μεσημβρινού).

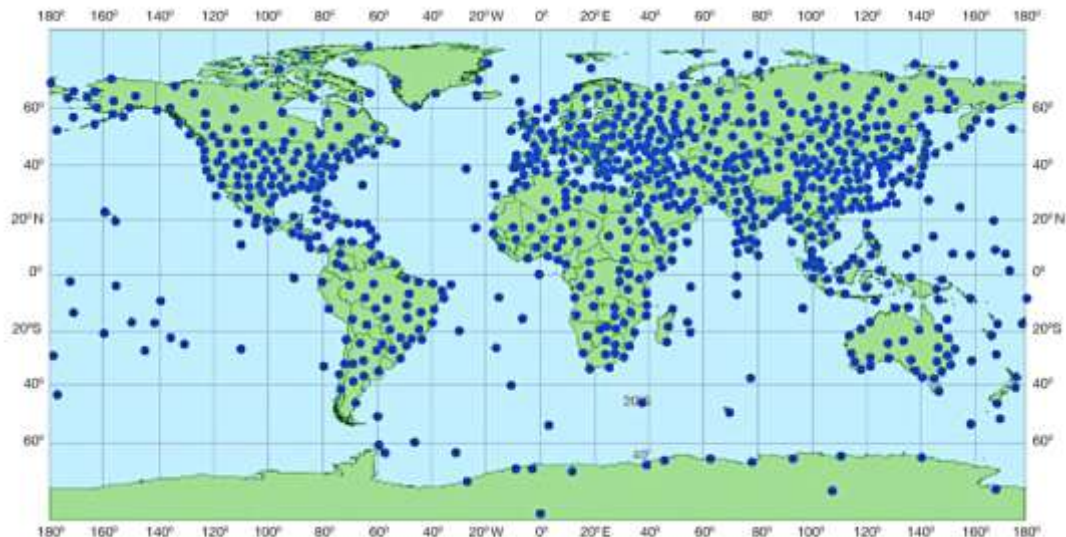
Ο μεγαλύτερος αριθμός από ραδιοβολίσεις πραγματοποιείται καθημερινά στις 00 και 12 UTC. Σε μερικούς σταθμούς γίνονται ραδιοβολίσεις και στις 06 και 18 UTC. Για την Ελλάδα, η τοπική ώρα (LST) των παρατηρήσεων προκύπτει προσθέτοντας δύο ώρες στα παραπάνω (LST=UTC+2). Κατά την περίοδο που ισχύει η θερινή ώρα προστίθενται τρεις ώρες.

### 9.1.2 Ιστορικά στοιχεία

Οι πρώτες πτήσεις διατάξεων για ατμοσφαιρικές μετρήσεις έγιναν κατά το δεύτερο μισό του 19ου αιώνα με χαρταετούς, στους οποίους ήταν προσδεμένοι μετεωγράφοι (συσκευές μέτρησης και καταγραφής της πίεσης και της θερμοκρασίας). Οι χαρταετοί συνδέονταν με το έδαφος με καλώδιο και η λειτουργία τους αποδείχθηκε ότι είναι δύσκολη, ιδιαίτερα σε συνθήκες υψηλών ανέμων.

Η πρώτη αληθινή ραδιοβολίδα που έστειλε ακριβή κωδικοποιημένη τηλεμεταφορά από μετεωρολογικούς αισθητήρες εφευρέθηκε στη Γαλλία από τον Robert Bureau, ο οποίος επινόησε το όνομα "radiosonde" (ραδιοβόλιση) και πέταξε το πρώτο όργανο στις 7 Ιανουαρίου 1929.

Ο τρέχων τύπος της ραδιοβολίδας χρονολογείται από τον Ιανουάριο του 1930, όταν ο Pavel A. Molchanov, ένας Ρώσος μετεωρολόγος, έκανε μια επιτυχημένη μέτρηση με βολίδα στη στρατόσφαιρα. Αυτή η ραδιοβόλιση έγινε στο Pavlovsk. Στόχος του ήταν να αναπτυχθεί ένα φτηνό και αναλώσιμο μέσο για τη μέτρηση καθ' ύψος στην ατμόσφαιρα της θερμοκρασίας, της υγρασίας και του ανέμου.



**Εικόνα 9.1** Χάρτης στον οποίο εμφανίζονται οι θέσεις των σταθμών ανώτερης ατμόσφαιρας.

### 9.1.3 Εξαρτήματα της ραδιοβολίδας

Το πλήρες σύστημα ραδιοβολίδας αποτελείται από ένα μπαλόνι που μεταφέρει ένα πακέτο οργάνων, έναν ραδιοφωνικό δέκτη, μία μονάδα εντοπισμού και ένα σύστημα εγγραφής (Εικόνα 9.2).



**Εικόνα 9.2** Ραδιοβολίδα. Διακρίνεται το μπαλόνι, το αλεξίπτωτο και το πακέτο των οργάνων.

### ΤΟ ΠΑΚΕΤΟ ΟΡΓΑΝΩΝ

Το κύριο εξάρτημα της ραδιοβολίδας είναι ένα ανθεκτικό, ελαφρύ, λευκό, χάρτινο (ή πλαστικό) πακέτο οργάνων, περίπου στο μέγεθος ενός κουτιού παπουτσιών (Εικόνα 9.3).



**Εικόνα 9.3** Παράδειγμα μοντέρνας διάταξης ραδιοβολίδας

Το πακέτο κρέμεται από το μπαλόνι, ενώ ενδιάμεσα υπάρχει ένα αλεξίπτωτο (Εικόνα 9.2). Τα πακέτο περιέχει αισθητήρες για τη μέτρηση των βασικών μετεωρολογικών μεταβλητών (θερμοκρασίας, υγρασίας και πίεσης). Τα σήματα από κάθε αισθητήρα πολυ-

πλέκονται σε έναν διαμορφωτή και στη συνέχεια διαβιβάζονται στον ραδιοφωνικό πομπό. Οι νεότερες διατάξεις ενσωματώνουν έναν μικροεπεξεργαστή για να πολυπλέξει τα σήματα και να κωδικοποιήσει ψηφιακά τα δεδομένα. Οι ακόλουθοι αισθητήρες περιέχονται ή επισυνάπτονται σε αυτό το πακέτο.

### **ΘΕΡΜΟΚΡΑΣΙΑ**

Οι αισθητήρες θερμοκρασίας είναι, συνήθως, μικρές ράβδοι θερμοημιαγωγών ή πυκνωτές ευαίσθητοι στη θερμοκρασία. Δεδομένου ότι η ραδιοβολίδα κινείται μέσα από ένα ευρύ φάσμα πιέσεων (και πυκνοτήτων), η θερμική υστέρηση του αισθητήρα πρέπει να είναι μικρή. Η τυπική χρονική σταθερά για έναν θερμοημιαγωγό με διάμετρο 1,27 χιλιοστά είναι 4,5 s στα 1.000 hPa, αυξάνεται σε 10,6 s στα 100 hPa και σε 30 s στα 10 hPa. Έτσι, ενώ η χρονική σταθερά είναι ικανοποιητική στα χαμηλότερα στρώματα της τροπόσφαιρας, δεν είναι το ίδιο καλή στα ανώτερα στρώματα της τροπόσφαιρας και στη στρατόσφαιρα. Ένα άλλο μείζον θέμα είναι το σφάλμα ακτινοβολίας. Λόγω της ανόδου, ο εξαερισμός του αισθητήρα είναι καλός αλλά είναι απαραίτητο να υπάρχει επίσης προστασία έτσι ώστε να μην εκτίθεται απευθείας στον ήλιο. Στις νεότερες διατάξεις, η ασπίδα ακτινοβολίας είναι μέρος του ίδιου του αισθητήρα, για παράδειγμα, η ασπίδα αποτελείται από μια επίστρωση υψηλής ανακλαστικότητας.

### **ΥΓΡΑΣΙΑ**

Για τη μέτρηση της υγρασίας χρησιμοποιούνται συνήθως πυκνωτές, οι οποίοι έχουν ήδη περιγραφεί στο κεφάλαιο 3. Η βασική διαφορά του από τον αισθητήρα που χρησιμοποιείται στις επίγειες μετρήσεις προκύπτει από την ανάγκη να προφυλαχθεί ο αισθητήρας από τα προβλήματα που δημιουργούνται όταν διέρχεται μέσα από νέφη.

Σχεδόν όλοι οι αισθητήρες σχετικής υγρασίας απαιτούν κάποια προστασία από τη βροχή. Ένα προστατευτικό κάλυμμα μειώνει τον εξαερισμό του αισθητήρα και, επομένως, και την ταχύτητα ανταπόκρισης του συστήματος ανίχνευσης ως σύνολο. Ωστόσο, στην πράξη, η απαίτηση για την προστασία του αισθητήρα της σχετικής υγρασίας από τη βροχή ή τον πάγο είναι, συνήθως, πιο σημαντική από την τέλεια έκθεση στον ατμοσφαιρικό αέρα. Έτσι, με έναν αισθητήρα σχετικής υγρασίας χρησιμοποιούνται, συνήθως, προστατευτικά καλύμματα ή αγωγοί.

Στα περισσότερα σύγχρονα συστήματα ραδιοβolidων χρησιμοποιούνται σήμερα αισθητήρες, οι οποίοι βασίζονται σε πυκνωτές λεπτών υμενίων. Ο πρώτος αισθητήρας που χρησιμοποιήθηκε ευρέως βασιζόταν στη μεταβολή της διηλεκτρικής σταθεράς ενός υμενίου πολυμερούς με την ατμοσφαιρική υγρασία. Αργότερα, το σύστημα βελτιώθηκε χρησιμοποιώντας πολυμερή πιο ευσταθή σε υγρές συνθήκες. Τα τελευταία χρόνια χρησιμοποιούνται αισθητήρες, οι οποίοι έχουν δυνατότητα θέρμανσης, ώστε να αντιμετωπίζεται η διαβροχή του αισθητήρα στα νέφη, καθώς και ο σχηματισμός πάγου στην επιφάνειά του. Χρησιμοποιούνται δύο αισθητήρες, οι οποίοι θερμαίνονται διαδοχικά, ο μη θερμαινόμενος από τους οποίους χρησιμοποιείται για τη μέτρηση.

Ο αισθητήρας υγρασίας στις περισσότερες ραδιοβolidες έχει σχεδιαστεί για τη μέτρηση της σχετικής υγρασίας του περιβάλλοντος στην περιοχή από 15% έως 100%.

### **ΠΙΕΣΗ**

Η βαρομετρική πίεση μετρείται στο διάστημα 3-1.070 hPa, συνήθως με μία από τις παρακάτω μεθόδους:



- Με έναν αισθητήρα διαφράγματος πυριτίου, ο οποίος λυγίζει κάτω από μια αλλαγή στην πίεση, προκαλώντας μια αλλαγή στη χωρητικότητα, ή,
- με ένα μεταλλικό ανεροειδές βαρόμετρο, το οποίο παράγει ένα παρόμοιο σήμα.

Οι αισθητήρες είναι σχεδιασμένοι ώστε να ανταποκρίνονται στον λογάριθμο της πίεσης, και όχι γραμμικά με την πίεση, ώστε να βελτιώσουν την απόδοσή τους σε μεγάλο υψόμετρο. Ακόμα κι έτσι, οι αισθητήρες μεταλλικού διαφράγματος έχουν μειωμένη ευαισθησία σε χαμηλές πιέσεις (<50 hPa). Σε πολλές περιπτώσεις ενισχύονται με υψομετρητές, η ευαισθησία των οποίων αυξάνεται, καθώς μειώνεται η πίεση.

Δεδομένου ότι μία ραδιοβολίδα χρησιμοποιείται, γενικά, μόνο μία φορά, θα πρέπει να είναι σχεδιασμένη για μαζική παραγωγή σε χαμηλό κόστος. Πρέπει να είναι ικανή να λειτουργεί με μια εσωτερική μπαταρία για περίπου τρεις ώρες και να μεταδίδει το ραδιοφωνικό σήμα τουλάχιστον για 200 km. Για την ασφάλεια των αεροσκαφών, η πυκνότητα μάζας πρέπει να είναι αρκετά χαμηλή, ώστε, σε περίπτωση πρόσκρουσης, να μην καταστρέψει ένα κινητήρα τζετ, ούτε να σπάσει ένα παρμπρίζ. Οι αισθητήρες έχουν μόνο μια μικρή ενεργή ζωή υπηρεσίας, αλλά μπορεί να παραμείνουν αποθηκευμένοι μεγάλο χρονικό διάστημα πριν από τη χρήση τους.



**Εικόνα 9.4** Ραδιοβολίδα με αλεξίπτωτο (*dropsonde*)

Η μονάδα του γεωδυναμικού ύψους, η οποία χρησιμοποιείται σε παρατηρήσεις ανώτερης ατμόσφαιρας, ορίζεται σε 0,980665 δυναμικά μέτρα. Οι διαφορές στην κατώτερη τροπόσφαιρα είναι σχετικά μικρές, αλλά μεγαλώνουν καθώς το ύψος αυξάνεται.

Οι παρατηρήσεις με ραδιοβολίδες χρησιμοποιούνται τακτικά για μετρήσεις μέχρι το ύψος περίπου των 35 km. Ωστόσο, οι περισσότερες παρατηρήσεις ανά τον κόσμο δεν ξεπερνούν τα 25 km, ύψος που δίνει ικανοποιητική κάλυψη της ατμόσφαιρας, ενώ περιορίζεται και το κόστος των μπαλονιών και του αερίου, τα οποία απαιτούνται για να φτάσει η ραδιοβολίδα σε μεγαλύτερα ύψη.

## 9.2 Δέσμιο αερόστατο (tethered sonde)

Οι μετρήσεις με το δέσμιο αερόστατο έχουν πολλά κοινά σημεία με τις ραδιοβολίσεις, αλλά σε αυτή την περίπτωση χρησιμοποιείται ένα μεγαλύτερο μπαλόνι, το οποίο δεν είναι ελεύθερο, αλλά δεσμεύεται με νήμα (WMO, 2008). Τυπικές εφαρμογές του δέσμιου αερόστατου περιλαμβάνουν τη μέτρηση της κατακόρυφης κατανομής της θερμοκρασίας, της υγρασίας και του ανέμου από την επιφάνεια μέχρι το ύψος περίπου των 1.500 m. Οι αισθητήρες έχουν τοποθετηθεί σε ένα πακέτο, το οποίο είναι προσδεμένο κάτω από το μπαλόνι (εικόνα 9.5). Τα δεδομένα που συλλέγονται από τους αισθητήρες μεταδίδονται, συνήθως, με τηλεμεταφορά στον σταθμό εδάφους. Σε παλιότερα συστήματα η αποθήκευση γινόταν στο ίδιο το πακέτο, ενώ τα δεδομένα μεταφέρονταν σε επίγειο υπολογιστή όταν τελείωνε η μέτρηση και το μπαλόνι επέστρεφε στο έδαφος.

Παρά το γεγονός ότι κάποιες εφαρμογές απαιτούν τη χρήση μεγάλων μπαλονιών για την ανύψωση οργάνων με μεγάλο βάρος, ένα τυπικό σύστημα μετεωρολογικού αερόστατου έχει γενικά όγκο μικρότερο από  $10 \text{ m}^3$  (τυπικά  $3,5\text{-}5 \text{ m}^3$ ). Τα δέσμια αερόστατα είναι σχεδιασμένα έτσι, ώστε να έχουν χαμηλή οπισθέλκουσα και να κινούνται σταθερά. Παλαιότερα, τα μπαλόνια φουσκώνονταν με υδρογόνο, αλλά σήμερα χρησιμοποιούμε για λόγους ασφαλείας ήλιο (το υδρογόνο είναι ιδιαίτερα εύφλεκτο). Η δυνατότητα ανύψωσης του ηλίου είναι  $1 \text{ kg/m}^3$ . Το μπαλόνι θα πρέπει να είναι σε θέση να λειτουργεί σε ταχύτητες ανέμου έως και  $5 \text{ ms}^{-1}$  στην επιφάνεια και  $15 \text{ ms}^{-1}$  σε ύψη εντός του εύρους λειτουργίας του. Το καλώδιο πρόσδεσης ενός τυπικού μετεωρολογικού συστήματος μπαλονιού πρέπει να είναι σε θέση να αντέχει σε δύναμη 200 έως 300 kg, ώστε να αποφευχθεί η θραύση του καλωδίου και η απώλεια του εξοπλισμού.

Το βαρούλκο που χρησιμοποιείται για τον έλεγχο του μπαλονιού μπορεί να είναι ηλεκτρικό ή χειροκίνητο. Στο ηλεκτρικό βαρούλκο θα πρέπει να υπάρχουν τουλάχιστον δύο ταχύτητες (π.χ.  $1$  και  $2 \text{ ms}^{-1}$ ) για την πορεία του καλωδίου. Το βαρούλκο θα πρέπει να είναι ηλεκτρικά γειωμένο, για προστασία από τις ατμοσφαιρικές εκκενώσεις.

Οι αισθητήρες που χρησιμοποιούνται στα συστήματα δέσμιων αεροστάτων είναι παρόμοιοι με αυτούς που αναφέρθηκαν σε προηγούμενες ενότητες για τις ραδιοβολίδες, με εξαίρεση την ταχύτητα του ανέμου, η οποία μετρείται με τη χρήση ενός ανεμόμετρου ελαφριάς κατασκευής. Οι αισθητήρες θερμοκρασίας και υγρασίας πρέπει να έχουν μια οριζόντια θωράκιση, η οποία θα παρέχει προστασία από την ηλιακή ακτινοβολία και τις βροχοπτώσεις, ενώ θα επιτρέπει τον επαρκή εξαερισμό. Ο υπολογισμός του ύψους, στο οποίο βρίσκεται το μπαλόνι, γίνεται με τη βοήθεια της υδροστατικής εξίσωσης (εξίσωση 5.6), χρησιμοποιώντας τις μετρήσεις της πίεσης και της θερμοκρασίας των αισθητήρων του συστήματος.

Οι μετρήσεις πραγματοποιούνται κατά την άνοδο και την κάθοδο του μπαλονιού, είτε συνεχώς είτε «σταθμεύοντας» το μπαλόνι σε συγκεκριμένα επίπεδα.

Τα δέσμια αερόστατα υπόκεινται στους εθνικούς κανόνες σχετικά με την ασφάλεια των αερομεταφορών. Για λόγους ασφαλείας, συνιστάται η χρήση μπαλονιών με χρώματα τα οποία ξεχωρίζουν εύκολα, καθώς και η χρήση φωτών νυκτός.

Οι κυριότεροι παράγοντες που περιορίζουν τη λειτουργία του δέσμιου αερόστατου είναι οι ισχυροί άνεμοι, η ατμοσφαιρική τύρβη κοντά στην επιφάνεια και ο κίνδυνος κεραυνών.

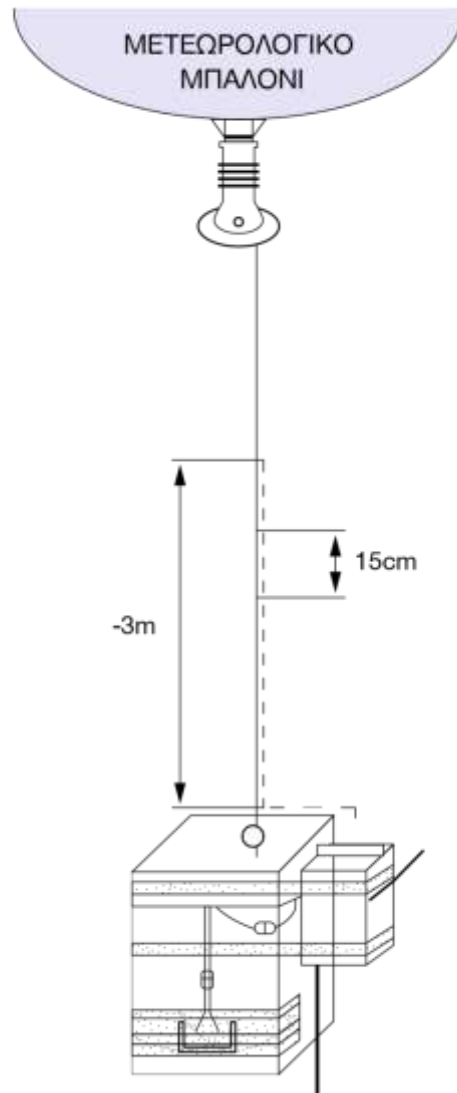


Εικόνα 9.5 Δέσμιο αερόστατο

### 9.3 Οζοντοβολίδα (ozonesonde)

#### 9.3.1 Γενικά

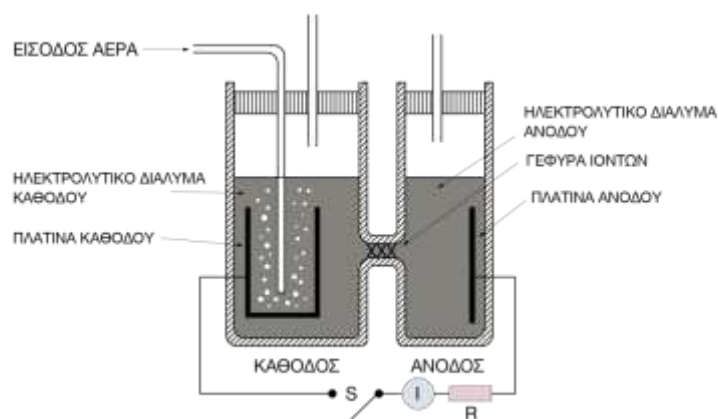
Η γνώση της κατακόρυφης κατανομής της συγκέντρωσης του ατμοσφαιρικού όζοντος είναι ιδιαίτερα σημαντική για την κατανόηση των φυσικών και χημικών διεργασιών που καθορίζουν τις εποχικές και μακροχρόνιες μεταβολές του. Γι' αυτό τον σκοπό έχουν αναπτυχθεί πολλές μέθοδοι για τον προσδιορισμό της κατακόρυφης δομής του στρώματος του όζοντος. Οι μέθοδοι αυτοί βασίζονται είτε στην τηλεπισκόπηση (π.χ. δορυφορικές μετρήσεις, LIDAR, επίγειες τεχνικές τηλεπισκόπησης), είτε σε επιτόπου μετρήσεις (in situ) με τη χρήση μετεωρολογικών μπαλονιών ή αερόστατων. Μια τέτοια τεχνική μέτρησης αποτελεί η μέθοδος της οζοντοβόλισης, η οποία χρησιμοποιεί μία ευρέως χρησιμοποιούμενη μετεωρολογική διάταξη – τη ραδιοβόλιση – σε συνδυασμό με έναν αισθητήρα όζοντος, μία αντλία αέρα και ένα μετεωρολογικό μπαλόνι, για την επιτόπια μέτρηση του όζοντος σε ένα συγκεκριμένο ύψος και την εκπομπή της πληροφορίας αυτής με έναν ενσωματωμένο πομπό σε έναν σταθμό εδάφους. Ενδεικτικά, η διάταξη παρουσιάζεται στο σχήμα 9.1.



Σχήμα 9.1 Η διάταξη της οζοντοβόλισης.

### 9.3.2 Αρχή Λειτουργίας

Ο αισθητήρας όζοντος που χρησιμοποιεί η διάταξη της οζοντοβόλισης αποτελείται από μία ηλεκτροχημική διάταξη, στην οποία λαμβάνει χώρα μια οξειδοαναγωγική αντίδραση εντός διαλύματος ιωδιούχου καλίου. Η διάταξη αποτελείται από δύο ηλεκτρόδια από πλατίνα εμβαπτισμένα σε διαλύματα ιωδιούχου καλίου διαφορετικής συγκέντρωσης, τα οποία βρίσκονται σε ξεχωριστούς καθοδικούς και ανοδικούς θαλάμους, κατασκευασμένους από τεφλόν. Οι θάλαμοι ενώνονται με μία γέφυρα ιόντων, η οποία αποτελεί τη διέξοδο των ιόντων, αλλά παράλληλα αποτρέπει την ανάμειξη των διαλυμάτων της καθόδου και της ανόδου, διατηρώντας με αυτό τον τρόπο τη συγκέντρωσή τους. Η διάταξη δεν απαιτεί για τη λειτουργία της την εφαρμογή μίας εξωτερικής ΗΕΔ, διότι η διαφορετική συγκέντρωση των δύο διαλυμάτων παρέχει την απαιτούμενη ΗΕΔ. Η ηλεκτροχημική διάταξη παρουσιάζεται στο σχήμα 9.2.



Σχήμα 9.2 Η ηλεκτροχημική διάταξη της οζοντοβόλισης.

Η χημική αντίδραση ξεκινά με τη ροή αέρα που περιέχει όζον μέσα από τον θάλαμο της καθόδου. Η χημική αντίδραση που λαμβάνει χώρα είναι μια αντίδραση οξειδοαναγωγής, η οποία περιγράφεται στην επόμενη παράγραφο. Το παραγόμενο ηλεκτρικό ρεύμα μπορεί να μετρηθεί κλείνοντας το κύκλωμα με έναν διακόπτη. Η αντίσταση R είναι αντίσταση φορτίου του κυκλώματος. Το διάλυμα της καθόδου έχει συγκέντρωση 1% σε KI, ενώ το διάλυμα της ανόδου είναι κορεσμένο σε KI. Επειδή η αντίδραση οξειδοαναγωγής επηρεάζεται από το pH των διαλυμάτων, αυτό με τη χρήση κατάλληλων προσμίξεων σε μικρές συγκεντρώσεις (KBr,  $\text{NaH}_2\text{PO}_4 \cdot \text{H}_2\text{O}$ ,  $\text{Na}_2\text{HPO}_4 \cdot 12\text{H}_2\text{O}$ ) διατηρείται ουδέτερο (δηλ. =7).

### 9.3.3 Χημικές αντιδράσεις στον αισθητήρα όζοντος

Η ηλεκτροχημική διάταξη παρουσιάζεται στο σχήμα 9.2. Τα ηλεκτρόδια από πλατίνα είναι χημικά αδρανή και δεν συμμετέχουν στις χημικές αντιδράσεις. Οι αντιδράσεις λαμβάνουν χώρα στις οριακές επιφάνειες των ηλεκτροδίων. Με την εμφύσηση αέρα που περιέχει μόρια  $\text{O}_3$  στο διάλυμα της καθόδου, λαμβάνει χώρα η παρακάτω αντίδραση:



Έχουμε δηλαδή τη δημιουργία μορίων  $\text{I}_2$ , οπότε η συγκέντρωση του  $\text{I}_2$  στο διάλυμα αρχίζει να αυξάνεται. Εάν το εξωτερικό κύκλωμα είναι κλειστό, τότε η αντίδραση (9-1) ακολουθείται από τις παρακάτω αντιδράσεις:

Στον θάλαμο της καθόδου έχουμε την αντίδραση:

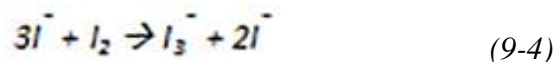
Ενώ στον θάλαμο της ανόδου την αντίδραση:



Ενώ στον θάλαμο της ανόδου την αντίδραση:



Η συνολική οξειδοαναγωγική αντίδραση είναι:



Οι αντιδράσεις (9-2) και (9-3) καθορίζουν τον ρυθμό της αντίδρασης, διότι τα ιόντα πρέπει να μεταφερθούν στην επιφάνεια των ηλεκτροδίων. Οι αντιδράσεις στην κάθοδο και την άνοδο είναι διαφορετικές, λόγω της διαφορετικής συγκέντρωσης ιωδίου. Η φορά της αντίδρασης (9-4) καθορίζεται από την εσωτερική ΗΕΔ που δίνεται κατά προσέγγιση από τη σχέση:

$$E \approx \frac{0.0591}{2} \log K \quad (9-5)$$

όπου  $E$  είναι η παραγόμενη ΗΕΔ εντός της διάταξης (στους  $25^\circ\text{C}$ ) και  $K$  η σταθερά της αντίδρασης, η οποία δίνεται από τη σχέση:

$$K = \frac{(\alpha_1)I_3^- (\alpha_3)^2 I^-}{(\alpha_4)I_2 (\alpha_2)^3 I^-} \quad (9-6)$$

όπου  $\alpha_i$  είναι οι συγκεντρώσεις των ουσιών. Σε κατάσταση ισορροπίας η  $K$  είναι περίπου ίση με τη μονάδα.

Συνοπτικά, μπορούμε να περιγράψουμε την αρχή λειτουργίας του αισθητήρα ως εξής:

Με την είσοδο όζοντος στην κάθοδο λαμβάνει χώρα η αντίδραση (8-1) και η συγκέντρωση ιωδίου μεταβάλλεται, οπότε η σταθερά  $K$  δεν είναι ίση με τη μονάδα και η ΗΕΔ δεν είναι ίση με μηδέν, οπότε έχουμε επακόλουθα τις αντιδράσεις (9-2) και (9-3), και συνεπώς η  $K$  ξαναγίνεται ίση με τη μονάδα, κ.ο.κ. Συμπερασματικά, **για κάθε μόριο όζοντος έχουμε την παραγωγή ρεύματος δύο ηλεκτρονίων**. Επειδή η σταθερά ισορροπία είναι ιδιαίτερα υψηλή, η αντίδραση είναι ποσοτική και μπορεί να χρησιμοποιηθεί για τη μέτρηση της συγκέντρωσης του όζοντος. Θα πρέπει εδώ να σημειωθεί ότι ο συγκεκριμένος κύκλος αντιδράσεων μπορεί να προκληθεί με όλες τις οξειδωτικές ουσίες (π.χ.  $\text{O}_2$ ).



Εικόνα 9.6 Φωτογραφία μίας οζοντοβολίδας.

#### 9.4 Προσδιορισμός της συγκέντρωσης του όζοντος

Η μερική πίεση του όζοντος είναι μέτρο της τοπικής του συγκέντρωσης. Επειδή κάθε μόριο όζοντος δημιουργεί ένα ρεύμα δύο ηλεκτρονίων, η συγκέντρωση του όζοντος θα δίνεται από τη σχέση:

$$c = \frac{I \cdot t}{F \cdot 2 \cdot 100ml} \quad (9-7)$$

όπου

C = η συγκέντρωση του όζοντος σε m mol l<sup>-1</sup>

F = 9.6487 · 10<sup>4</sup> C (mol)<sup>-1</sup> (σταθερά του Faraday)

I = το μετρούμενο ρεύμα σε μΑ

T = ο χρόνος άντλησης 100 ml αέρα σε δευτερόλεπτα

Η (8-7) σε συνδυασμό με την καταστατική εξίσωση των αερίων μας δίνει:

$$p_3 = c \cdot R \cdot T_{air} = \frac{R}{F \cdot 2 \cdot 100ml} \cdot I \cdot T_{air} \cdot t \quad (9-8)$$

$$p_3 = 4,307 \cdot 10^{-4} (I - I_{BG}) \cdot T_p \cdot t \cdot C_{ef} \cdot C_{ref}$$

όπου:

p<sub>3</sub> = η μερική πίεση του όζοντος σε mPa

R = 8,31431 JK<sup>-1</sup>mol<sup>-1</sup>

I = Το μετρούμενο ρεύμα λόγω όζοντος σε μΑ

I<sub>BG</sub> = το ρεύμα που οφείλεται σε άλλους οξειδωτές (κυρίως O<sub>2</sub>) σε μΑ,

T<sub>p</sub> = η θερμοκρασία του αέρα που διαρρέει την αντλία σε K,

t = ο χρόνος άντλησης 100 ml αέρα σε δευτερόλεπτα,

C<sub>ef</sub> = ο διορθωτικός παράγοντας για τη ροή της αντλίας λόγω μείωσης της πίεσης του περιβάλλοντα αέρα,

C<sub>ref</sub> = 1, εκτός εάν υπάρχει ανεξάρτητη μέθοδος προσδιορισμού της συγκέντρωσης του όζοντος, οπότε η p<sub>3</sub> διορθώνεται αντίστοιχα.

Η τιμή του I<sub>BG</sub> μετρείται στο έδαφος όπου γίνεται η εξαπόλυση της διάταξης και αντιστοιχεί στην επιφανειακή πίεση του αέρα. Επειδή η πυκνότητα του οξυγόνου μειώνεται με το ύψος η τιμή αυτή θα πρέπει να διορθωθεί. Ο πίνακας 9.1 δίνει τις διορθωμένες τιμές για την ευαισθησία του αισθητήρα στο οξυγόνο.

Πίεση σε hPa	Τιμή διόρθωσης του $I_{BG}$ σε $\mu A$				
1070-951	0.25	0.20	0.15	0.10	0.05
950-830	0.23	0.18	0.14	0.09	0.05
829-711	0.20	0.16	0.12	0.08	0.04
710-596	0.18	0.14	0.11	0.07	0.04
595-485	0.15	0.12	0.09	0.06	0.03
484-379	0.13	0.10	0.08	0.05	0.03
378-279	0.10	0.08	0.06	0.04	0.02
278-191	0.08	0.06	0.05	0.03	0.02
190-114	0.05	0.04	0.03	0.02	0.01
113-57	0.02	0.02	0.02	0.01	0.01

**Πίνακας 9.1** Διόρθωση για την ευαισθησία του αισθητήρα στο οξυγόνο.

Η ικανότητα άντλησης της αντλίας μειώνεται με το ύψος, λόγω της μείωσης της ατμοσφαιρικής πίεσης, γι' αυτό τον σκοπό οι τιμές όζοντος θα πρέπει διορθωθούν γι' αυτή την απώλεια σε σχέση με την τιμή στο έδαφος. Η διόρθωση αυτή με τον παράγοντα  $C_{ef}$  δίνεται στον πίνακα 9.2.

Πίεση σε hPa	$C_{ef}$
2.0	1.160
3.0	1.124
5.0	1.087
10.0	1.054
20.0	1.033
30.0	1.024
50.0	1.015
100.0	1.010
200.0	1.007
300.0	1.005
500.0	1.002
1000.0	1.000

**Πίνακας 9.2** Διορθωτικοί παράγοντες για τη μερική πίεση του όζοντος

## 9.5 Τεχνολογίες Επίγειας Τηλεπισκόπησης

Τις τελευταίες δεκαετίες έχουν αναπτυχθεί τεχνολογίες επίγειας τηλεπισκόπησης για τη μέτρηση της καθ' ύψος κατανομής των μετεωρολογικών παραμέτρων. Στο κεφάλαιο αυτό θα γίνει μια πολύ σύντομη παρουσίαση των κυριότερων από αυτές.



## 9.5.1 Ακουστικό ραντάρ (SODAR)

### Γενικά

Η εισαγωγή του ακουστικού ραντάρ στο πεδίο της Μετεωρολογίας από τον McAllister (1968) υπήρξε καθοριστική για την ανάπτυξή του για λειτουργικές και ερευνητικές εφαρμογές. Το 1969 ο Little θέτει τις βάσεις για τη χρήση των ακουστικών ραντάρ στην ποσοτική πλέον μελέτη της ταχύτητας και διεύθυνσης του ανέμου από την ολίσθηση Doppler του λαμβανόμενου σήματος. Από αυτή τη στιγμή και μετά, τα ακουστικά ραντάρ άρχισαν να γίνονται ευρέως γνωστά και να κερδίζουν έδαφος σε πολλές εφαρμογές. Στην ξενόγλωσση βιβλιογραφία χρησιμοποιείται για το ακουστικό ραντάρ ο όρος SODAR, ο οποίος προέρχεται από τα αρχικά των λέξεων SOund Detection And Ranging (Ηχο-ανίχνευση και αποστασιομέτρηση). Τα ακουστικά ραντάρ λειτουργούν με βάση την αρχή της σκέδασης των ακουστικών κυμάτων στην ατμόσφαιρα. Σύμφωνα με τη θεωρία της σκέδασης του ήχου, ένας ηχητικός παλμός που εκπέμπεται στην ατμόσφαιρα διαχέεται από τις διακυμάνσεις του δείκτη διάθλασης, οι οποίες οφείλονται στις ανομοιογένειες της θερμοκρασίας, της υγρασίας και της κίνησης του αέρα. Οι τυχαίες, τυρβώδεις διακυμάνσεις αυτών των μεταβλητών ευθύνονται για τις τοπικές διακυμάνσεις του ακουστικού δείκτη διάθλασης. Η τύρβη εμφανίζεται φυσικά στον ατμοσφαιρικό αέρα και συνδέεται ιδιαίτερα με ισχυρές βαθμίδες θερμοκρασίας, ανέμου και υγρασίας.

### Αρχή λειτουργίας

Όπως προαναφέρθηκε, η αρχή λειτουργίας του SODAR, που είναι σύστημα τηλεπισκόπησης, έχει να κάνει με την αλληλεπίδραση του ήχου με την τύρβη της ατμόσφαιρας (Lenschow, 1986, Καλόγηρος, 1997). Τα ακουστικά κύματα που ταξιδεύουν μέσα σε περιοχές με τυχαία μεταβαλλόμενο δείκτη διάθλασης παραμορφώνονται και σκεδάζονται. Στην περίπτωση της οπισθοσκέδασης ( $180^\circ$ ), μόνο οι διακυμάνσεις της θερμοκρασίας με μία κλίμακα ίση με το  $1/2$  του ακουστικού μήκους κύματος καθορίζουν την επιστρεφόμενη ηχώ. Σε άλλες κατευθύνσεις, η επιστρεφόμενη ηχώ προκαλείται τόσο από τις διακυμάνσεις της θερμοκρασίας όσο και της ταχύτητας, εκτός από μια γωνία  $90^\circ$ , όπου δεν υπάρχει σκέδαση. Όταν ένα ακουστικό κύμα με γνωστά φασματικά χαρακτηριστικά εκπεμφθεί στην ατμόσφαιρα η μελέτη του οπισθοσκεδαζόμενου ήχου μπορεί να δώσει πληροφορίες σχετικά με την κατάσταση της ατμόσφαιρας.

Η τεχνική που ακολουθείται περιγράφεται ως ακολούθως. Παράγεται ένας σύντομος ηχητικός παλμός, ο οποίος ενισχύεται και εκπέμπεται στην ατμόσφαιρα. Το σήμα σκεδάζεται και επιστρέφει, οπότε και συλλέγεται από τον δέκτη, αφού χωριστεί σε χρονικά διαστήματα, έτσι, ώστε να είναι δυνατή η αντιστοίχιση του χρόνου με το ύψος του σκεδαστή. Αμέσως μετά, το σήμα ενισχύεται και φιλτράρεται από φίλτρα διέλευσης ζωνών.

Το SODAR καταγράφει την ένταση της ανακλώμενης ακουστικής ενέργειας (οπισθοσκέδαση). Η ένταση της οπισθοσκέδασης είναι ανάλογη της θερμικής τύρβης, συνεπώς τα γραφήματα της έντασης του επιστρεφόμενου σήματος δίνουν πληροφορίες για την κατακόρυφη κατανομή των τυρβωδών στρωμάτων στην ατμόσφαιρα. Από την άλλη πλευρά, η διαφορά συχνότητας, η οποία καλείται ολίσθηση Doppler, μεταξύ του εκπεμπόμενου και του ανακλώμενου σήματος μπορεί να χρησιμοποιηθεί για τον καθορισμό της κίνησης του αέρα. Η ολίσθηση συχνότητας από κάθε άξονα του ακουστικού ραντάρ μετατρέπεται σε ακτινική ταχύτητα του ανέμου κατά μήκος της εκάστοτε διαδρομής της δέσμης και οι ταχύτητες αυτές στη συνέχεια συνδυάζονται για τη μαθηματική εξαγωγή της οριζόντιας διεύθυνσης του ανέμου και της ταχύτητας σε συγκεκριμένα επίπεδα πάνω από το σύστημα της κεραίας. Οι υπολογισμένες διευθύνσεις και ταχύτητες του ανέ-

μου για κάθε κατακόρυφο επίπεδο αναπαριστούν τη μέση τιμή για τον μετρούμενο όγκο σε ένα συγκεκριμένο χρονικό παράθυρο.

### **Τύποι ακουστικών ραντάρ**

Ο τρόπος με τον οποίο εκπέμπεται η ηχητική δέσμη προς την ατμόσφαιρα είναι δυνατόν να ακολουθήσει διάφορες γεωμετρίες ανάλογα με τις συσκευές που χρησιμοποιούμε. Ανάλογα με τον αριθμό των κεραιών που χρησιμοποιούνται μπορούμε να ξεχωρίσουμε τα ακουστικά ραντάρ στα παρακάτω:

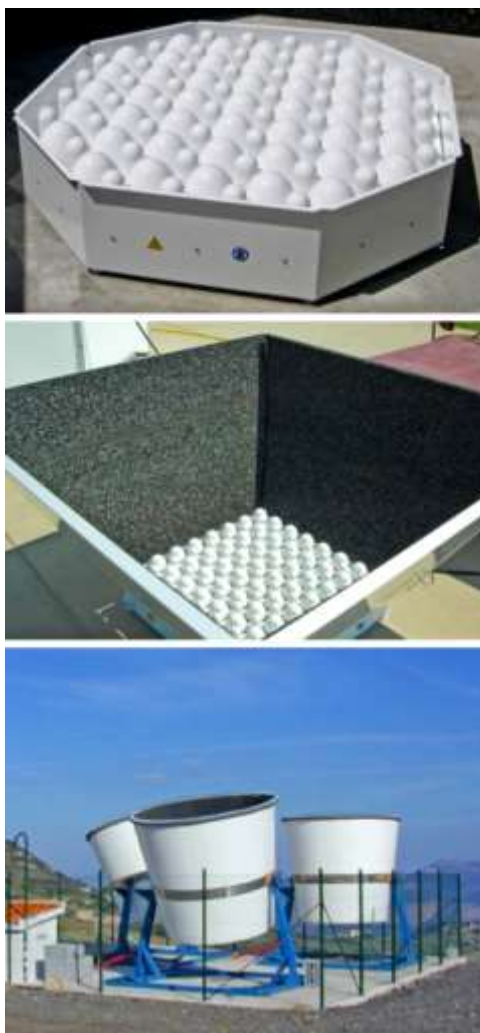
- Συστήματα μονής κεραίας. Η κεραία είναι προσανατολισμένη κατακόρυφα, ώστε να εκπέμπονται ακουστικά σήματα προς τα πάνω στην ατμόσφαιρα. Η μέτρηση των σημάτων που οπισθοσκεδάζονται από την τύρβη μικρής κλίμακας παρέχει σε αυτή την περίπτωση πληροφορίες για τη θερμική δομή της κατώτερης τροπόσφαιρας (προσοχή: όχι τη θερμοκρασία).
- Συστήματα τριών λοβών. Τα συστήματα αυτά χρησιμοποιούνται για τη μέτρηση του τρισδιάστατου ανέμου. Συνήθως, υπάρχει ένας κατακόρυφος άξονας και δυο κεκλιμένοι (Εικόνα 9.7). Οι τυπικές μετρήσεις γίνονται με την εκπομπή ενός παλμού κατά μήκος του πρώτου άξονα, στη συνέχεια αναμένοντας μερικά δευτερόλεπτα για να ληφθεί η ανακλώμενη ενέργεια από την ατμόσφαιρα πίσω στην κεραία και να γίνει η επεξεργασία και, τέλος, να γίνει η εκπομπή κατά μήκος του δεύτερου λοβού με τον ίδιο τρόπο όπως στην πρώτη. Ο παραπάνω κύκλος επαναλαμβάνεται συνεχόμενα, ώστε συγκεντρωθούν πολλαπλές μετρήσεις και να γίνει η εξαγωγή του μέσου όρου κατά τη διαδικασία της αυτόματης επεξεργασίας δεδομένων.
- Συστήματα στρεφόμενου λοβού. Παρέχουν παρόμοιες μετρήσεις με αυτές των συστημάτων τριών λοβών, αλλά με χρήση μόνο μίας κεραίας, η οποία δύναται να στρέφει ηλεκτρονικά τον λοβό της. Τα πλεονεκτήματα της φιλοσοφίας αυτής είναι ο μικρότερος όγκος, η ευελιξία μεταφοράς του, το μικρότερο κόστος υλοποίησης και η αυξημένη αξιοπιστία. Το μειονέκτημα είναι η πολυπλοκότητα της σχεδίασης των ηλεκτρονικών μονάδων.

Μια άλλη ταξινόμηση των ακουστικών ραντάρ είναι αυτή που βασίζεται στον τρόπο λειτουργίας και την ικανότητά τους να αναλύσουν διαφορετικά σήματα.

- Ένα μονοστατικό ακουστικό ραντάρ αποτελείται από μια παλμική πηγή ήχου που είναι προσανατολισμένη κάθετα στην επιφάνεια της γης. Ένα μικρό μέρος του κάθε ηχητικού παλμού οπισθοσκεδάζεται πίσω στον δέκτη από τις θερμικές διακυμάνσεις που εμφανίζονται φυσικά στον αέρα. Ο δέκτης μετρά την ένταση του επιστρεφόμενου ήχου. Όπως και σε ένα συμβατικό ραντάρ, η χρονική καθυστέρηση μεταξύ μετάδοσης και λήψης μιας ηχούς είναι ενδεικτική της απόστασης του στόχου. Οι μονοστατικές διατάξεις μπορούν να αναλύσουν τη σκέδαση ήχου που προέρχεται μόνο από θερμοκρασιακές διαταραχές (όπως εκφράζονται από την παράμετρο της θερμοκρασιακής δομής CT2).
- Οι διστατικές διατάξεις μπορούν να αναλύσουν τη σκέδαση του ήχου που οφείλεται στις ανομοιογένειες θερμοκρασίας και ταχύτητας ανέμου (όπως εκφράζονται από την παράμετρο θερμοκρασιακής δομής CT2 και την παράμετρο δομής ταχύτητας CV2 αντίστοιχα) και να δώσουν πληροφορίες τόσο για τη θερμική δομή όσο και την κατακόρυφη κατανομή του ανέμου.

Εκτός από την ένταση του σήματος επιστροφής, το Doppler SODAR αναλύει, επίσης, το φάσμα συχνοτήτων των μεταδιδόμενων και λαμβανόμενων σημάτων για τον προσδιορισμό της μετατόπισης συχνότητας Doppler ανάμεσα στο εκπεμπόμενο και το οπισθοσκεδαζόμενο ηχητικό σήμα. Αυτή η διαφορά προκύπτει λόγω της κίνησης του αέρα και παρέχει ένα μέτρο της ακτινικής ταχύτητας του ανέμου. Ένα Doppler SODAR τυπικά χρησιμοποιεί τρεις δέσμες, μία κατευθυνόμενη κάθετα και δύο με κλίση ως προς το κατακόρυφο, ώστε προσδιοριστούν συνιστώσες του ανέμου σε τρεις κατευθύνσεις. Ο κάθετος και οριζόντιος άνεμος υπολογίζονται από αυτές τις συνιστώσες. Οι μετρήσεις ξεκινούν τυπικά από το ύψος περίπου των 30 έως 50 m. Το μέγιστο ύψος που μπορεί να φτάσει η μέτρηση με το ακουστικό ραντάρ εξαρτάται από τις παραμέτρους του συστήματος, αλλά ποικίλλει, επίσης, ανάλογα με τις ατμοσφαιρικές συνθήκες. Οικονομικά συστήματα μπορούν να φτάσουν τυπικά σε ύψη της τάξης των 600 m με κατακόρυφη ανάλυση μερικών δεκάδων μέτρων.

Τυπικά χαρακτηριστικά ενός ακουστικού ραντάρ είναι τα παρακάτω: τυπική συχνότητα παλμού 1 500 Hz, διάρκεια παλμού 0,05 έως 0,2 s, περίοδος επανάληψης του παλμού 2 έως 5 s, ακουστική ισχύς 100 W.



**Εικόνα 9.7** Ακουστικό ραντάρ περιστρεφόμενου λοβού χωρίς κάλυμμα (επάνω) και με κάλυμμα (μέση). Ακουστικό ραντάρ τριών συνιστωσών (κεραιών) χαμηλής συχνότητας (κάτω).

## Περιορισμοί

Ο κύριος περιορισμός των συστημάτων SODAR, εκτός από την περιορισμένη κάλυψη ύψους, είναι η ευαισθησία τους στον περιβαλλοντικό θόρυβο. Αυτό μπορεί να προκύψει από τον θόρυβο της κυκλοφορίας και, επίσης, σε περιπτώσεις υετού ή ισχυρών ανέμων. Αυτοί οι περιορισμοί περιορίζουν τη χρήση του συστήματος σε συγκεκριμένες καιρικές συνθήκες. Επιπρόσθετα, τα ηχητικά ραντάρ εκπέμπουν ήχο, ο οποίος μπορεί να προκαλέσει ενόχληση στην εγγύς περιοχή. Για τον λόγο αυτό, θα πρέπει να γίνεται με ιδιαίτερη προσοχή ο σχεδιασμός της εγκατάστασης τέτοιων συστημάτων. Ορισμένα συστήματα χρησιμοποιούν απορροφητικό αφρό για να μειωθεί η ενόχληση που προκαλείται στους κατοίκους της περιοχής, αλλά και η επίδραση των εξωτερικών πηγών θορύβου. Η φυσική κατάσταση του αφρού επιδεινώνεται με τον χρόνο και πρέπει να αντικαθίσταται τακτικά, ώστε να αποτραπεί η επιδείνωση της απόδοσης του οργάνου.

### 9.5.2 Doppler LIDAR

Η ηλεκτρομαγνητική ενέργεια σε μήκη κύματος στο ορατό και στο κοντινό ορατό (από το υπεριώδες μέχρι το υπέρυθρο) που παράγεται από laser σκεδάζεται από τα μόρια των ατμοσφαιρικών αερίων και τα αιωρούμενα σωματίδια (αεροζόλ). Αυτή η σκέδαση επιτρέπει την εφαρμογή των διατάξεων LIDAR (Light Detection and Ranging, φωτοανίχνευση και αποστασιομέτρηση). Η αρχή λειτουργίας και η τεχνολογία των LIDARs παρουσιάζεται στο κεφάλαιο 10. Εδώ θα περιοριστούμε σε μία πολύ συνοπτική παρουσίαση μίας ειδικής εφαρμογής των LIDARs, τα οποία χρησιμοποιούνται στη μέτρηση του προφίλ (κατακόρυφης κατανομής) του ανέμου. Οι διατάξεις αυτές βασίζονται στην αρχή Doppler και ονομάζονται Doppler LIDARs. Οι αναγνώστες οι οποίοι ενδιαφέρονται να εμβαθύνουν στην τεχνική των διατάξεων αυτών μπορούν να ανατρέξουν στη σύνοψη που παρουσιάζεται από τον Werner (2005).

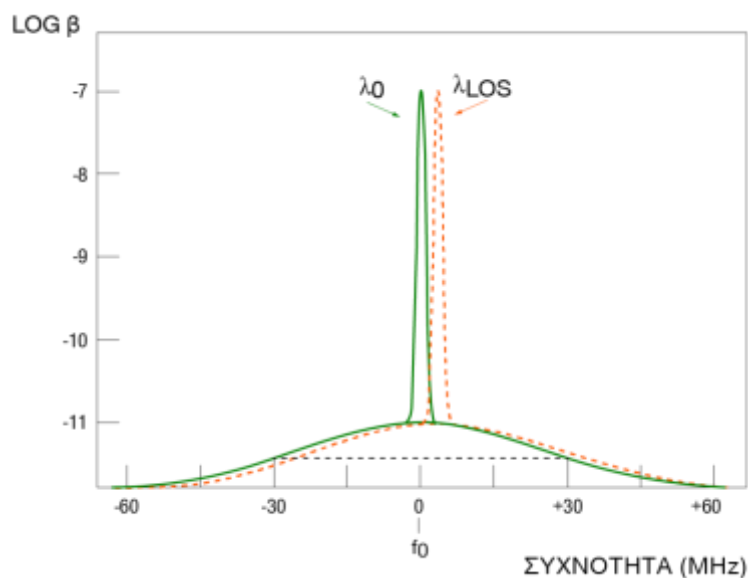
Οι τυχαίες θερμικές κινήσεις του αέρα προκαλούν φασματική διαπλάτυνση (διεύρυνση) του οπισθοσκεδαζόμενου φωτός λέιζερ. Χρησιμοποιώντας τη συνάρτηση κατανομής της ταχύτητας του Maxwell και την εξίσωση Doppler, μπορεί να αποδειχθεί ότι η διεύρυνση ακολουθεί την Γκαουσιανή κατανομή και το πλάτος της εξαρτάται από τη θερμοκρασία. Ο άνεμος, η μέση κίνηση των μορίων του αέρα, προκαλεί στο οπισθοσκεδαζόμενο σήμα μια μετατόπιση συχνότητας. Η μετατόπιση συχνότητας είναι ευθέως ανάλογη προς τη συνιστώσα της ταχύτητας του ανέμου στη διεύθυνση της σκέδασης, την ακτινική ταχύτητα του ανέμου.

Το φαινόμενο, το οποίο περιέγραψε πρώτος ο Christian Doppler (1803–1853) για τα ακουστικά κύματα, εμφανίζεται επίσης στα ηλεκτρομαγνητικά κύματα. Όταν τα κύματα σκεδάζονται από τα συστατικά της ατμόσφαιρας (μόρια αερίων και αεροζόλ), εμφανίζεται μια αλλαγή στη συχνότητα λόγω του φαινομένου Doppler. Το μέγεθος και η διεύθυνση της μετατόπισης Doppler προσδιορίζεται από τη συνιστώσα της κίνησης του αέρα κατά μήκος της διεύθυνσης της δέσμης του LIDAR. Αν το εκπεμπόμενο σήμα έχει συχνότητα  $f_0$ , τότε, λόγω της κίνησης των αεροζόλ, η συχνότητα  $f$  του οπισθοσκεδαζόμενου σήματος θα είναι διαφορετική από την  $f_0$ . Αυτό εκφράζεται από την παρακάτω εξίσωση:

$$f = f_0 + \Delta f = f_0 (1 + 2v/c) \quad (9-9)$$

όπου  $v$  είναι η ταχύτητα του αέρα και  $c$  είναι η ταχύτητα του φωτός.

Στο σχήμα 9.3 εμφανίζεται η μετατόπιση στην κατανομή συχνοτήτων, η οποία οφείλεται στον άνεμο (Werner, 2005). Η συχνότητα του επιστρεφόμενου σήματος μετατοπίζεται σε αυτό το παράδειγμα προς υψηλότερες τιμές, γεγονός που υποδηλώνει ότι ο άνεμος πνέει προς τη μεριά του LIDAR. Στο μήκος κύματος 10,59  $\mu\text{m}$ , η μετατόπιση των 3 MHz αντιστοιχεί περίπου σε ταχύτητα ίση με  $20 \text{ ms}^{-1}$ .



**Σχήμα 9.3** Κατανομή συχνοτήτων του εκπεμπόμενου (πλήρους) και του μετατοπισμένου από τον άνεμο (διάστικτη) σήματος.

## Βιβλιογραφία

### Ελληνική

Καλόγηρος, Ι. (1997). *Ανάπτυξη μεθόδων και αλγορίθμων μελέτης της δομής της κατώτερης ατμόσφαιρας με ακουστικό radar*. Διδακτορική διατριβή, Εθνικό και Καποδιστριακό Πανεπιστήμιο Αθηνών.

### Αγγλική

Komhyr, W.D. (1986). Operations Handbook - Ozone Measurement to 40-km Altitude with 4A Electrochemical Concentration Cell (ECC) Ozonesondes (used with 1680-MHz radiosondes), *NOAA Technical Memorandum ERL ARL-49*.

Lenschow, D.H. (ed.) (1986). *Probing the Atmospheric Boundary Layer*. American Meteorological Society, Boston.

Smit, H.G.J. (2002). Ozonesondes, in *Encyclopedia of Atmospheric Sciences*, edited by J. Holton, J. Pyle, and J. Curry, pp. 1469-1476, Academic Press, London.

Werner, C. (2005). Doppler Wind Lidar. In Lidar. Range-Resolved Optical Remote Sensing of the Atmosphere, Editor Dr. Claus Weitkamp, *Springer Series in Optical Sciences*, Vol 102, pp. 325-354.

WMO-No. 8 (updated in 2012). *Guide to Meteorological Instruments and Methods of Observation*, World Meteorological Organization (WMO),.

## ΚΕΦΑΛΑΙΟ 10: ΑΤΜΟΣΦΑΙΡΙΚΗ ΤΗΛΕΠΙΣΚΟΠΗΣΗ ΜΕ ΑΚΤΙΝΕΣ LASER

### Σύνοψη

Στο κεφάλαιο αυτό παρουσιάζεται η αρχή λειτουργίας μεθόδων τηλεπισκόπησης της κατακόρυφης κατανομής της συγκέντρωσης των ατμοσφαιρικών συστατικών που στηρίζονται στη χρήση πηγών ακτινοβολίας laser. Αναπτύσσεται η βασική θεωρία, αναλύεται η μεθοδολογία και η τεχνική των μετρήσεων και παρουσιάζονται ενδεικτικές εφαρμογές της μεθόδου.

### 10.1 Γενικά

Η τηλεπισκόπηση ατμοσφαιρικών παραμέτρων με τη χρήση πηγών laser πραγματοποιήθηκε για πρώτη φορά το 1962 από τους Fiooco και Smullin (1963) με στόχο την ανίχνευση του στρώματος των αιωρούμενων σωματιδίων της ατμόσφαιρας σε ύψος 20 km. Έκτοτε, η ραγδαία ανάπτυξη στην τεχνολογία κατασκευής πηγών laser επέτρεψε τον σχεδιασμό και την υλοποίηση εξελιγμένων πειραματικών διατάξεων που βασίζονται στη μελέτη και καταγραφή της αλληλεπίδρασης του φωτός, το οποίο εκπέμπει μια πηγή laser με τα διάφορα συστατικά της ατμόσφαιρας, ως συνάρτηση της απόστασης. Στις επόμενες παραγράφους γίνεται αναφορά στην αρχή λειτουργίας ενός συστήματος lidar.

### 10.2 Αρχή λειτουργίας του LIDAR

Η τεχνική lidar βασίζεται στην εκπομπή ενός παλμού μονοχρωματικής ακτινοβολίας laser στη μέτρηση της επανασκεδαζόμενης ακτινοβολίας από τα μόρια και τα σωματίδια της ατμόσφαιρας και στην καταγραφή του χρόνου που μεσολαβεί ανάμεσα στην εκπομπή και τη λήψη, η οποία αντιστοιχεί στην απόσταση των σκεδαστών από την πηγή laser, γι' αυτό τον λόγο και οι διατάξεις αυτές ονομάζονται lidar (Light Detection and Ranging), λέξη σχηματιζόμενη κατ' αναλογία προς τη λέξη radar. Τα τελευταία χρόνια έχουν αναπτυχθεί διάφορες τεχνικές lidar για την τηλεπισκόπηση ατμοσφαιρικών παραμέτρων, οι οποίες βασίζονται σε διαφορετικές αλληλεπιδράσεις της εκπεμπόμενης ακτινοβολίας και των διάφορων συστατικών της ατμόσφαιρας. Έτσι, υπάρχουν διατάξεις που βασίζονται στη σκέδαση της laser ακτινοβολίας κατά Rayleigh, στη σκέδαση Mie, στη σκέδαση Raman, στη σκέδαση συντονισμού, στον φθορισμό, στην απορρόφηση, καθώς και στη διαφορική σκέδαση/απορρόφηση. Μια σύντομη περιγραφή των παραπάνω οπτικών αλληλεπιδράσεων της ακτινοβολίας laser παρουσιάζεται στον Πίνακα 10.1.

Τεχνική	Φυσική Περιγραφή
Σκέδαση Rayleigh	Η ακτινοβολία laser σκεδάζεται ελαστικά από άτομα ή μόρια, χωρίς αλλαγή στο μήκος κύματος της σκεδαζόμενης ακτινοβολίας.
Σκέδαση Mie	Η ακτινοβολία laser σκεδάζεται ελαστικά από μικρά σωματίδια ή αιωρήματα (συγκρίσιμου μεγέθους με το μήκος κύματος της εκπεμπόμενης ακτινοβολίας), χωρίς αλλαγή στο μήκος κύματος της σκεδαζόμενης ακτινοβολίας.
Σκέδαση Raman	Η ακτινοβολία laser σκεδάζεται ανελαστικά από τα μόρια με μετατόπιση στο μήκος κύματος της σκεδαζόμενης ακτινοβολίας, χαρακτηριστική του μορίου ( $h\nu - h\nu^* = E$ ).

Σκέδαση συντονισμού	Η συχνότητα της εκπεμπόμενης ακτινοβολίας laser συμπίπτει με τη συχνότητα συγκριμένης ενεργειακής μετάπτωσης του ατόμου, διεγείρεται, και, κατόπιν, σκεδάζει αποδιεγειρόμενο, χωρίς μετατόπιση στο μήκος κύματος.
Φθορισμός	Η συχνότητα της εκπεμπόμενης ακτινοβολίας laser συμπίπτει με τη συχνότητα συγκεκριμένης ενεργειακής μετάπτωσης του ατόμου, απορροφάται μερικώς και, κατόπιν, επανεκπέμπεται σε μεγαλύτερο μήκος κύματος.
Απορρόφηση	Η δέσμη της ακτινοβολίας laser εξασθενεί, λόγω σύμπτωσης του μήκους κύματος με ζώνη απορρόφησης του εν λόγω μορίου.
Διαφορική σκέδαση και απορρόφηση	Η διαφορική εξασθένιση δύο ακτινών laser, όπως προκύπτει από τα οπισθοσκεδαζόμενα σήματα, όταν η συχνότητα της μίας ακτίνας συμπίπτει με τη συχνότητα γνωστής μοριακής μετάπτωσης, ενώ η συχνότητα της άλλης είναι ακριβώς μετά ή πριν από αυτή τη χαρακτηριστική συχνότητα.

**Πίνακας 10.1** Οπτικές αλληλεπιδράσεις σχετικές με laser μεθόδους τηλεπισκόπησης.

Οι παραπάνω οπτικές αλληλεπιδράσεις προκαλούν την εξασθένιση της εκπεμπόμενης ακτίνας, σύμφωνα με το νόμο των Lambert-Beer (Ζερεφός, 1984).

$$I = I_0 e^{-aR} \quad (10-1)$$

όπου  $I$  είναι η ένταση της ακτίνας μετά την εκπομπή της στην απόσταση  $R$ ,  $a$  είναι ο συντελεστής εξασθένισης και  $I_0$  η αρχική ένταση της ακτίνας. Ο συντελεστής εξασθένισης  $a$  μπορεί να γραφεί ως άθροισμα επιμέρους συντελεστών που προξενούν την εξασθένιση, όπως αυτή περιγράφηκε στον πίνακα 10.1:

$$a = a_{Ray} + a_{Mie} + a_{Raman} + a_{abs} \quad (10-2)$$

Στον πίνακα 10.2 παρουσιάζεται η κατά προσέγγιση σημαντικότητα αυτών των αλληλεπιδράσεων, όπως αυτή εκφράζεται από τον αντίστοιχο συντελεστή εξασθένισης, ανά φασματική περιοχή.

Οπτική αλληλεπίδραση	Φασματική περιοχή (μm)	Σκεδαστής	Συντελεστής εξασθένισης $a$ (km <sup>-1</sup> )
Απορρόφηση	UV	Άτομα,	10 <sup>7</sup>
	1	μόρια	10 <sup>6</sup>
	10		10 <sup>5</sup>
Σκέδαση	UV	O <sub>2</sub> , N <sub>2</sub>	10 <sup>-1</sup>
	1		10 <sup>-3</sup>
	10		10 <sup>-7</sup>
Mie	UV	αιωρούμενα σωματίδια	10 <sup>-1</sup>



	1	λεπτή σκόνη	$10^{-1}$
	10		$10^{-2}$
Raman	UV	μόρια	$10^{-5}$
	1		$10^{-7}$
	10		$10^{-11}$

**Πίνακας 10.2** Σημαντικότητα οπτικών αλληλεπιδράσεων, που σχετίζονται με την τηλεπισκόπηση laser.

Η ευαισθησία της τηλεπισκόπησης με τη χρήση laser εξαρτάται άμεσα από την σχετική ένταση των παραπάνω οπτικών διεργασιών, όπως αυτές εκφράζονται στην «εξίσωση του lidar». Η εξίσωση του lidar, στη γενική της μορφή, για μονοχρωματικό παλμικό laser, και θεωρώντας ότι έχουμε μεμονωμένη σκέδαση (single scattering), δίνεται από τη σχέση (Collis and Russell, 1976, Klett, 1981):

$$P(r) = P_0 \frac{c\tau}{2} A \frac{\beta(r)}{r^2} e^{-2\int_0^r a(r')dr'} \quad (10-3)$$

όπου  $P(r)$  είναι η στιγμιαία ισχύς που λαμβάνεται κατά τη χρονική στιγμή  $t$ ,  $P_0$  είναι η εκπεμπόμενη ισχύς τον χρόνο  $t_0$ ,  $c$  η ταχύτητα του φωτός,  $\tau$  η διάρκεια του παλμού του laser,  $\beta$  είναι ο χωρικός συντελεστής οπισθοσκέδασης (volume backscattering coefficient) της ατμόσφαιρας,  $R$  είναι η απόσταση από την πηγή,  $A_r$  η ενεργός επιφάνεια λήψης και  $a$  ο χωρικός συντελεστής εξασθένισης (volume extinction coefficient) της ατμόσφαιρας.

Επειδή ο εκπεμπόμενος παλμός έχει πεπερασμένη διάρκεια  $\tau$ , σε κάθε χρονική στιγμή διαγράφει ένα πεπερασμένο διάστημα γεωμετρικού μήκους  $c\tau$ . Όμως η ενέργεια που καταμετράται από το σύστημα λήψης τη χρονική στιγμή  $t$ , έχει διανύσει δύο φορές τη διαδρομή μέσα στην ατμόσφαιρα, οπότε:

$$R = c(t - t_0)/2 \quad (10-4)$$

Ως χωρικός συντελεστής οπισθοσκέδασης  $\beta$ , ορίζεται το κλάσμα της προσπίπτουσας ενέργειας, η οποία σκεδάζεται ανά στερεά γωνία στην αντίστροφη κατεύθυνση, ανά μονάδα μήκους μέσα στην ατμόσφαιρα ( $\text{Km}^{-1}\text{sr}^{-1}$ ). Στην πιο απλή περίπτωση, θεωρούμε ότι το  $\beta$  αντιστοιχεί μόνο σε φαινόμενα ελαστικής οπισθοσκέδασης. Σε αυτήν την περίπτωση, ο συντελεστής οπισθοσκέδασης είναι το άθροισμα της συνεισφοράς των μορίων ( $\beta_g$ ) και των σωματιδίων ( $\beta_p$ ) της ατμόσφαιρας.

$$\beta = \beta_g + \beta_p \quad (10-5)$$

Επειδή το μέγεθος των μορίων της ατμόσφαιρας είναι πολύ μικρό σε σχέση με το μήκος κύματος της προσπίπτουσας ακτινοβολίας laser, η ελαστική σκέδαση, σε αυτήν τη περίπτωση, εκτός από την ύπαρξη γραμμών απορρόφησης, περιγράφεται από την προσέγγιση του Rayleigh (e.g. Van de Hulst, 1957, Nicolet 1984), οπότε:

$$\beta_g = \beta_R = N_g d\sigma_R(\pi)/d\Omega \quad (10-6)$$

όπου  $N_g$  ο αριθμός των μορίων ανά μονάδα όγκου και  $d\sigma_R(\pi)/d\Omega$  η διαφορική ενεργός διατομή σκέδασης Rayleigh, για γωνία σκέδασης  $\theta = \pi$ , ανά «μέσο» μόριο. Για ένα μίγμα ατμοσφαιρικών αερίων μέχρι το ύψος των 100 km, ισχύει ο τύπος (π.χ. McCartney, 1976):

$$d\sigma_R(\pi)/d\Omega = 5.45[\lambda(\mu m)/.55]^4 \times 10^{-28} \text{ cm}^2 \text{ sr}^{-1} \quad (10-7)$$

Ο εκθέτης -4 στη σχέση (10-7) μπορεί να μεταβληθεί, εάν ληφθεί υπ' όψη η μικρή εξάρτηση του δείκτη διάθλασης του αέρα από το μήκος κύματος (Elterman, 1968).

Εάν εξαιρεθεί η περιοχή της ελεύθερης τροπόσφαιρας και της στρατόσφαιρας (όταν δεν υπάρχουν ηφαιστειογενή αιωρούμενα σωματίδια), τα αιωρούμενα σωματίδια οπισθοσκεδάζουν την ακτινοβολία, κατά τρόπο ώστε  $\beta_p > \beta_g$ . Τα αιωρούμενα σωματίδια διαφέρουν στη σύστασή τους, στο σχήμα και στο μέγεθός τους. Για σωματίδια τυχαίου σχήματος και μεγέθους δεν υπάρχει αναλυτική λύση στο πρόβλημα της σκέδασης ηλεκτρομαγνητικής ακτινοβολίας. Εάν, όμως, θεωρήσουμε ότι τα σωματίδια είναι ομογενείς σφαίρες - μία προσέγγιση που σε πολλές περιπτώσεις είναι κοντά στη πραγματικότητα - τότε, ισχύει:

$$\beta_p(\lambda) = \int_0^{\infty} \sigma_B(a, \lambda, m) N'_p(a) da \quad (10-8)$$

όπου  $\sigma_B(a, \lambda, m)$  είναι η ενεργός διατομή οπισθοσκέδασης ενός σωματιδίου ακτίνας  $a$  με δείκτη διάθλασης  $m$ , και  $N'_p(a) da$  είναι ο αριθμός των σωματιδίων ανά μονάδα όγκου με ακτίνα μεταξύ  $a$  και  $a+da$ . Η σκέδαση από ομογενή σφαιρικά σωματίδια τυχαίου μεγέθους, κυρίως με  $a/\lambda \geq 0.1$ , θεωρείται σκέδαση Mie, και η επίλυσή της αναπτύχθηκε από τον Mie το 1908 (Mie, 1908, Van de Hulst, 1957, κα.). Σύμφωνα με αυτή, η ενεργός διατομή μπορεί να γραφεί ως:

$$\sigma_B(a, \lambda, m) = \pi a^2 Q_B(x, m) \quad (10-9)$$

όπου  $Q_B$  καλείται *ικανότητα οπισθοσκέδασης (backscattering efficiency)* και εκφράζει το λόγο της ενεργούς διατομής οπισθοσκέδασης προς την γεωμετρική ενεργό διατομή  $\pi a^2$ . Η ικανότητα οπισθοσκέδασης εξαρτάται από το λόγο  $a$  προς  $\lambda$ , που καλείται παράμετρος μεγέθους,  $x \equiv 2\pi a/\lambda$  και από τον δείκτη διάθλασης  $m$  και εκφράζεται ως απειροσειρά συνδυασμών των  $x$  και  $mx$  (π.χ. Kerker, 1969).

Η έκφραση  $e^{-2 \int_0^x a \sigma_B(a, \lambda, m) da}$  αντιστοιχεί στο κλάσμα της διαπερατότητας ( $T$ ) της ενέργειας κατά μήκος της διαδρομής μεταξύ του lidar και της απόστασης  $R$ . Η διαπερατότητα εξαρτάται από τον *χωρικό συντελεστή εξασθένισης*  $a$ , ο οποίος εκφράζει το κλάσμα κατά το οποίο μειώνεται η ροή ενέργειας κατά τη διεύθυνση διάδοσής της, ανά μονάδα μήκους (βλέπε και σχέση 10-2). Η παραπάνω θεώρηση ισχύει μόνο για την περίπτωση της μεμονωμένης σκέδασης, όπου θεωρείται ότι η σκεδαζόμενη ακτινοβολία αφαιρείται οριστικά από την εξερχόμενη ακτινοβολία και δεν επαναπροστίθεται στην αρχική δέσμη.

Η ενεργός επιφάνεια  $A_r$  στην εξίσωση (10-3) καθορίζει την στερεά γωνία  $A_r/R^2$  υπό την οποία «βλέπει» ο δέκτης στην απόσταση  $R$ .

Η γενική λύση της εξίσωσης (10-3) έχει προταθεί από διάφορους ερευνητές (Klett, 1981, 1983, 1985, Fernald 1984) και περιγράφεται στην επόμενη παράγραφο.

### 10.3 Γενική λύση της εξίσωσης του lidar και μέθοδος αντιστροφής του σήματος lidar κατά τη μέθοδο Klett

Για την επίλυση της εξίσωσης του lidar έχουν αναπτυχθεί διάφορες τεχνικές επίλυσης και έχουν προταθεί αναλυτικοί αλγόριθμοι αντιστροφής του σήματος. Στην παράγραφο αυτή παρουσιάζεται η αναλυτική λύση της εξίσωσης του lidar, με εφαρμογή στον υπολογισμό του συντελεστή εξασθένισης και οπισθοσκέδασης σε μία ανομοιογενή ατμόσφαιρα, με βάση το επιστρεφόμενο σήμα ενός μονοχρωματικού συστήματος lidar. Όπως η εξίσωση του lidar, για ένα παλμικό μονοχρωματικό σύστημα, θεωρώντας την περίπτωση της μεμονωμένης σκέδασης, περιγράφεται από τη σχέση:

$$P(r) = P_0 \frac{c\tau}{2} A \frac{\beta(r)}{r^2} e^{-2 \int_0^r a(r') dr'} \quad (10-10)$$

Για την αναλυτική επίλυσή της, ορίζουμε μία καινούργια μεταβλητή ως:

$$S(r) \equiv \ln[r^2 P(r)] \quad (10-11)$$

Εάν  $S=S(r)$  και  $S_0=S(r_0)$ , όπου  $r_0$  θεωρείται μία σταθερή απόσταση αναφοράς, τότε η (10-10) μπορεί να γραφεί στην ακόλουθη μορφή, η οποία είναι ανεξάρτητη από τα χαρακτηριστικά της διάταξης:

$$S - S_0 = \ln \frac{\beta}{\beta_0} - 2 \int_{r_0}^r a dr' \quad (10-12)$$

όπου  $\beta_0 = \beta(r_0)$ . Η διαφορική εξίσωση που αντιστοιχεί στην εξίσωση (10-12) είναι η:

$$\frac{dS}{dr} = \frac{1}{\beta} \frac{d\beta}{dr} - 2a \quad (10-13)$$

Η επίλυση της (10-13) απαιτεί τη γνώση ή την υπόθεση του λόγου  $\beta/a$ , όταν  $d\beta/dr \neq 0$ . Στην περίπτωση που η ατμόσφαιρα θεωρείται ομογενής έτσι ώστε  $d\beta/dr = 0$ , τότε ο συντελεστής εξασθένισης εκφράζεται άμεσα από την κλίση της καμπύλης του σήματος:

$$a_{\text{hom}} = -\frac{1}{2} \frac{dS}{dr} \quad (10-14)$$

Μία πρώτη προσέγγιση για την επίλυση της (10-10) θα ήταν να θεωρήσουμε την ατμόσφαιρα ομογενή κατά πεπερασμένα διαστήματα και να υπολογίσουμε για καθένα από αυτά την (10-14), κάτι όμως που θα σήμαινε ότι  $\beta^{-1} |d\beta/dr| \ll 2a$  κατά μήκος του σήματος  $S$ . Η προσέγγιση αυτή δεν θεωρείται αντιπροσωπευτική για τις περισσότερες πραγματικές καταστάσεις που μελετώνται με τη χρήση του lidar (Klett, 1981). Αντίθετα, στη βιβλιογραφία προτείνεται ως πιο αντιπροσωπευτική η υπόθεση ότι για τα  $\beta$  και  $a$  μπορεί να θεωρηθεί ότι:

$$\beta = \text{const } a^k \quad (10-15)$$

όπου  $k$  εξαρτάται από το μήκος κύματος και τις οπτικές ιδιότητες των αιωρούμενων σωματιδίων που παρεμβάλλονται στο σήμα και παίρνει τιμές στο διάστημα  $0.67 \leq k \leq 1$ . Με βάση την εξίσωση (10-15), η εξίσωση (10-13) γίνεται:

$$\frac{dS}{dr} = \frac{k}{a} \frac{da}{dr} - 2a \quad (10-16)$$

Η παραπάνω διαφορική εξίσωση είναι τύπου Bernoulli και η γενική της λύση είναι της μορφής :

$$a^{-1} = e^{\int \frac{1}{k} \frac{dS}{dr'} dr'} \times \left[ C - 2 \int \frac{e^{-\int \frac{1}{k} \frac{dS}{dr''} dr''}}{k} dr' \right] \quad (10-17)$$

όπου  $C$  είναι η σταθερά ολοκλήρωσης. Εάν θεωρηθεί ότι  $k$  είναι σταθερά, τότε η λύση της (10-16) μπορεί να γραφεί στη μορφή:

$$a = \frac{e^{[(s-s_0)/k]}}{\frac{1}{a_0} - \frac{2}{k} \int_{r_0}^r e^{[(s-s_0)/k]} dr'} \quad (10-18)$$

όπου  $a_0 = a(r_0)$ . Η (10-18) ισχύει για  $r \geq r_0$ . Επειδή όμως σε πραγματικές ατμοσφαιρικές συνθήκες η (10-18) δίνει πολύ γρήγορα αρνητικές τιμές, ο Klett (1981), προτείνει την εφαρμογή της (10-18) αντίστροφα, επιλέγοντας ως απόσταση αναφοράς την  $r_m$  στην "άκρη" του σήματος, θεωρώντας ότι  $a_m = a(r_m)$ , και επιλύοντάς την για  $r \leq r_m$  οπότε:

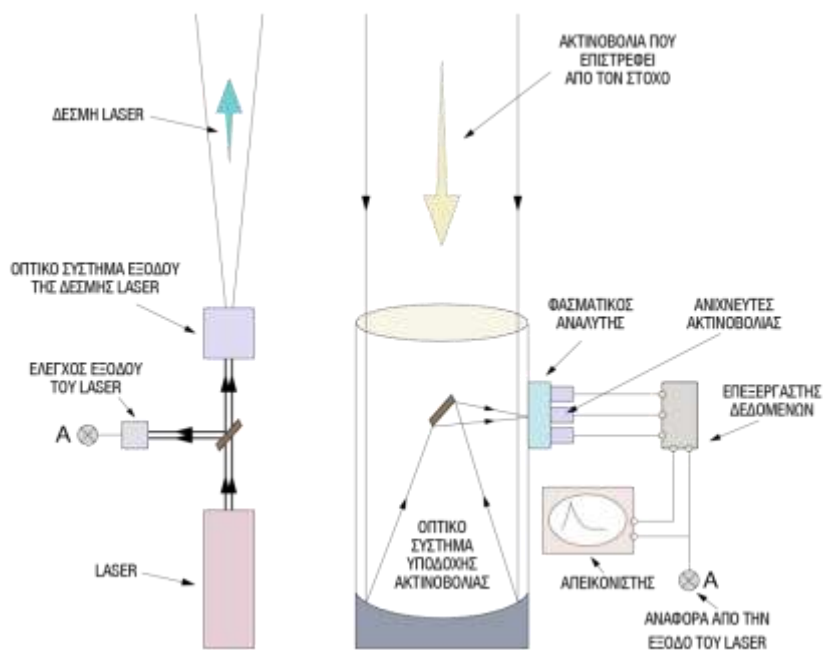
$$a = \frac{e^{[(s-s_m)/k]}}{\frac{1}{a_m} - \frac{2}{k} \int_r^{r_m} e^{[(s-s_m)/k]} dr'} \quad (10-19)$$

Μ' αυτήν τη μικρή μετατροπή, η (10-19) παρέχει αριθμητικά μεγαλύτερη ακρίβεια και σταθερότητα.

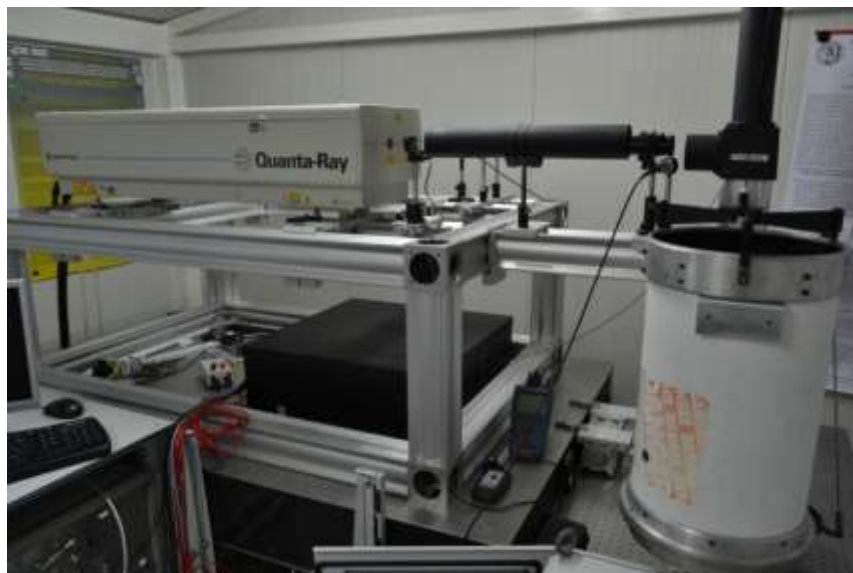
#### 10.4 Περιγραφή διάταξης lidar

Ο σχεδιασμός μιας διάταξης lidar στα πλαίσια μιας συγκεκριμένης εφαρμογής, έχοντας δηλαδή προκαθορίσει ποιες ατμοσφαιρικές παραμέτρους θέλουμε να μελετήσουμε, εξαρτάται κυρίως από το είδος οπτικής αλληλεπίδρασης της εκπεμπόμενης ακτινοβολίας laser και των υπό μελέτη ατμοσφαιρικών παραμέτρων. Σε κάθε περίπτωση, όμως, μια διάταξη lidar αποτελείται από τρία διαφορετικά συστήματα: το σύστημα εκπομπής, το σύστημα λήψης και το σύστημα καταγραφής. Το σύστημα εκπομπής αποτελείται από μία πηγή ή ένα συνδυασμό πηγών laser.

Η επιλογή των πηγών εξαρτάται από το είδος της εφαρμογής και αντιστοιχεί, στην ουσία, σε επιλογή μήκους κύματος για την εκπεμπόμενη ακτινοβολία. Ο διαχωρισμός των πηγών γίνεται με βάση τη φασματική περιοχή του μήκους κύματος της εκπεμπόμενης ακτινοβολίας (υπεριώδες, ορατό ή υπέρυθρο), με το υλικό που καθορίζει την εκπομπή (στερεάς κατάστασης, ημιαγωγός, αέριο, υγρό), με την ένταση της ακτινοβολίας ή σύμφωνα με τον τρόπο εκπομπής της ακτινοβολίας (συνεχής ή παλμός).



Σχήμα 10.1 Τυπική διάταξη ενός συστήματος lidar.



Εικόνα 10.1 Φωτογραφία της διάταξης lidar του ΕΜΠ.

Το σύστημα λήψης αποτελείται από ένα τηλεσκόπιο κατάλληλης διαμέτρου και εστιακής απόστασης, το οποίο χρησιμοποιείται για τη συλλογή της οπισθοσκεδαζόμενης α-

κτινοβολίας στα μήκη κύματος που εκπέμπει η πηγή laser. Η συλλεγόμενη ακτινοβολία διαχωρίζεται εκ νέου και οδηγείται οπτικά σε φωτοπολλαπλασιαστές (PMT), όπου και ανιχνεύεται.

Η καταγραφή του σήματος γίνεται είτε με αναλογικό τρόπο (analog mode) είτε με καταμέτρηση φωτονίων (photon counting). Το εξερχόμενο σήμα από τους φωτοπολλαπλασιαστές (αφού μετατραπεί από ρεύμα σε τάση) οδηγείται σε ψηφιακό καταγραφέα και, κατόπιν, αποθηκεύεται σε έναν υπολογιστή.



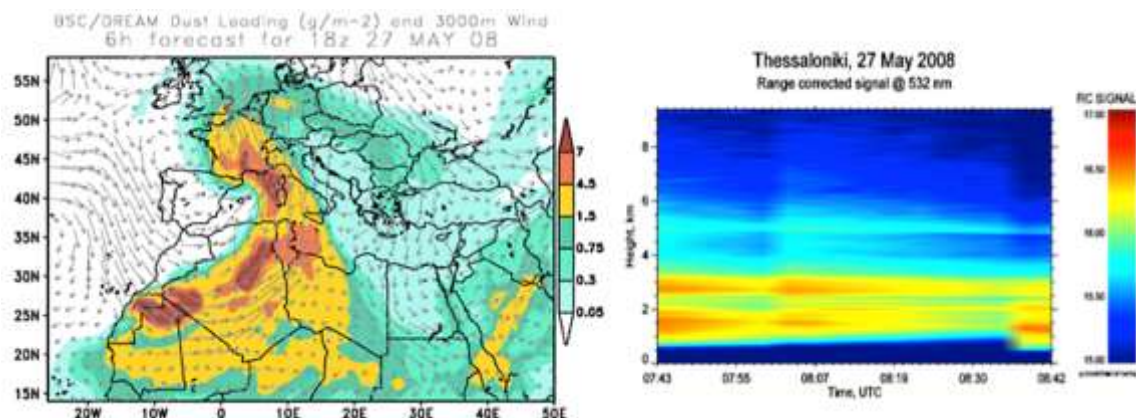
**Εικόνα 10.2** *Νυχτερινή λειτουργία lidar στη Mauna-Loa, Hawaii, USA.*

### 10.5 Σύγχρονες εφαρμογές της τεχνικής lidar

Η τεχνική lidar χρησιμοποιείται σε πολλές διαφορετικές εφαρμογές, οι οποίες αφορούν επίγεια συστήματα, συστήματα εγκατεστημένα σε αεροπλάνα ή δορυφορικά συστήματα. Η συνεχής εκπομπή ακτινοβολίας laser και η καταγραφή της οπισθοσκεδαζόμενης ακτινοβολίας σε ένα ή περισσότερα μήκη κύματος καθιστά δυνατή τη χρήση των lidar για τη συνεχή παρακολούθηση της κατακόρυφης κατανομής των συστατικών της ατμόσφαιρας, με μεγαλύτερη έμφαση στον φόρτο των αιωρούμενων σωματιδίων. Ιδιαίτερα με την παράλληλη αξιοποίηση μετρήσεων από ηλιακά φωτόμετρα ή/και επιφανειακών μετρήσεων είναι δυνατή η ανάπτυξη εξελιγμένων αλγορίθμων για τον προσδιορισμό και χαρακτηρισμό των ιδιοτήτων των αιωρούμενων σωματιδίων σε διαφορετικά στρώματα της ατμόσφαιρας. Γενικά, με τις διατάξεις lidar μπορούμε να μετρήσουμε τις ακόλουθες περιπτώσεις:

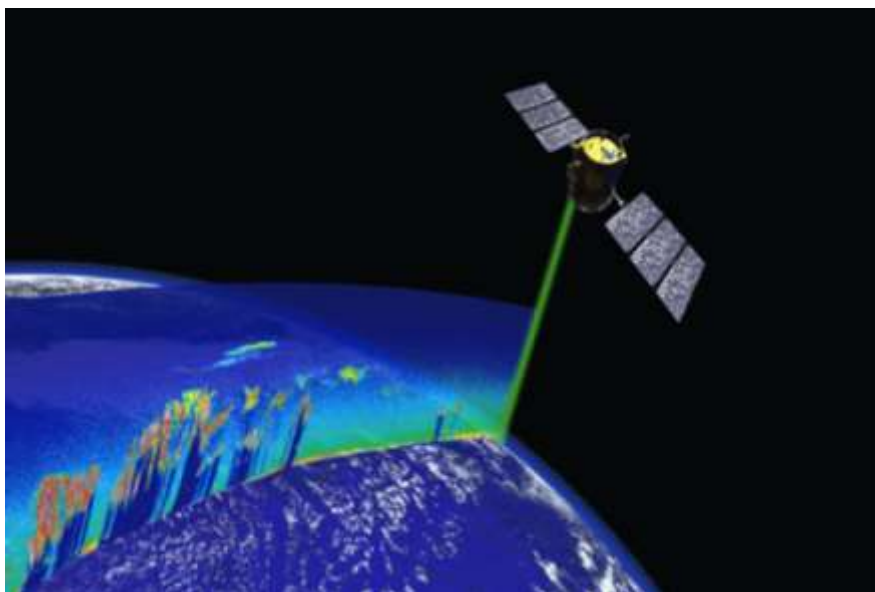
- Κατακόρυφη κατανομή του συντελεστή οπισθοσκέδασης των μορίων και σωματιδίων,
- κατακόρυφη κατανομή του συντελεστή εξασθένησης των μορίων και σωματιδίων,
- μεταβολές κατά ύψος του μεγέθους και του σχήματος των σωματιδίων,
- κατακόρυφη κατανομή της αριθμητικής πυκνότητας των αερίων και των σωματιδίων,
- γεωμετρικά και οπτικά χαρακτηριστικά των νεφών,

- προσδιορισμός της ταχύτητας και της διεύθυνσης του ανέμου σε διαφορετικά ατμοσφαιρικά στρώματα,
- χρονική εξέλιξη του ύψους του οριακού στρώματος,
- παρακολούθηση της εξέλιξης επεισοδίων μεταφοράς ερημικής σκόνης (εικόνα 10.3),
- παρακολούθηση της διασποράς της τέφρας από ηφαιστειακές εκρήξεις.



**Εικόνα 10.3** Μετρήσεις lidar στη Θεσσαλονίκη κατά τη διάρκεια επεισοδίου μεταφοράς ερημικής σκόνης από τη Σαχάρα.

Διεθνείς και εθνικές διαστημικές υπηρεσίες (National Aeronautics and Space Administration-NASA, European Space Agency-ESA, Centre National d'Études Spatiales-CNES, Japan Aerospace Exploration Agency-JAXA) έχουν αναπτύξει και σχεδιάσει δορυφορικές διατάξεις lidar που έχουν τεθεί ήδη σε τροχιά γύρω από τη Γη, σε ύψος περίπου 600 km, και παρέχουν καθημερινά μια τρισδιάστατη καταγραφή της κατανομής των αιωρούμενων σωματιδίων και των νεφών. Στην εικόνα 10.4 παρουσιάζεται μια απεικόνιση του είδους των μετρήσεων που παρέχει ο δορυφόρος CALIPSO ήδη από το 2006.



**Εικόνα 10.4** Μετρήσεις της κατακόρυφης κατανομής των αιωρούμενων σωματιδίων και νεφών με το δορυφόρο CALIPSO της NASA.

## Βιβλιογραφία

- Klett, J.D. (1981). "Stable analytical inversion solution for processing lidar returns". *Applied Optics* 20, pp. 211-220.
- Kovalev, V. & Eichinger, W. (2004). *Elastic Lidar, Theory, Practice and Analysis Methods*. Wiley and Sons, ISBN 0-471-20171-5.
- Measures R. (1992). *Laser Remote Sensing, Fundamentals and Applications*. Krieger Publishing Company, ISBN 0-89464-619-2.
- Van der Hulst, H.C. (1957). *Light scattering by small particles*. Dover, ISBN 978-0486642284.
- Weitkamp C. (2005). *Lidar, Range-resolved optical remote sensing of the atmosphere*. Springer, ISBN 0-387-40075-3.



## ΚΕΦΑΛΑΙΟ 11: ΜΕΤΡΗΣΗ ΤΗΣ ΑΤΜΟΣΦΑΙΡΙΚΗΣ ΣΤΗΛΗΣ ΑΕΡΙΩΝ

### Σύνοψη

Στο κεφάλαιο αυτό παρουσιάζονται μέθοδοι τηλεπισκόπησης της συγκέντρωσης ατμοσφαιρικών συστατικών που στηρίζονται στη φασματοσκοπία διαφορικής οπτικής απορρόφησης με τη χρήση τεχνητών πηγών, π.χ. λυχνίες, ή φυσικών πηγών, όπως η άμεση ή η διάχυτη ηλιακή ακτινοβολία. Αναπτύσσεται η βασική θεωρία, αναλύεται η μεθοδολογία και η τεχνική των μετρήσεων, συζητούνται διάφορες παραλλαγές και παρουσιάζονται τυπικά όργανα που χρησιμοποιούνται για το σκοπό αυτό.

Η ιδιότητα των αερίων συστατικών της ατμόσφαιρας, συμπεριλαμβανομένων των αερίων ρύπων, να απορροφούν επιλεκτικά και με διαφορετική ευαισθησία τα διάφορα μήκη κύματος της ηλεκτρομαγνητικής ακτινοβολίας προσφέρει τη δυνατότητα εκτίμησης της περιεκτικότητάς τους στην ατμόσφαιρα χρησιμοποιώντας φασματικές μετρήσεις της ακτινοβολίας. Αυτή η μέθοδος μέτρησης είναι γνωστή ως **φασματοσκοπία διαφορικής οπτικής απορρόφησης** (differential optical absorption spectroscopy - DOAS). Εφαρμόζεται σε φασματικές μετρήσεις της έντασης της ακτινοβολίας από επίγεια και δορυφορικά όργανα. Σήμερα λειτουργεί ένας σημαντικός αριθμός επίγειων οργάνων εγκατεστημένων σε διάφορες περιοχές του πλανήτη, αλλά και αρκετών δορυφορικών οργάνων, που χρησιμοποιούνται για τη μέτρηση πλήθους ατμοσφαιρικών συστατικών.

Η αρχή που αναπτύχθηκε από τον Dobson το 1926 [Dobson and Harrison, 1926] για τη μέτρηση του όζοντος βασίστηκε στην ποσοτική εκτίμηση της απορρόφησης που υφίσταται η ηλιακή ακτινοβολία κατά τη διέλευσή της μέσα από την ατμόσφαιρα. Χρησιμοποιήθηκαν μετρήσεις της έντασης της άμεσης ηλιακής ακτινοβολίας σε δυο διαφορετικά μήκη κύματος στα οποία το όζον εμφανίζει αντίστοιχα έντονη και ασθενή απορρόφηση. Από τη σύγκριση των μετρούμενων εντάσεων, ο Dobson, με κατάλληλη μαθηματική επεξεργασία, υπολόγισε τη σχετική πυκνότητα του όζοντος στον αέρα σε μια στοιχειώδη κατακόρυφη στήλη στην ατμόσφαιρα.

Την ίδια εποχή, οι Goetz και Ladenburg [Gotz and Ladenburg, 1931] πραγματοποίησαν παρόμοιες μετρήσεις κοντά στην επιφάνεια του εδάφους στηριζόμενοι στην ίδια αρχή, χρησιμοποιώντας όμως μια τεχνητή πηγή.

Η δυνατότητα εκτέλεσης μετρήσεων της ακτινοβολίας σε πολύ περισσότερα των δύο μηκών κύματος σχεδόν ταυτόχρονα οδήγησε στην βελτίωση της μεθόδου που εφάρμοσε ο Dobson επιτρέποντας τον ταυτόχρονο προσδιορισμό της συγκέντρωσης περισσότερων αερίων συστατικών. Μεταξύ ατών συγκαταλέγονται το διοξείδιο του θείου (SO<sub>2</sub>), τα οξειδία του αζώτου (NO<sub>x</sub>), το όζον (O<sub>3</sub>), αρωματικοί υδρογονάνθρακες (π.χ., το βενζόλιο και τα παράγωγά του), η αμμωνία (NH<sub>3</sub>) και η φορμαλδεΰδη (HCHO). Αυτή η βελτιωμένη μέθοδος αυτή αναπτύχθηκε πολύ αργότερα [Platt and Perner, 1980; Platt et al., 1979] και καθιερώθηκε ως “τεχνική DOAS”, παρόλο που και οι μέθοδοι που προαναφέρθηκαν με τα δύο μήκη κύματος ανήκουν και αυτές στην ίδια κατηγορία. Η τεχνική DOAS έχει εφαρμοστεί για τη μέτρηση της ατμοσφαιρικής ρύπανσης υπό διάφορες περιβαλλοντικές συνθήκες σε αστικές, βιομηχανικές και αγροτικές περιοχές, αλλά και για τη μέτρηση πολλών αερίων συστατικών που βρίσκονται στη στρατόσφαιρα. Ως πηγή ακτινοβολίας χρησιμοποιούνται η άμεση ή η σκεδαζόμενη ηλιακή ακτινοβολία, ή η ακτινοβολία που εκπέμπεται από τεχνητές πηγές. Οι ανιχνευτές μέτρησης της φασματι-

κής έντασης της ακτινοβολίας των πηγών αυτών είναι τοποθετημένοι, στο έδαφος, σε αεροσκάφη ή σε δορυφόρους.

Στα επόμενα αναπτύσσονται συνοπτικά οι βασικές αρχές της διαφορικής οπτικής απορρόφησης και περιγράφονται οι βασικότεροι τύποι συστημάτων μέτρησης αερίων συστατικών με αυτή τη μέθοδο.

## 11.1 Εφαρμογές της διαφορικής οπτικής απορρόφησης

### 11.1.1 Βασικές αρχές

Όταν μία δέσμη ακτινοβολίας διέρχεται από ένα ατμοσφαιρικό στρώμα, ένα μέρος της απορροφάται από τα διάφορα συστατικά, ένα μέρος της σκεδάζεται από τα μόρια ή τα σωματίδια, ενώ το υπόλοιπο διαπερνά και εξέρχεται από το στρώμα. Η εξερχόμενη ακτινοβολία έχει συνήθως διαφορετικά φασματικά χαρακτηριστικά από την αρχική εισερχόμενη ακτινοβολία διότι η ικανότητα απορρόφησης των συστατικών είναι διαφορετική για τα διάφορα μήκη κύματος της ακτινοβολίας. Αν για παράδειγμα το ατμοσφαιρικό στρώμα περιέχει ένα συστατικό τα μόρια του οποίου απορροφούν ισχυρά την ακτινοβολία σε ένα μήκος κύματος  $\lambda_1$  ενώ απορροφούν ασθενικά ή και καθόλου σε ένα μήκος κύματος  $\lambda_2$ , τότε η ένταση της εισερχόμενης ακτινοβολίας μήκους κύματος  $\lambda_2$  θα μεταβληθεί ελάχιστα, ενώ αυτή στο μήκος κύματος  $\lambda_1$  θα ελαττωθεί σημαντικά. Το μέγεθος της μεταβολής είναι ανάλογο της πυκνότητας των μορίων του συστατικού και της απορροφητικής ικανότητας που παρουσιάζει το συστατικό στο συγκεκριμένο μήκος κύματος.

Στη γενική της μορφή, η διάδοση μονοχρωματικής ακτινοβολίας μέσα από ένα ατμοσφαιρικό στρώμα περιγράφεται από το νόμο του Beer-Lambert-Bouguer [Liou, 2001], ο οποίος συσχετίζει την εξασθένηση που υφίσταται μία μονοχρωματική δέσμη ακτινοβολίας  $I_o(\lambda)$  που διαδίδεται κάθετα μέσα σε ένα ατμοσφαιρικό στρώμα με την ένταση της ακτινοβολίας  $I(\lambda)$  που εξέρχεται από το στρώμα:

$$I(\lambda) = I_o(\lambda) \exp(-\tau(\lambda)) = I_o(\lambda) \exp\left(-\sum \tau_i(\lambda)\right) \quad (11-1)$$

όπου  $\tau(\lambda)$  είναι το ολικό οπτικό πάχος του στρώματος, και  $\tau_i(\lambda)$  το οπτικό πάχος ξεχωριστά για το κάθε συστατικό που περιέχει το στρώμα και προκαλεί απορρόφηση ή σκέδαση της δέσμης της ακτινοβολίας. Το οπτικό πάχος για την απορρόφηση είναι συνάρτηση της πυκνότητας του συστατικού  $\rho_i$  (g/cm<sup>3</sup>), του μαζικού συντελεστή απορρόφησης  $a_i(\lambda)$  (cm<sup>2</sup>/g) και της διαδρομής  $l$  (cm) που διήνυσε η δέσμη μέσα από το υλικό, και η (11-1) γίνεται:

$$I(\lambda) = I_o(\lambda) \exp\left(-\sum_i (a_i(\lambda) \rho_i l) - \tau_R - \tau_M\right) \quad (11-2)$$

όπου τα οπτικά βάθη με δείκτες R και M αντιπροσωπεύουν αντίστοιχα την εξασθένηση λόγω της σκέδασης από τα μόρια (Rayleigh) και τα αιωρούμενα σωματίδια (Mie).

Οι συντελεστές απορρόφησης  $a_i(\lambda)$  για τα διάφορα συστατικά και για διάφορες φασματικές περιοχές προκύπτουν από μετρήσεις που γίνονται μέσα στο εργαστήριο, υπό συνθήκες που προσομοιάζουν τις πραγματικές συνθήκες θερμοκρασίας και πίεσης υπό τις οποίες βρίσκονται τα συστατικά αυτά στην ατμόσφαιρα.

Όταν χρησιμοποιείται ως πηγή της ακτινοβολίας ο ήλιος, η δέσμη διανύει όλη την ατμόσφαιρα σε μια διαδρομή υπό κλίση που καθορίζεται από τη γωνία πρόσπτωσης των ηλιακών ακτίνων  $\theta$  (ζενίθεια γωνία). Η διαδρομή αυτή είναι μεγαλύτερη σχετικά με την κατακόρυφο κατά τον παράγοντα ( $1/\cos\theta = \sec\theta$ ), ο οποίος περιγράφει της επιμήκυνση της διαδρομής της δέσμης (άρα και της εξασθένησης) σε σχέση με την κατακόρυφο. Τότε  $l = z/\cos\theta$ , όπου η μεταβλητή  $z$  αναφέρεται στο ύψος που μετράται κατακόρυφα από το έδαφος. Λαμβάνοντας επίσης υπόψη ότι η πυκνότητα των συστατικών μεταβάλλεται συναρτήσει του ύψους από το έδαφος, η (11-2), η οποία αναφέρεται σε στρώμα μικρού πάχους, διαφοροποιείται ως εξής:

$$I(\lambda) = I_o(\lambda) \exp\left(-\sum_i \left(\int_0^\infty \alpha_i(\lambda) \rho_i \sec\theta dz\right) - \sec\theta\tau_R - \sec\theta\tau_M\right) \quad (11-3)$$

όπου η ολοκλήρωση γίνεται για όλο το πάχος της ατμόσφαιρας από το έδαφος ( $z=0$ ) μέχρι το άνω όριο ( $z=\infty$ ). Για τον ίδιο λόγο, ο παράγοντας επιμήκυνσης εμφανίζεται και στους όρους που περιγράφουν τη σκέδαση, επειδή η διάδοση της δέσμης υπό κλίση συνεπάγεται ενίσχυση της σκέδασης μια και η δέσμη συναντά μεγαλύτερη ποσότητα συστατικών. Στην πραγματικότητα, η επιμήκυνση της διαδρομής είναι συνάρτηση της ποσότητας του συστατικού που προκαλεί την εξασθένηση κατά μήκος της διαδρομής, όπως θα συζητηθεί παρακάτω.

Ονομάζεται **ποσότητα απορροφητή**, ή **επιφανειακή πυκνότητα**, ή **πυκνότητα στήλης κατά μάζα** ( $\text{kg/m}^2$ ) ενός αερίου συστατικού κατά τη διαδρομή που διανύει μία δέσμη ακτινοβολίας, το μέγεθος:

$$u_i = \int \rho_i dz = \frac{M}{N_A} \int n_i dz \quad (11-4)$$

όπου  $M$  είναι το μοριακό βάρος ( $\text{kg/mol}$ ) και  $N_A$  ο αριθμός του Avogadro ( $6.02295 \times 10^{23}$  molecules/mol) και  $n$  (molecules/cm<sup>3</sup>) η αριθμητική πυκνότητα.

Επειδή κατά την εφαρμογή της τεχνικής DOAS χρησιμοποιείται συνήθως η αριθμητική πυκνότητα αντί της πυκνότητας, τότε η ποσότητα:

$$q_i = \int n_i dz = u_i \frac{N_A}{M} \quad (11-5)$$

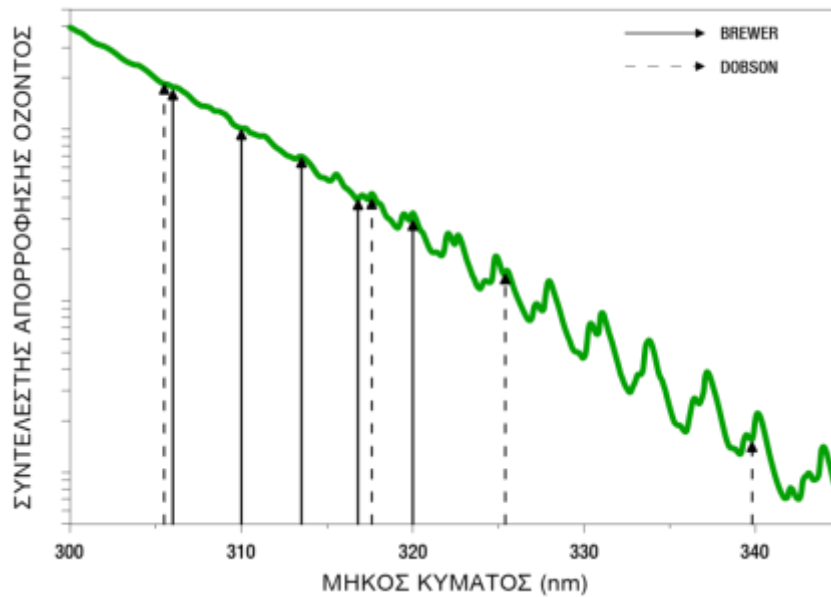
αναφέρεται ως **αριθμητική πυκνότητα στήλης** του συστατικού (molecules/m<sup>2</sup>), ή απλώς **στήλη**. Ανάλογα με τη γεωμετρία της διαδρομής της ακτινοβολίας στην ατμόσφαιρα αναφερόμαστε ειδικότερα σε **κατακόρυφη**, **πλάγια** ή **οριζόντια στήλη** του συστατικού.

Από τις σχέσεις (11-4) και (11-5) προκύπτει ότι η στήλη εκφράζει ουσιαστικά τη μέση πυκνότητα, αριθμητική ή κατά μάζα, του συστατικού κατά τη διαδρομή της δέσμης της ακτινοβολίας. Στην περίπτωση οριζόντιας ή πλάγιας στήλης η μεταβλητή  $z$  αντικαθίσταται αντίστοιχα από τη διαδρομή  $l$  ή την μεταβλητή ( $z \cos\theta$ ).

### 11.1.2 Μέθοδος DOAS σε ζεύγη μηκών κύματος

Αρχικά η μέθοδος της διαφορικής απορρόφησης εφαρμόστηκε στο φασματοφωτόμετρο τύπου Dobson [Dobson, 1931] για τον προσδιορισμό της κατακόρυφης στήλης του όζο-

ντος (O3) και χρησιμοποιήθηκαν μετρήσεις της έντασης της ηλιακής ακτινοβολίας σε 2 μήκη κύματος, ένα με ισχυρή και ένα με ασθενή απορρόφηση. Αργότερα η μέθοδος βελτιώθηκε με τη χρήση μετρήσεων σε 4 μήκη κύματος (σχήμα 11.1). Το 1973 ο Brewer [Brewer, 1973] ανέπτυξε ένα νέο όργανο (φασματοφωτόμετρο Brewer) που χρησιμοποιεί ταυτόχρονες μετρήσεις σε 5 μήκη κύματος (σχήμα 11.1) παρέχοντας τη δυνατότητα εκτίμησης επιπλέον το όζοντος και της στήλης του διοξειδίου του θείου στην ατμόσφαιρα. Η ατμόσφαιρα περιέχει εκτός από τα βασικά της συστατικά πολλά συστατικά σε ίχνη (πολύ μικρές συγκεντρώσεις) τα οποία απορροφούν σε κοινές φασματικές περιοχές. Έτσι η εξασθένηση που υφίσταται μια δέσμη ακτινοβολίας σε κάποιο μήκος κύματος προκαλείται συνήθως από την απορρόφηση πολλών συστατικών. Γι' αυτό το λόγο, η επιλογή των μηκών κύματος γίνεται με βάση ορισμένες προϋποθέσεις ώστε να ελαχιστοποιείται η αλληλεπίδραση των άλλων συστατικών.



**Σχήμα 11.1** Μορφή του συντελεστή απορρόφησης του όζοντος σε λογαριθμική κλίμακα. Η θέσεις των κατακόρυφων βελών αντιστοιχούν στα μήκη κύματος στα οποία γίνονται οι μετρήσεις των φασματοφωτομέτρων Dobson και Brewer.

Για την απλούστερη παρουσίαση της μεθόδου, ας υποθέσουμε ότι ένα ατμοσφαιρικό στρώμα περιέχει μόνο ένα συστατικό που απορροφά την ακτινοβολία. Με πολύ καλή προσέγγιση ο συντελεστής απορρόφησης  $\alpha(\lambda)$  μπορεί να θεωρηθεί ανεξάρτητος του ύψους και η (11-3) γράφεται για ένα μήκος κύματος  $\lambda$  με την ακόλουθη μορφή:

$$I(\lambda) = I_o(\lambda) \exp(-\alpha_i(\lambda)\mu\mu_i - m\tau_R(\lambda) - m'\tau_M(\lambda)) \quad (11-6)$$

όπου οι όροι  $\sec\theta$  αντικαταστάθηκαν με τις παραμέτρους  $\mu$ ,  $m$  και  $m'$  οι οποίες αντιπροσωπεύουν με μεγαλύτερη ακρίβεια την επιμήκυνση της διαδρομής και υπολογίζονται από τις σχέσεις:

$$\mu = \frac{\int \rho \sec \theta dz}{\int \rho dz}, \quad m = \frac{\int \rho_a \sec \theta dz}{\int \rho_a dz}, \quad m' = \frac{\int \tau_M(\lambda) \sec \theta dz}{\int \tau_M(\lambda) dz} \quad (11-7)$$

όπου  $\rho$  είναι η πυκνότητα του αερίου που απορροφά ενώ  $\rho_0$  η πυκνότητα των μορίων του ατμοσφαιρικού αέρα. Επειδή η καθ' ύψος κατανομή των ποσοτήτων  $\rho$  και  $\tau M$  δεν είναι γνωστή, στους παραπάνω υπολογισμούς χρησιμοποιούνται συνήθως τυπικές τιμές τους. Να σημειωθεί ότι στην (11-7) δεν ενδιαφέρει η γνώση των απολύτων τιμών των πυκνοτήτων αλλά μόνο η σχετική μεταβολή τους καθ' ύψος. Αν η μέτρηση γίνεται σε κάποιο ύψος μέσα στην ατμόσφαιρα, τότε στη μοριακή σκέδαση συμμετέχει μικρότερη ποσότητα μορίων κατά τον παράγοντα  $\rho/\rho_0$ , όπου  $\rho$  είναι η ατμοσφαιρική πίεση στο ύψος της μέτρησης και  $\rho_0$  η πίεση στο μέσο ύψος της θάλασσας (1013.15 hPa). Τέλος σημειώνεται ότι για γωνίες πρόσπτωσης της δέσμης μεγαλύτερες από περίπου  $70^\circ$  γίνεται σημαντική η επίδραση της διάθλασης των ηλιακών ακτίνων κατά τη διάδοσης της δέσμης από αραιότερα σε πυκνότερα ατμοσφαιρικά στρώματα που έχει σαν αποτέλεσμα τη σταδιακή μεταβολή της γωνίας  $\theta$ . Σε αυτές τις περιπτώσεις εισάγονται κατάλληλοι διορθωτικοί παράγοντες στον υπολογισμό των παραμέτρων  $\mu$ ,  $m$  και  $m'$ .

Ο όρος  $u_i$  στην (11-6) αντιπροσωπεύει τη συνολική ποσότητα του αερίου που απορροφά σε κατακόρυφη διαδρομή της δέσμης ακτινοβολίας και είναι η παράμετρος την οποία επιζητούμε να μετρήσουμε. Ειδικά για το όζον, έχει καθιερωθεί η χρήση της ποσότητας

$$X = \frac{1}{\rho_0} \int \rho dz = \frac{u_i}{\rho_0}, \text{ δηλαδή η ποσότητα του απορροφητή που έχει αναχθεί σε κανονι-}$$

κές συνθήκες θερμοκρασίας (273 K) και πίεσης (1013 hPa). Αναφέρεται συνήθως ως **ολικό όζον** ή ως **ολική στήλη του όζοντος**, με μονάδα μέτρησης το DU (Dobson unit) ή m-atm-cm, προς τιμήν του G.M.B. Dobson, ο οποίος κατασκεύασε το πρώτο, ομώνυμό του, όργανο μέτρησης του ολικού όζοντος στη δεκαετία του 1920. Από την παραπάνω σχέση προκύπτει ότι η μονάδα μέτρησης του  $X$  είναι μήκος. Εκφράζει το ύψος που θα καταλάμβαναν όλα τα μόρια του όζοντος που περιέχονται σε μια κατακόρυφη στήλη μοναδιαίου εμβαδού υπό κανονικές συνθήκες (1 DU = 10<sup>-3</sup> cm). Για παράδειγμα, 300 DU όζοντος αντιστοιχούν σε ύψος 3 mm.

Μπορούμε τώρα να ξαναγράψουμε τη σχέση (11-6) για ένα δεύτερο μήκος κύματος  $\lambda'$ , στο οποίο απορροφά επίσης το συστατικό που υποθέσαμε στην αρχή (και μόνο αυτό). Στη συνέχεια λογαριθμίζουμε τις δύο σχέσεις και τις αφαιρούμε μεταξύ τους, οπότε προκύπτει η:

$$\begin{aligned} & (\ln I(\lambda) - \ln I(\lambda')) = \\ & = (\ln I_0(\lambda) - \ln I_0(\lambda')) + (\alpha(\lambda') - \alpha(\lambda)) \mu X + (\tau_R(\lambda') - \tau_R(\lambda)) m + (\tau_M(\lambda') - \tau_M(\lambda)) m' \end{aligned} \quad (11-8)$$

Τέλος, με αντικατάσταση των διαφορών που βρίσκονται μέσα στις παρενθέσεις προκύπτει η σχέση:

$$F = F_0 + \Delta\alpha \mu X + \Delta\tau_R m + \Delta\tau_M m' \quad (11-9)$$

Για γειτονικά μήκη κύματος  $\lambda$  και  $\lambda'$  μπορούμε να θεωρήσουμε ότι η εξασθένιση από τα ατμοσφαιρικά αιωρήματα είναι περίπου η ίδια και στα δύο μήκη κύματος, οπότε η διαφορά  $\Delta\tau_M$  θεωρείται σε πρώτη προσέγγιση ίση με μηδέν. Έτσι η σχέση (11-9) γράφεται:

$$X = \frac{F - \Delta\tau_R m - F_0}{\Delta\alpha \mu} \quad (11-10)$$

Από τους όρους της (11-10) μπορούμε να υπολογίσουμε τα  $\Delta a$  (από μετρήσεις των συντελεστών απορρόφησης υπό ελεγχόμενες συνθήκες μέσα στο εργαστήριο) και  $\Delta \tau_R$  (από εμπειρικές σχέσεις σε συνδυασμό με μετρήσεις της ατμοσφαιρικής πίεσης), ενώ οι όροι  $\mu$  και  $m$  υπολογίζονται με ακρίβεια από την ώρα που γίνονται οι μετρήσεις της έντασης της ακτινοβολίας στα δύο μήκη κύματος, σε συνδυασμό με τις γεωγραφικές συντεταγμένες του τόπου. Ο παράγοντας  $F$  υπολογίζεται από τις εντάσεις στα δύο μήκη κύματος, οι οποίες πρέπει να μετρώνται σχεδόν ταυτόχρονα. Για να καταστεί δυνατός ο υπολογισμός του  $X$  απομένει μόνο ο προσδιορισμός του παράγοντα  $F_0$ , ο οποίος όμως είναι μία σταθερά εφόσον αναφέρεται στην ένταση της ακτινοβολίας πριν αυτή αρχίσει να διαδίδεται μέσα στην ατμόσφαιρα. Η μέθοδος προσδιορισμού του  $F_0$  περιγράφεται στην επόμενη ενότητα 11.1.2.1.

Θα πρέπει να σημειωθεί εδώ ότι οι όροι  $F$  και  $F_0$ , συνδέονται εξ ορισμού μόνο με την ένταση της ηλιακής ακτινοβολίας που μετράται στο έδαφος,  $I_\lambda$ , ή στο όριο της ατμόσφαιρας,  $I_{\lambda 0}$ , [βλέπε σχέσεις (11-8) και (11-9)]. Άρα στην πραγματικότητα τα  $F$  και  $F_0$  περιέχουν για κάθε ένα από τα δύο μήκη κύματος το γινόμενο του σήματος  $S(\lambda)$  του οργάνου μέτρησης και του συντελεστή βαθμονόμησης  $C(\lambda)$ , ο οποίος είναι συνάρτηση του μήκους κύματος. Στην προκειμένη περίπτωση όμως, η απόκριση του οργάνου για τη μέτρηση στο έδαφος και τη μέτρηση στο όριο της ατμόσφαιρας είναι η ίδια για κάθε μήκος κύματος. Αν για παράδειγμα η απόκριση για το μήκος κύματος  $\lambda$  είναι  $C(\lambda)$  και για το  $\lambda'$  είναι  $C(\lambda')$  τότε οι δύο αυτοί συντελεστές θα εμφανιζόταν και στα δύο μέλη της (11-8), οπότε θα απαλείφονταν.

Επειδή η διαδικασία απόλυτης βαθμονόμησης είναι επίπονη και επειδή στη μέθοδο που αναπτύχθηκε αρκούν σχετικές μόνο μετρήσεις (λόγω της χρήσης λόγων ακτινοβολίας σε δύο μήκη κύματος) δεν είναι απαραίτητη η χρήση απόλυτων μεγεθών. Γι' αυτό το λόγο δεν είναι απαραίτητος ο άμεσος προσδιορισμός του  $F_0$  από μετρήσεις της ηλιακής ακτινοβολίας στο όριο της ατμόσφαιρας (π.χ. από δορυφόρους).

Η βασική σχέση (11-8) μπορεί βελτιωθεί με τη χρήση περισσότερων από δύο μηκών κύματος, αυξάνοντας έτσι την ακρίβεια προσδιορισμού της στήλης του όζοντος. Οι εξισώσεις του τύπου της (11-6) αρχικά πολλαπλασιάζονται κατά μέλη με κάποιο συντελεστή βάρους  $w_i$  η κάθε μία και μετά αθροίζονται. Έτσι για  $k$  μήκη κύματος έχουμε  $k$  εξισώσεις και η (11-8) παίρνει τη μορφή:

$$\sum_{i=1}^k w_i \ln I(\lambda_i) = \sum_{i=1}^k w_i \ln I_0(\lambda_i) + \left( \sum_{i=1}^k w_i a(\lambda_i) \right) \mu X + \left( \sum_{i=1}^k w_i \tau_R(\lambda_i)_{\lambda_i} \right) m + \left( \sum_{i=1}^k w_i \tau_M(\lambda_i) \right) m' \quad (11-11)$$

Οι συντελεστές βαρύνουν τους όρους της εξίσωσης έτσι ώστε η ποσότητα  $\Delta \tau_M$  να μηδενίζεται, ενώ η ποσότητα  $\Delta a$  να μεγιστοποιείται. Και στην περίπτωση αυτή καταλήγουμε σε μία γραμμική σχέση της μορφής της (11-9) όπως και για τα δύο μήκη κύματος.

Τέλος, αν σε κάποια μήκη κύματος παρουσιάζει απορρόφηση και κάποιο άλλο ατμοσφαιρικό συστατικό, τότε στην εξίσωση (11-11) προστίθενται επί πλέον όροι που περιγράφουν την εξασθένιση από τα υπόλοιπα συστατικά. Παράλληλα προστίθενται επιπλέον εξισώσεις με τη χρήση και άλλων μηκών κύματος, ώστε να μπορεί να επιλυθεί το σύστημα των εξισώσεων που προκύπτει, ενώ με την επιλογή κατάλληλων συντελεστών βάρους ελαχιστοποιείται η συνεισφορά των επιπλέον αερίων που απορροφούν στα συγκεκριμένα μήκη κύματος.

### 11.1.2.1 Προσδιορισμός της σταθεράς $F_0$

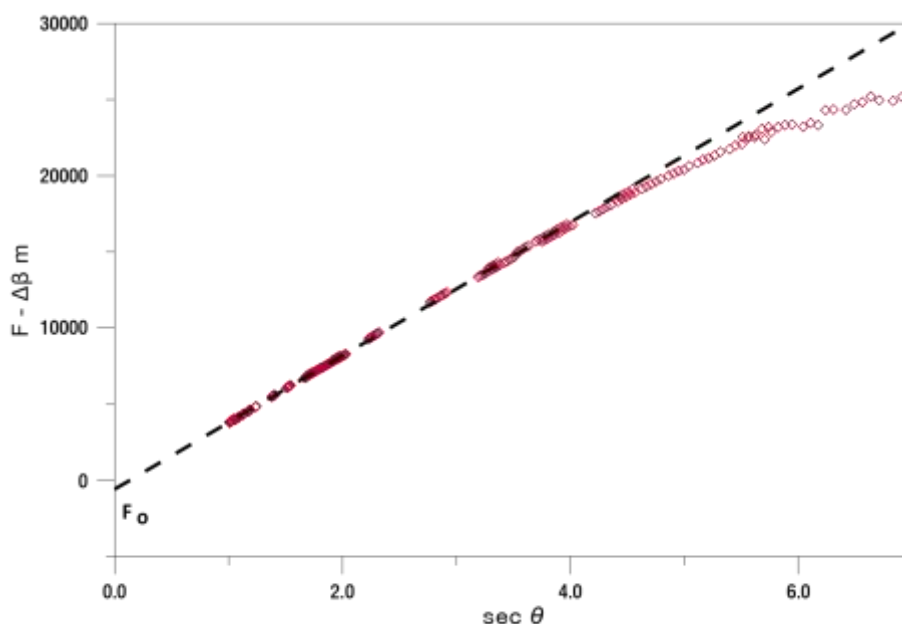
Ο προσδιορισμός του  $F_0$  μπορεί να γίνει χρησιμοποιώντας τη μέθοδο προβολής Langley (Langley extrapolation method) [Abbot and Fowle, 1908]. Με αντιμετάθεση των όρων, η (11-10) γράφεται υπό την μορφή:

$$F - \Delta\tau_R m = F_0 + \Delta\alpha \mu X \quad (11-12)$$

Η σχέση αυτή είναι μία γραμμική συνάρτηση της μορφής:

$$y = A + Bx, \quad \text{για} \quad y = F - \Delta\tau_R m, \quad x = \mu, \quad A = F_0, \quad B = \Delta\alpha X \quad (11-13)$$

με την προϋπόθεση ότι οι παράγοντες  $A$  και  $B$  είναι σταθερές. Ο ακριβής προσδιορισμός τους μπορεί να γίνει από σειρά μετρήσεων των μεγεθών  $y$  και  $x$  κατά τη διάρκεια μίας ή περισσότερων ημερών με τη χρήση στατιστικών μεθόδων (ευθείες ελαχίστων τετραγώνων), εφόσον εξασφαλίζεται η σταθερότητά τους, δηλαδή η σταθερότητα των ποσοτήτων  $F_0$ ,  $\Delta\alpha$  και  $X$ , κατά τη διάρκεια των μετρήσεων.



**Σχήμα 11.2** Παράδειγμα προσδιορισμού της σταθεράς  $F_0$  με γραφικό τρόπο (μέθοδος Langley) από μετρήσεις του ΕΦΑ με το φασματοφωτόμετρο Brewer στο παρατηρητήριο Izana της Τενερίφης σε υψόμετρο 2.390 m. Η ευθεία ελαχίστων τετραγώνων προσδιορίστηκε λαμβάνοντας υπόψη τις τιμές του  $\mu$  μεταξύ 0 και 4.

Ο όρος  $y$  είναι η διαφορά των λογαρίθμων της μετρούμενης έντασης της άμεσης ακτινοβολίας στα δύο μήκη κύματος, αφού αφαιρεθεί η συνεισφορά της μοριακής σκέδασης ( $\Delta\tau_R m$ ). Όπως προαναφέρθηκε, το φασματικό οπτικό πάχος της μοριακής σκέδασης είναι γνωστό και διαθέσιμο από τη βιβλιογραφία [Hansen and Travis, 1974]. Ο όρος  $x$  αντιπροσωπεύει την ενίσχυση της απορρόφησης λόγω επιμήκυνσης της διαδρομής της ακτινοβολίας και μπορεί να υπολογιστεί για κάθε μέτρηση του  $F$ .

Πραγματοποιώντας, λοιπόν, μετρήσεις της ποσότητας  $F$  για διάφορες γωνίες πρόσπτωσης  $\theta$  (ζενίθια γωνία του ήλιου) από την ανατολή μέχρι τη δύση του ήλιου κατά τη

διάρκεια μίας ή περισσότερων ημερών, δημιουργούνται ζεύγη των μεγεθών  $y$  και  $x$ , από τα οποία με τη μέθοδο των ελαχίστων τετραγώνων μπορεί να υπολογισθεί η καλύτερη ευθεία που τα περιγράφει (βλέπε σχήμα 11.2). Ο προσδιορισμός του συντελεστή  $A$  της ευθείας, οδηγεί στον προσδιορισμό της ζητούμενης τιμής του  $F_0$  (11-13).

Όπως προαναφέρθηκε, για να είναι γραμμική η (11-12) πρέπει η ποσότητα  $B = \Delta\alpha X$  να είναι σταθερή. Οι συντελεστές απορρόφησης  $a(\lambda)$  εξαρτώνται μόνο από το μήκος κύματος της ακτινοβολίας και δεν μεταβάλλονται κατά τη διάρκεια των μετρήσεων<sup>1</sup>. Συνεπώς η σταθερότητα του  $B$  εξαρτάται μόνο από τη σταθερότητα του  $X$ , που είναι όμως το άγνωστο και τελικώς ζητούμενο μέγεθος. Η σταθερότητα της στήλης του όζοντος εξασφαλίζεται όταν οι μετρήσεις γίνονται σε συγκεκριμένες εποχές και περιοχές του πλανήτη όπου η από μέρα σε μέρα μεταβλητότητα του όζοντος είναι πολύ μικρή (π.χ. σε τροπικά γεωγραφικά πλάτη κατά το καλοκαίρι ή το φθινόπωρο).

Θα πρέπει εδώ να σημειωθεί ότι η σχέση (11-10) προέκυψε μεταξύ άλλων και από την υπόθεση ότι το  $\Delta\tau_M$  είναι μηδέν για γειτονικά μήκη κύματος, η οποία εξασφαλίζεται καλύτερα όταν η περιεκτικότητα της ατμόσφαιρας σε αιωρήματα είναι μικρή. Αυτό συμβαίνει, για παράδειγμα, σε περιοχές με πολύ μεγάλο υψόμετρο, αφού οι κύριες πηγές των ατμοσφαιρικών αιωρημάτων βρίσκονται κοντά στο έδαφος, και μακριά από πόλεις ή βιομηχανικές δραστηριότητες.

Τέλος, είναι εφικτό να ελεγχθεί εκ των υστέρων η υπόθεση ότι ένα ατμοσφαιρικό συστατικό δεν παρουσίασε μεταβολές κατά τη διάρκεια των μετρήσεων για τον προσδιορισμό του  $F_0$ , ελέγχοντας την ποιότητα της ευθείας των ελαχίστων τετραγώνων που προκύπτει. Αν η ποσότητα  $X$  μεταβληθεί κατά τη διάρκεια των μετρήσεων, τότε κάποια από τα σημεία στο σχήμα 11.2 θα αποκλίνουν σαφώς από την ιδανική ευθεία (βλέπε π.χ. τα σημεία για τιμές του  $\sec \theta > 4$ ). Στην περίπτωση αυτή, είτε επαναλαμβάνεται η διαδικασία σε κάποια άλλη ημέρα, ή -εφόσον τα αποκλίνοντα σημεία είναι λίγα- αυτά μπορούν να εξαιρεθούν από τα σημεία που λαμβάνονται υπόψη στον προσδιορισμό της ευθείας.

Τελικά, θα πρέπει να τονιστεί ότι η σταθερά  $F_0$  αποτελεί μία χαρακτηριστική σταθερά του οργάνου και, εφόσον μπορεί να εξασφαλιστεί η σταθερότητα της σχετικής απόκρισης (ευαισθησίας) του οργάνου στο χρόνο, δεν είναι απαραίτητος ο επαναπροσδιορισμός της σταθεράς αυτής. Θεωρείται βεβαίως ότι η σχετική ένταση της ηλιακής ακτινοβολίας στο όριο της ατμόσφαιρας μεταξύ των δύο μηκών κύματος παραμένει επίσης σταθερή, υπόθεση που δεν απέχει πολύ από την πραγματικότητα τουλάχιστον για χρονικά διαστήματα αρκετών ετών

### 11.1.2.2 Διαδικασία εκτέλεσης των μετρήσεων

Τα δύο γνωστά όργανα αυτής της κατηγορίας, τα φασματοφωτόμετρα Dobson και Brewer (εικόνα 11.1) στηρίζονται στη χρήση πολλαπλών σχισμών εξόδου της ακτινοβολίας από τον μονοχρωμάτορα οι οποίες αντιστοιχούν τα επιθυμητά μήκη κύματος. Στο πρώτο με κατάλληλο μηχανισμό ενεργοποιούνται 2 σχισμές κάθε φορά που αντιστοιχούν στα δύο μήκη κύματος που χρησιμοποιούνται για τις μετρήσεις, και μετράται η σχετική μεταβολή της έντασης μεταξύ των δύο μηκών κύματος.

<sup>1</sup> Στην πραγματικότητα οι συντελεστές απορρόφησης εξαρτώνται από τη θερμοκρασία του συστατικού, αλλά η σχετική συζήτηση ξεφεύγει από τους στόχους του συγγράμματος.



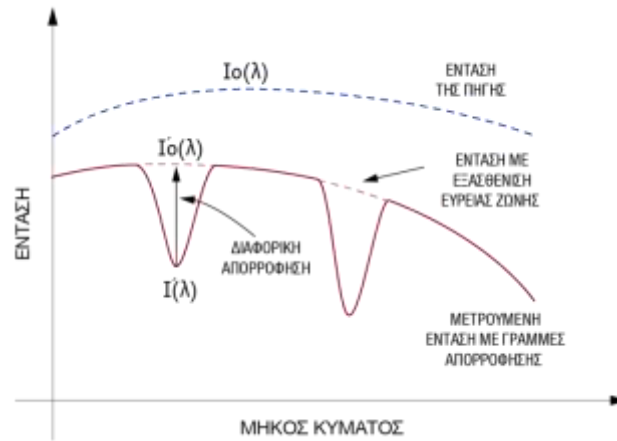


**Εικόνα 11.1** Φασματοφωτόμετρα τύπου Dobson (*Aerological Observatory Tsukuba, Ιαπωνική Μετεωρολογική Υπηρεσία*) και Brewer (*Εργαστήριο Φυσικής της Ατμόσφαιρας, ΑΠΘ*).

Το φασματοφωτόμετρο Brewer χρησιμοποιεί μια περιστρεφόμενη μάσκα η οποία επιτρέπει εκ περιτροπής το άνοιγμα μίας από τις 4 σχισμές και τη μέτρηση της έντασης της ακτινοβολίας. Η εναλλαγή γίνεται πολύ γρήγορα (λιγότερο από ένα δευτερόλεπτο), έτσι ώστε οι μετρήσεις στα 4 μήκη κύματος να θεωρούνται σχεδόν ταυτόχρονες.

### 11.1.3 Μέθοδος DOAS σε φασματικές μετρήσεις

Η μέθοδος DOAS με φασματικές μετρήσεις εκμεταλλεύεται τη χαρακτηριστική δομή που προκαλείται στο φάσμα της ακτινοβολίας από την απορρόφηση πλήθους αερίων που βρίσκονται σε ίχνη στην ατμόσφαιρα (*trace gases*), αγνοώντας την μάλλον ομαλή φασματική εξασθένηση που υφίσταται η ακτινοβολία λόγω σκέδασης από μόρια και αιωρήματα ή λόγω των οπτικών χαρακτηριστικών των οργάνων μέτρησης. Στηρίζεται βασικά στην αφαίρεση από το μετρούμενο φάσμα της έντασης της ακτινοβολίας των επιδράσεων αυτών, έτσι ώστε το αφήνοντας μόνο την επίδραση από τις αυξομειώσεις του φάσματος απορρόφησης των διαφόρων αερίων. Στο σχήμα 11.3, το φάσμα της εξερχόμενης από το ατμοσφαιρικό στρώμα ακτινοβολίας έντασης  $I(\lambda)$  παρουσιάζει μία ομαλή, φασματικά, εξασθένηση σχετικά με το φάσμα της εισερχόμενης ακτινοβολίας  $I_0(\lambda)$ , όμως στα μήκη κύματος όπου η ικανότητα απορρόφησης του αερίου είναι μεγαλύτερη η εξασθένηση είναι εντονότερη (αιχμές προς τα κάτω). Η επιπλέον αυτή εξασθένηση σχετικά με τα γειτονικά μήκη κύματος εισάγει την έννοια της διαφορικής απορρόφησης.



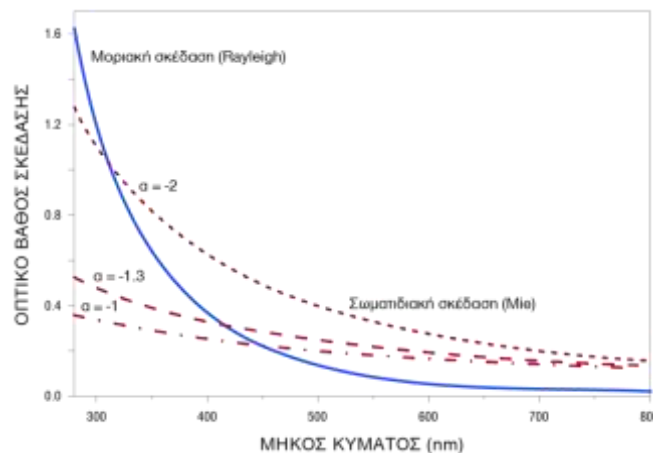
**Σχήμα 11.3** Σχηματική παρουσίαση της διαφορικής απορρόφησης.

Χρησιμοποιώντας την αριθμητική πυκνότητα  $n$  και την ενεργό διατομή απορρόφησης  $\sigma(\lambda)$  αντί της πυκνότητας και του συντελεστή απορρόφησης στο νόμο των Beer-Lambert-Bouguer η σχέση (11-3) γράφεται ως:

$$I(\lambda) = I_0(\lambda) \exp \left( - \sum_i \left( \int_{l_1}^{l_2} \sigma_i(\lambda) n_i(l) dl \right) - \tau_R - \tau_M \right) \quad (11-14)$$

όπου ο δείκτης  $i$  αντιπροσωπεύει τον αριθμό των αερίων που απορροφούν, ενώ τα όρια της ολοκλήρωσης αναφέρονται γενικά σε μία διαδρομή της δέσμης της ακτινοβολίας στο χώρο μεταξύ δύο σημείων  $l_1$  και  $l_2$ , στα οποία αντιστοιχούν η εξερχόμενη  $I(\lambda)$  και εισερχόμενη  $I_0(\lambda)$  ένταση. Τα σημεία αυτά μπορεί να αντιστοιχούν και σε διαδρομή από το έδαφος μέχρι το άνω όριο της ατμόσφαιρας. Τέλος, η αριθμητική πυκνότητα εισάγεται ως συνάρτηση της θέσης διότι εν δυνάμει μεταβάλλεται.

Λόγω της ομαλής τους φασματικής διακύμανσης, οι δύο τελευταίοι όροι στον εκθέτη που αντιπροσωπεύουν το οπτικό πάχος για τη μοριακή και σωματιδιακή σκέδαση (σχήμα 11.4) προκαλούν μια φασματικά ομαλή εξασθένηση της δέσμης, παρέχοντας τη δυνατότητα να εξαλειφθεί η επίδραση τους στο μετρούμενο φάσμα της ακτινοβολίας με την εφαρμογή στο φασματικό λόγο των εντάσεων ενός πολυωνυμικού μοντέλου παλινδρόμησης με τη μέθοδο των ελαχίστων τετραγώνων.



**Σχήμα 11.4** Φασματική διακύμανση του οπτικού πάχους για τη μοριακή και σωματιδιακή σκέδαση. Για την τελευταία παρουσιάζεται το οπτικό πάχος για διάφορους τύπους ατμοσφαιρικών αιωρημάτων, οι οποίοι αντιστοιχούν σε διαφορετικούς εκθέτες Ångstrom ( $\alpha$ ).

Αν θεωρήσουμε ότι η ενεργός διατομή απορρόφησης ενός αερίου αποτελείται από τη σύνθεση μιας ομαλής καμπύλης  $\sigma_b(\lambda)$  και της χαρακτηριστικής δομής  $\sigma_s(\lambda)$  μεταξύ γειτονικών μηκών κύματος, το πολυωνυμικό μοντέλο αφαιρεί επίσης και την εξασθένηση που προκαλεί στην ακτινοβολία το ομαλό τμήμα της απορρόφησης. Για παράδειγμα, στο Σχήμα 11.1 ως ομαλό μέρος θεωρούμε τη σχεδόν γραμμική τάση του συντελεστή απορρόφησης να μειώνεται αυξανόμενου του μήκους κύματος, πάνω στην οποία α εμφανίζονται τα μέγιστα και ελάχιστα της απορρόφησης. Τότε η (11-14) γίνεται:

$$\ln \frac{I(\lambda)}{I_o(\lambda)} = - \sum_i \left( \int_{l_1}^{l_2} (\sigma_{bi}(\lambda) + \sigma_{si}(\lambda)) n_i(l) dl \right) - \tau_R - \tau_M$$

$$D'(\lambda) = \ln \frac{I(\lambda)}{I_o(\lambda)} - P(\lambda) = \sum_i \int_{l_1}^{l_2} \sigma_{si}(\lambda) n_i(l) dl + \delta(\lambda) \quad (11-15)$$

Όπου  $P(\lambda)$  είναι το πολυωνυμικό μοντέλο που περιλαμβάνει την επίδραση των δύο όρων της σκέδασης και της ομαλής διακύμανσης του  $\sigma_i(\lambda)$ . Το  $\sigma_{si}(\lambda)$  προκύπτει επίσης με την εφαρμογή ενός πολυωνυμικού μοντέλου παλινδρόμησης στο  $\sigma_i(\lambda)$ , το οποίο ουσιαστικά είναι το  $\sigma_b(\lambda)$ .

Η διαφορά  $D'$  στο αριστερό σκέλος της (11-15) μπορεί να υπολογιστεί αν είναι γνωστό το φάσμα της εισερχόμενης έντασης το οποίο συνήθως ονομάζεται και **φάσμα αναφοράς**. Το φάσμα αναφοράς είναι συνήθως άγνωστο και στις διάφορες παραλλαγές της μεθόδου DOAS ακολουθούνται διαφορετικές μεθοδολογίες για τον προσδιορισμό του. Ας σημειωθεί βέβαια ότι επειδή το πολυωνυμικό μοντέλο  $P(\lambda)$  αφαιρεί όλες τις ομαλές διακυμάνσεις, από το φάσμα αναφοράς ενδιαφέρει μόνο η φασματική δομή του και όχι το απόλυτο μέγεθος.

Οι όροι που περιέχονται στο άθροισμα του δεξιού μέλους της (11-15) αναφέρονται σε διαφορετικά συστατικά που απορροφούν στην περιοχή των φασματικών μετρήσεων. Ο όρος  $\delta(\lambda)$  που έχει προστεθεί αντιπροσωπεύει το υπόλοιπο (residual) του οπτικού πάχους που δεν μπορεί να περιγραφεί από τους όρους που περιλαμβάνει το άθροισμα. Αυτό μπορεί να προέρχεται από άλλα συστατικά που δεν έχουν ληφθεί υπόψη και απορροφούν στην περιοχή, αβεβαιότητες των μετρήσεων της ακτινοβολίας αλλά και θόρυβο που προέρχεται από αδυναμία των πολυωνυμικών μοντέλων να περιγράψουν ακριβώς τις ομαλές διακυμάνσεις του λόγου των εντάσεων ή της ενεργού διατομής απορρόφησης του κάθε συστατικού.

Τέλος με τη θεώρηση ότι η ενεργός διατομή απορρόφησης είναι ανεξάρτητη της διαδρομής και με τη χρήση της (11-5), η (11-15) παίρνει τη μορφή:

$$D'(\lambda) = \sum_i \sigma_{si}(\lambda) q_i + \delta(\lambda) \quad (11-16)$$

Η παράμετρος  $q_i$ , η οποία εκφράζει την ποσότητα του συστατικού σε μία μοναδιαία στήλη κατά τη διαδρομή της δέσμης της ακτινοβολίας, υπολογίζεται ταυτόχρονα για κάθε συστατικό  $i$  με την εφαρμογή μεθόδων πολλαπλής παλινδρόμησης, έτσι ώστε να ελαχιστοποιείται η ποσότητα:

$$\left[ D'(\lambda) - \sum_i \sigma_{si}(\lambda) q_i \right]^2 \quad (11-17)$$

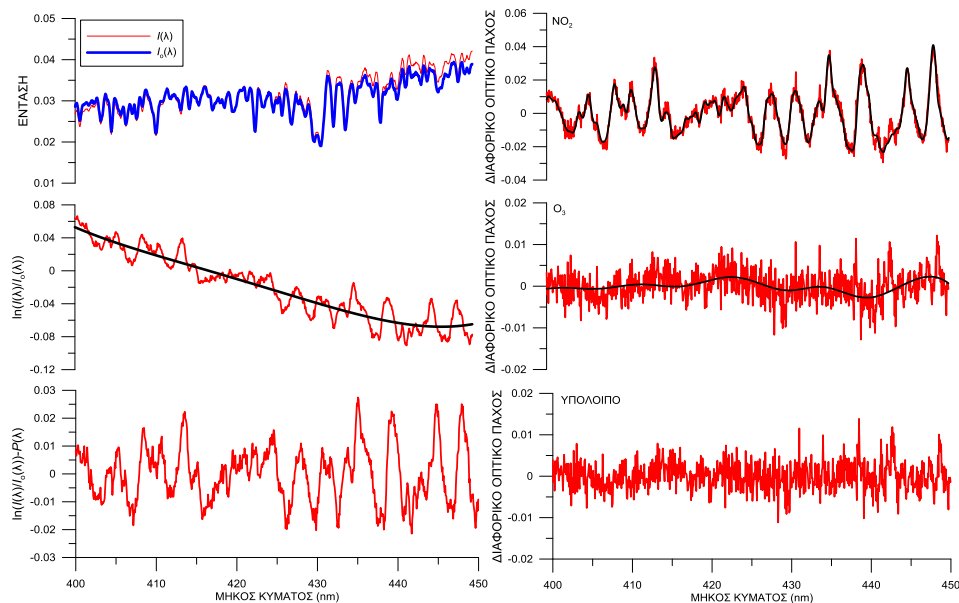
Απώτερος στόχος για την επιτυχία της μεθόδου είναι το φάσμα των υπολοίπου οπτικού πάχους  $\delta(\lambda)$  να είναι κοντά στο μηδέν. Τέλος, αν  $n$  είναι ο αριθμός των μηκών κύματος στην υπό εξέταση φασματική περιοχή, το κανονικό σφάλμα (standard error) των αποτελεσμάτων προκύπτει ως:

$$\varepsilon^2 = \frac{\sum_{\lambda_1}^{\lambda_n} \left[ D'(\lambda) - \sum_i \sigma_{si}(\lambda) q_i \right]^2}{n-1} \quad (11-18)$$

Το φασματικό εύρος των μετρήσεων που χρησιμοποιούνται, ή ο αριθμός των μηκών κύματος, καθορίζεται με βάση τα παρακάτω κριτήρια:

- Μεγάλος αριθμός μηκών κύματος μειώνει το στατιστικό σφάλμα.
- Το διάστημα στη φασματική περιοχή μεγίστης απορρόφησης για κάθε αέριο επιλέγεται έτσι ώστε να ελαχιστοποιεί τις επιδράσεις από τα άλλα αέρια συστατικά που εμφανίζουν έντονη απορρόφηση σε γειτονικά μήκη κύματος, από το θόρυβο, και από άλλους παράγοντες.

Στο σχήμα 11.5 παρουσιάζονται γραφικά τα βήματα της ανάλυσης DOAS για ένα μετρημένο φάσμα της έντασης της ηλιακής ακτινοβολίας. Οι καμπύλες στα σχήματα Γ έως ΣΤ αντιστοιχούν στο φασματικό οπτικό πάχος που προέκυψε από την ανάλυση των μετρήσεων, είτε πρόκειται για το συνολικό οπτικό πάχος (Γ), είτε για το διαφορικό οπτικό πάχος των αερίων που απορροφούν (Δ και Ε), είτε, τέλος, για το διαφορικό υπόλοιπο οπτικό πάχος (ΣΤ). Οι ομαλές καμπύλες στα Δ και Ε αντιπροσωπεύουν το αναπαραγόμενο διαφορικό οπτικό πάχος,  $\sigma_{si}(\lambda) q_i$ .



**Σχήμα 11.5** Βήματα ανάλυσης ενός φάσματος με τη μέθοδο DOAS. Α) Μετρημένο φάσμα και φάσμα αναφοράς, Β) Οπτικό πάχος  $\ln(I(\lambda)/I_0(\lambda))$  με το αντίστοιχο πολυωνυμικό μοντέλο παλινδρόμησης (ομαλή καμπύλη), Γ) Συνολικό διαφορικό οπτικό πάχος, Δ) συνεισφορά του διοξειδίου του αζώτου - διαφορικό οπτικό πάχος ( $\sigma_{s\text{NO}_2}(\lambda)q_{\text{NO}_2}$ ), Ε) συνεισφορά του όζοντος - διαφορικό οπτικό πάχος ( $\sigma_{s\text{O}_3}(\lambda)q_{\text{O}_3}$ ), και ΣΤ) υπόλοιπο (θόρυβος και συνεισφορά άγνωστων απορροφητών).

### 11.1.3.1 Διαδικασία εκτέλεσης των μετρήσεων

Από τα παραπάνω προκύπτει ότι για την εφαρμογή της μεθόδου DOAS χρειάζονται φασματικές μετρήσεις της έντασης της ακτινοβολίας που διέρχεται από ένα ατμοσφαιρικό στρώμα. Ανάλογα με τη γεωμετρία των μετρήσεων, η ακτινοβολία συλλέγεται από κατάλληλο σύστημα και οδηγείται είτε απευθείας, είτε μέσω μιας οπτικής ίνας, σε ένα σύστημα ανάλυσης (οπτικός αναλυτής). Ο οπτικός αναλυτής περιλαμβάνει ένα φασματομέτρο και έναν ανιχνευτή συστοιχίας διόδων (diode arrays) ή ένα στοιχείο συζευγμένου φορτίου (Charge Coupled device – CCD), ώστε η μέτρηση όλου του φάσματος να γίνεται ταυτόχρονα. Αυτό είναι πολύ σημαντικό για την αποφυγή σφαλμάτων στον υπολογισμό της στήλης που προκαλούνται από μεταβολές της σύστασης της ατμόσφαιρας μέσα στο χρονικό διάστημα που μεσολαβεί μεταξύ των μετρήσεων σε διαφορετικά μήκη κύματος. Αν τα διάφορα μήκη κύματος μετρώνται σε διαφορετικές χρονικές στιγμές (π.χ. με ένα φασματοφωτόμετρο σάρωσης), αλλαγές στη σύσταση τη ατμόσφαιρας θα διαμορφώνουν το φάσμα διαφορετικά στα διάφορα μήκη κύματος, οπότε η ποσότητα  $q_i$  δεν θα είναι η ίδια για όλα τα μήκη κύματος.

### 11.1.3.2 Μετρήσεις της άμεσης ηλιακής ακτινοβολίας

Το προϊόν της εφαρμογής της μεθόδου DOAS σε μετρήσεις της έντασης της άμεσης ηλιακής ακτινοβολίας είναι η κατακόρυφη στήλη  $q_i$  των αερίων που απορροφούν σε μια δεδομένη φασματική περιοχή. Η δέσμης διανύει όλη την ατμόσφαιρα υπό γωνία όση και η ζενίθεια γωνία του ήλιου. Από την (11-15) συνάγεται ότι για την περίπτωση αυτή το φάσμα αναφοράς  $I_0(\lambda)$  είναι το ηλιακό φάσμα έξω από την ατμόσφαιρα της γης, το οποίο συνήθως δεν είναι γνωστό. Για την εφαρμογή της μεθόδου μπορεί να χρησιμοποιηθούν φάσματα που προέκυψαν από μετρήσεις οργάνων που λειτουργούν στο διάστημα (δορυφόροι, διαστημικές αποστολές), ή από την εφαρμογή τη μεθόδου της προβολής Langley (βλέπε 11.1.2.1) σε μετρήσεις της άμεσης ακτινοβολίας από το έδαφος.

Όταν το βασικό αέριο που ενδιαφέρει βρίσκεται χαμηλά στην τροπόσφαιρα, μπορεί να χρησιμοποιηθεί ως φάσμα αναφοράς ένα φάσμα μετρημένο με το ίδιο όργανο σε μια περιοχή, ή χρονική στιγμή, όπου το συγκεκριμένο συστατικό παρουσιάζει σχεδόν μηδενικές συγκεντρώσεις. Για παράδειγμα, αν ενδιαφέρει η μέτρηση του  $\text{NO}_2$ , ένα πολύ υψηλό βουνό, σε περιοχή με ελάχιστες ανθρωπογενείς δραστηριότητες, εξασφαλίζουν αμελητέες συγκεντρώσεις του, με συνέπεια η μέτρηση του φάσματος της ηλιακής ακτινοβολίας υπό αυτές τις συνθήκες να είναι απαλλαγμένη από την επίδραση του συστατικού αυτού. Τότε το φάσμα αυτό μπορεί να χρησιμοποιηθεί ως φάσμα αναφοράς.

Είναι προφανές ότι η μέθοδος DOAS μετατρέπει τις διαφορές που δύο φασμάτων της ακτινοβολίας σε ποσότητες συστατικών που προκάλεσαν αυτές τις διαφορές. Αυτό κάνει τη μέθοδο πολύ ευέλικτη σε πλήθος εφαρμογών. Για παράδειγμα, η εφαρμογή της μεθόδου σε δύο φάσματα που μετρήθηκαν με το ίδιο όργανο σε δύο διαφορετικές χρονικές στιγμές οδηγεί στο υπολογισμό της διαφοράς των ποσοτήτων των αερίων μεταξύ των δύο αυτών χρονικών στιγμών. Αν σε μία από αυτές ένα αέριο έχει μηδενική συγκέντρωση, τότε με τη μέθοδο DOAS προκύπτει η συνολική ποσότητα του αερίου στη δεύτερη.

Τα συστήματα που χρησιμοποιούνται για τις μετρήσεις της φασματικής έντασης της άμεσης ηλιακής ακτινοβολίας  $I(\lambda)$ , περιλαμβάνουν μια διάταξη που κατευθύνει συνεχώς το σωλήνα του συλλέκτη παράλληλα με τις ηλιακές ακτίνες. Η συλλεγόμενη ακτινοβολία οδηγείται σε έναν **οπτικό αναλυτή** για τη μέτρηση του φάσματος. Στην εικόνα 11.2 απεικονίζεται ένα σύστημα DOAS. Διακρίνεται ο σωλήνας ο οποίος κατευθύνεται με

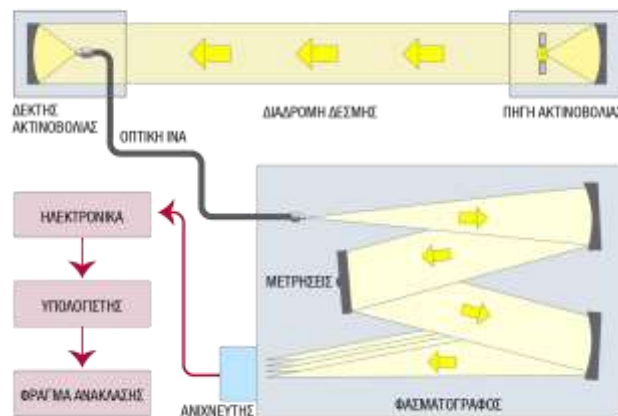
ένα ηλεκτρονικό σύστημα δύο αξόνων προς τον ηλιακό δίσκο, ή προς άλλες κατευθύνσεις, για τη συλλογή αντίστοιχα της άμεσης, ή της διάχυτης ακτινοβολίας. Ο σωλήνας καταλήγει σε μία οπτική ίνα η οποία μεταφέρει τη συλλεγόμενη ακτινοβολία στον αναλυτή που βρίσκεται εντός του κτηρίου.



**Εικόνα 11.2** Το σύστημα DOAS Φαέθων (Εργαστήριο Φυσικής της Ατμόσφαιρας, ΑΠΘ). Αριστερά είναι διάταξη συλλογής της ηλιακής ακτινοβολίας και δεξιά ο οπτικός αναλυτής.

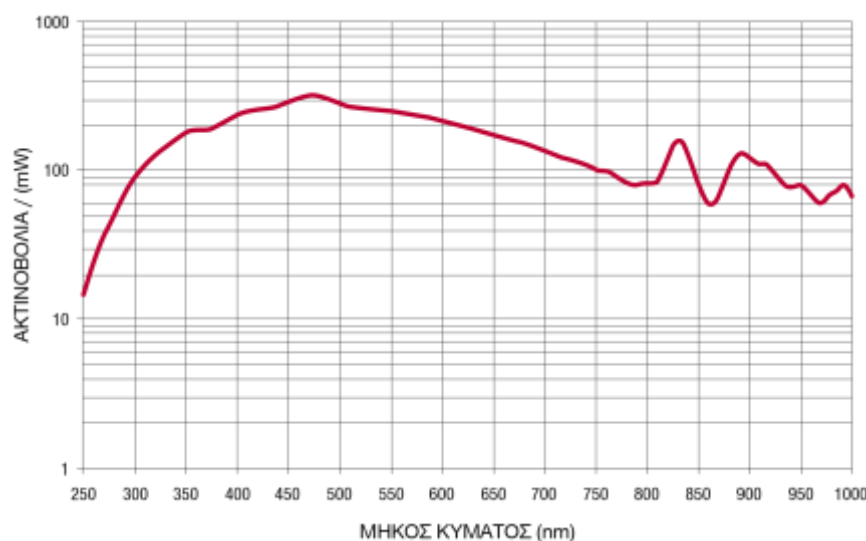
### 11.1.3.3 Μετρήσεις της ακτινοβολίας λυχνίας

Για τον προσδιορισμό της συγκέντρωσης αερίων συστατικών κοντά στο έδαφος αναπτύχθηκαν ειδικά συστήματα στα οποία το φάσμα αναφοράς εκπέμπεται από μία πηγή λευκού φωτός. Στην πλειονότητα των περιπτώσεων η διαδρομή που ακολουθεί η ακτινοβολία είναι οριζόντια, ή σχεδόν οριζόντια και η διαμόρφωση του εκπεμπόμενου φάσματος γίνεται λόγω της απορρόφησης των συστατικών που βρίσκονται στη διαδρομή τη δέσμης. Συστήματα αυτής της κατηγορίας είναι γνωστά ως DOAS μακράς διαδρομής (long-path DOAS), και αποτελούνται από μια πηγή ακτινοβολίας, ένα σύστημα συλλογής της ακτινοβολίας, και έναν οπτικό αναλυτή. Το παραγόμενο σήμα επεξεργάζεται μια ηλεκτρονική διάταξη που παράγει τις μετρήσεις τις οποίες διαχειρίζεται ένας ηλεκτρονικός υπολογιστής. Σχηματική απεικόνιση της διάταξης ενός τυπικού συστήματος DOAS παρουσιάζεται στο σχήμα 11.6.



**Σχήμα 11.6** Σχηματική απεικόνιση ενός συστήματος DOAS μακράς διαδρομής.

Η πηγή της ακτινοβολίας είναι μια λυχνία τόξου (Xe-arc lamp), υψηλής πίεσης με ευρύ φάσμα εκπομπής, που περιλαμβάνει το κοντινό υπεριώδες και ορατό τμήμα του φάσματος περιοχές στις οποίες κυρίως απορροφούν την ακτινοβολία πολλά ατμοσφαιρικά αέρια. Το φάσμα εκπομπής της λυχνίας έχει μετρηθεί υπό συνθήκες μηδενικής απορρόφησης και αποτελεί το φάσμα αναφοράς για τη μέθοδο DOAS. Είναι μια σχετικά ομαλή καμπύλη (σχήμα 11.7) αντίστοιχη της μορφής του φάσματος εκπομπής ενός μελανού σώματος. Η λυχνία είναι τοποθετημένη στην εστία ενός παραβολικού κατόπτρου, έτσι ώστε η ανακλώμενη ακτινοβολία να δημιουργεί μια στενή, σχεδόν παράλληλη, φωτεινή δέσμη. Η δέσμη διανύει μια απόσταση μερικών εκατοντάδων μέτρων στην ατμόσφαιρα και προσπίπτει στην είσοδο του συλλέκτη.



**Σχήμα 11.7** Φάσμα της εκπεμπόμενης ακτινοβολίας από μία τυπική λυχνία τόξου-Χερον.

Στο συλλέκτη της ακτινοβολίας, η δέσμη προσπίπτει σε ένα δεύτερο παραβολικό κάτοπτρο και εστιάζεται στο ένα άκρο μιας οπτικής ίνας, το οποίο βρίσκεται στην εστία του παραβολικού κατόπτρου. Το άλλο άκρο της ίνας συνδέεται στην είσοδο του αναλυτή της ακτινοβολίας, και πιο συγκεκριμένα στη σχισμή εισόδου του φασματομέτρου. Η οπτική ίνα έχει μήκος μερικά μέτρα ώστε να είναι δυνατή η τοποθέτηση του αναλυτή σε εσωτερικό χώρο υπό ελεγχόμενες συνθήκες και προστατευμένου από έντονες θερμοκρασιακές διακυμάνσεις, υψηλές τιμές υγρασίας, σκόνη, κλπ. Ανάλογα με τον κατασκευαστή, ο αναλυτής μπορεί να είναι ενσωματωμένος με το συλλέκτη της ακτινοβολίας αποτελώντας ένα αυτόνομο τμήμα του συστήματος, όπως για παράδειγμα το σύστημα στην εικόνα 11.3.

Για την επιλογή της βέλτιστης απόστασης που διανύει η δέσμη λαμβάνεται υπόψη ότι: Μεγάλη διαδρομή συνεπάγεται ισχυρότερο σήμα απορρόφησης, άρα μεγαλύτερη ακρίβεια στον υπολογισμό των συγκεντρώσεων των αερίων. Όσο όμως αυξάνει η διαδρομή ελαττώνεται η ένταση της δέσμης λόγω σκέδασης ή και απορρόφησης από τα μόρια και αιωρούμενα σωματίδια της ατμόσφαιρας (π.χ. υδρατμοί, σκόνη), με αποτέλεσμα την αύξηση της αβεβαιότητας των μετρήσεων.

Στην εικόνα 11.3 απεικονίζονται ένα εμπορικό σύστημα που λειτουργεί στο ΑΠΘ, με ενσωματωμένους τον συλλέκτη και τον οπτικό αναλυτή. Τα δύο μέρη του συστήματος βρίσκονται σε απόσταση περίπου 300m.

Η εξασθένηση της μετρούμενης έντασης της ακτινοβολίας οφείλεται στην απορρόφηση που υφίσταται η δέσμη από τη λυχνία κατά τη διαδρομή της προς το συλλέκτη, και η εφαρμογή της μεθόδου DOAS οδηγεί στον υπολογισμό της ποσότητας των απορροφητών κατά τη διαδρομή αυτή, η οποία στην ουσία εκφράζει τη μέση συγκέντρωση των αερίων κατά τη διαδρομή. Η συγκέντρωση των αερίων σε διάφορα σημεία της διαδρομής μπορεί να είναι πολύ διαφορετική, όμως η μέθοδος μέτρησης δεν επιτρέπει την ανάκτηση της πληροφορίας αυτής.



**Εικόνα 11.3** Σύστημα οριζόντιας διαδρομής DOAS του οίκου Environment SA (ΑΠΘ). Αριστερά είναι η πηγή λευκού φωτός (λυχνία Ξένου) και δεξιά η μονάδα που περιέχει το συλλέκτη και τον οπτικό αναλυτή.

#### 11.1.4 Πλεονεκτήματα και μειονεκτήματα των συστημάτων DOAS

Το βασικό χαρακτηριστικό των συστημάτων DOAS, το οποίο αποτελεί σημαντικό τους πλεονέκτημα, είναι η ταυτόχρονη μέτρηση της συγκέντρωσης πολλών αερίων. Παρά το σημαντικό κόστος τους, τα συστήματα DOAS παρουσιάζουν ικανοποιητική σταθερότητα λειτουργίας για μεγάλα χρονικά διαστήματα και έχουν τη δυνατότητα ανίχνευσης αερίων με χαμηλές συγκεντρώσεις. Τέλος, σημαντικό πλεονέκτημα τους είναι η δυνατότητα μέτρησης των αρωματικών υδρογονανθράκων στην ατμόσφαιρα.

Οι συμβατικοί αναλυτές που χρησιμοποιούνται για την καταγραφή διαφόρων αερίων ρύπων στην ατμόσφαιρα, παρέχουν μετρήσεις αντιπροσωπευτικές του σημείου στο οποίο έχουν τοποθετηθεί. Αν αυτό το σημείο βρίσκεται, για οποιοδήποτε λόγο, πολύ κοντά σε κάποια πηγή έντονης εκπομπής ρύπων σε καθαρά τοπικό επίπεδο τότε η θεώρηση ότι οι μετρήσεις είναι αντιπροσωπευτικές για μια ευρύτερη περιοχή μπορεί να οδηγήσει σε λανθασμένα συμπεράσματα και εκτιμήσεις. Σε αυτήν την κατεύθυνση συμβάλλει και το γεγονός ότι η ατμόσφαιρα μέσα στο οριακό στρώμα παρουσιάζει έντονες αναταράξεις. Αντίθετα οι τιμές των συγκεντρώσεων των αερίων ρύπων που προκύπτουν από ένα σύστημα DOAS αντιστοιχούν σε μία διαδρομή μερικών εκατοντάδων μέτρων καλύπτοντας με αυτόν τον τρόπο μια ευρύτερη περιοχή μελέτης και παρέχουν μετρήσεις καλύτερης αντιπροσωπευτικότητας.

Από την άλλη πλευρά τα συστήματα DOAS παρουσιάζουν και κάποια μειονεκτήματα, και δυσλειτουργίες κάτω από ορισμένες μετεωρολογικές συνθήκες, ιδιαίτερα τα συστήματα οριζόντιας διαδρομής. Συγκεκριμένα, σε ημέρες με δυνατή βροχή, πυκνή ομίχλη ή πολύ υψηλή υγρασία η ένταση της ακτινοβολίας που φτάνει στο συλλέκτη είναι πολύ



εξασθενημένη λόγω έντονης σκέδασης στα υδροσταγονίδια και τους υδρατμούς, με αποτέλεσμα την αύξηση του θορύβου. Κατά τη διάρκεια ημερών με υψηλή θερμοκρασία, λόγω φαινομένων διαφορετικής θερμικής συμπεριφοράς (συστολή-διαστολή) των κτιρίων στα οποία είναι τοποθετημένοι ο εκπομπός και ο δέκτης, παρουσιάζεται απώλεια της ευθυγράμμιση της δέσμης της ακτινοβολίας με άμεση επίπτωση στην ποιότητα των μετρήσεων.

Τέλος, στη διαδικασία της ανάλυσης DOAS για τη μέτρηση αρωματικών υδρογονανθράκων παρουσιάζονται προβλήματα διότι τα στα φάσματα απορρόφησης τους, και ειδικά του βενζολίου και των παραγώγων του, παρουσιάζουν πολύ κοντινά μέγιστα απορρόφησης μεταξύ τους και σχεδόν ταυτόσημα φασματικά χαρακτηριστικά. Παρόμοια προβλήματα μπορεί να προκύψουν αν στην ανάλυση δεν ληφθούν υπόψη επιδράσεις από άλλα συστατικά που απορροφούν, όπως για παράδειγμα τα O<sub>3</sub>, SO<sub>2</sub> και O<sub>2</sub>. Ειδικά το φάσμα απορρόφησης του οξυγόνου σχεδόν επικαλύπτει τα μέγιστα απορρόφησης των αρωματικών υδρογονανθράκων.

### Βιβλιογραφία

- Abbot, C. G., and F. E. Fowle (1908), Methods of determining the "solar constant" of radiation (the Langley method), in *Annals of the Astrophysical Observatory of the Smithsonian Institution.*, edited, pp. 13-20, Gov. Printing Office, Washington, D.C.
- Brewer, A. W. (1973), A replacement for the Dobson Spectrophotometer?, *Pure Appl Geophys*, 106, 918-927.
- Dobson, G. M. B. (1931), A photoelectric spectrophotometer for measuring the amount of atmospheric ozone, *P Phys Soc*, 43, 324-339.
- Dobson, G. M. B., and D. N. Harrison (1926), Measurement of the amount of ozone in the earth's atmosphere., *P Phys Soc*, 38, 74-76.
- Gotz, F. W. P., and R. Ladenburg (1931), The content of the lower atmospheric layers of the ozone, *Naturwissenschaften*, 19, 373-374.
- Hansen, J. E., and L. D. Travis (1974), Light scattering in planetary atmospheres, *Space Science Reviews*, 16, 527-610.
- Kostkowski, H. J. (1997), *Reliable spectroradiometry* 610 pp., Spectroradiometry Consulting, La Plata, MD.
- Liou, K. N. (2001), *An Introduction to Atmospheric Radiation (Second Edition)*, Academic Press, San Diego, Ca, USA.
- Platt, U., and D. Perner (1980), Direct measurements of atmospheric CH<sub>2</sub>O, HNO<sub>2</sub>, O<sub>3</sub>, NO<sub>2</sub>, and SO<sub>2</sub> by differential optical absorption in the near UV., *J. Geophys. Res-Atmos.*, 85(12), 7453-7458.

Platt, U., D. Perner, and H. W. Patz (1979), Simultaneous Measurement of Atmospheric CH<sub>2</sub>O, O<sub>3</sub>, and NO<sub>2</sub> by differential optical absorption, *J. Geophys. Res.*, *84*(10), 6329-6335.

## ΑΠΟΔΟΣΗ ΕΠΙΣΤΗΜΟΝΙΚΩΝ ΟΡΩΝ

ΕΛΛΗΝΙΚΑ	ΑΓΓΛΙΚΑ
Αισθητήρας	Sensor
Ακρίβεια	Precision
Ακτινική πυκνότητα ροής	Spectral actinic flux
Ακτινόμετρα πολλαπλών φίλτρων	Multi-filter radiometers
Άμεση ακτινοβολία	Direct radiation
Ανεμοδείκτης	Wind vane
Ανεμόμετρο έλικας	Propeller anemometer
Ανεμόμετρο θερμού σύρματος	Hot wire anemometer
Ανεμόμετρο κυπέλων	Cup anemometer
Ανεροειδές βαρόμετρο	Aneroid barometer
Αντιπροσωπευτικότητα	Representativeness
Αστροστάτης (ηλιοστάτης)	Solar tracker
Ατμοσφαιρική στήλη αερίου	Atmospheric column of gas
Ατμοσφαιρική τύρβη	Atmospheric Turbulence
Βαθμονόμηση	Calibration
Βροχόμετρο	Rain Gauge
Βροχόμετρο ανατρεπόμενου κάδου	Tipping Bucket Rain Gauge
Γεωδυναμικό ύψος	Geopotential height
Γωνιακή απόκριση	Angular response
Δέσμιο αερόστατο	Tethered sonde
Διασφάλιση ποιότητας/Έλεγχος ποιότητας	Quality Assurance/Quality Control
Διαχείριση ποιότητας αέρα	Air quality management
Διάχυτη ακτινοβολία	Diffuse radiation
Διμεταλλικό θερμομέτρο	Bimetal Thermometer
Ειδική υγρασία	Specific humidity
Ενεργός διατομή απορρόφησης	Absorption cross-section
Επιτόπιες μετρήσεις	In-situ measurements
Ευαισθησία	Sensitivity
Θερμογράφος	Thermograph
Θερμοζεύγη	Thermocouples
Θερμοημιαγωγοί	Thermistors
Θερμόμετρα ηλεκτρικής αντίστασης	Electrical-resistance thermometer
Θερμο-υδρογράφος	Thermo-hygrograph
Ηλεκτρονικός καταγραφέας δεδομένων	Data logger
Ημιαγωγός	Semiconductor
Ηχητικό ανεμόμετρο	Sonic anemometer
Κατώφλι	Threshold
Κονσταντάνη	Constantan
Μεταδεδομένα	Metadata
Μεταλλικό κάλυμμα	Metal shield
Μετεωρολογικός ιστός	Meteorological mast
Μετεωρολογικός κλωβός	Meteorological screen
Μετεωρολογικός πύργος	Meteorological tower

Μονοστατικό ακουστικό ραντάρ	Monostatic sodar
Μονοχρώματα	Monochromator
Μορφοτροπείς	Transducers
Νεκρή ζώνη	Dead-band
Οζοντοβολίδα	Ozonesonde
Ολική στήλη του όζοντος	Total ozone column
Ολίσθηση	Drift
Οπισθοσκέδαση	Backscatter
Πιστότητα	Accuracy
Πλακίδιο διάχυσης	Diffuser
Πυρηλιόμετρο	Pyrheliometer
Πυρόμετρο	Pyrometer
Ραδιοβολίδα	Radiosonde
Ραδιοβολίδα με αλεξίπτωτο	Dropsonde
Ραντάρ Πολλαπλής Πολικότητας	Polarimetric Radars
Ροή ακτινοβολίας	Radiant flux
Σήμα σκότους	Dark signal
Σημείο δρόσου	Dew point
Σκεδαζόμενο φως	Stray light
Σταθμικό βροχόμετρο	Weighing rain gauge
Σταθμός ανώτερης ατμόσφαιρας	Upper air station
Συμπύκνωση	Condensation
Συνημιτονικό σφάλμα	Cosine error
Συντελεστής εξασθένησης όγκου	volume extinction coefficient
Συντελεστή οπισθοσκέδασης όγκου	volume backscattering coefficient
Συστηματικό σφάλμα	Bias
Σφαίρα ολοκλήρωσης	Integrating sphere
Σχετική υγρασία	Relative humidity
Σχισμή εισόδου/εξόδου	Entrance/exit slit
Τηλεπισκόπηση	Remote sensing
Υγρόμετρο τριχός	Hair hygrometer
Υδραργυρικό βαρόμετρο	Mercury barometer
Υετόμετρο	Precipitation Gauge
Υετός	Precipitation
Υστέρηση	Hysteresis
Φασματική απόκριση	Spectral response
Φασματική ένταση ακτινοβολίας	Spectral radiance
Φασματική πυκνότητα ροής ακτινοβολίας	Spectral irradiance
Φασματοσκοπία οπτικής διαφορικής απορρόφησης	Differential optical absorption spectroscopy
Φασματοσκοπικό υγρόμετρο	Spectroscopic Hygrometer
Φασματοφωτόμετρα	Spectrophotometer
Φθορισμός	Fluorescence
Φράγμα περίθλασης (ανάκλασης)	Diffraction grating
Φωτοπολλαπλασιαστής	Photomultiplier
Φωτοδίοδοι	Photodiodes
Χημειοφωταύγεια	Chemiluminescence

Χρονική σταθερά	Time constant
Χρονοσειρά	Time series
Ψηφιακό σήμα	Digital signal
Ψηφιοποιητής	Digitizer
Ψυχρόμετρο	Psychrometer