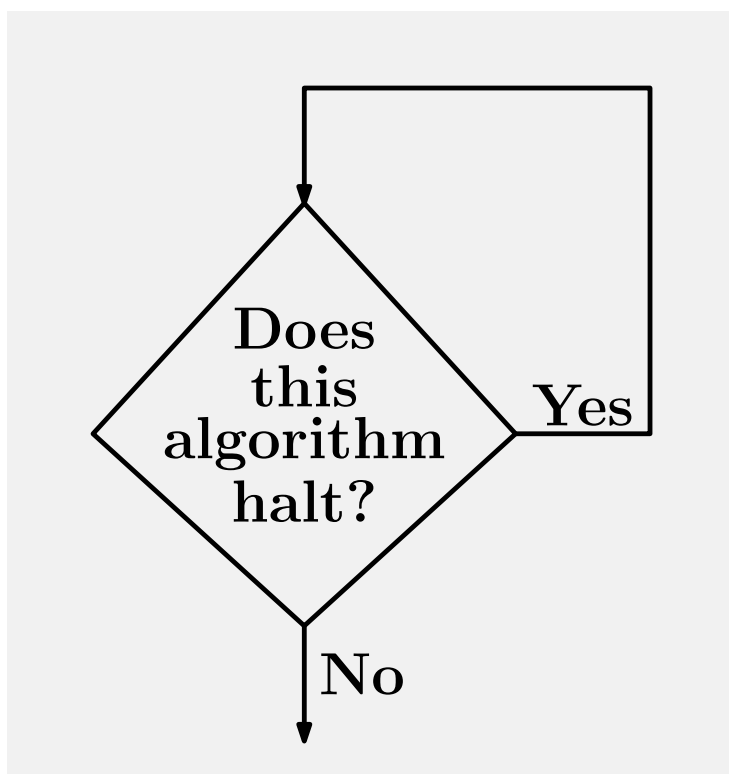


(Πρόχειρες) σημειώσεις στη  
ΘΕΩΡΙΑ ΑΝΑΔΡΟΜΗΣ



Δημήτρης Ζώρος



**i**

|           |                                                            |            |
|-----------|------------------------------------------------------------|------------|
| 3.1       | Εισαγωγή . . . . .                                         | 87         |
| 3.1.1     | Περί συναρτήσεων . . . . .                                 | 87         |
| 3.1.2     | Περί συμβολισμού . . . . .                                 | 88         |
| 3.2       | Συντακτικό λ-λογισμού . . . . .                            | 89         |
| 3.3       | Ισοδυναμία λ-λογισμού με Αναδρομικές Συναρτήσεις . . . . . | 94         |
|           | Ασκήσεις . . . . .                                         | 100        |
| <b>4</b>  | <b>Γραμματικές-Ιεραρχία Chomsky</b>                        | <b>101</b> |
| 4.1       | Γενικές γραμματικές . . . . .                              | 101        |
| 4.2       | Γραμματικές με συμφραζόμενα . . . . .                      | 107        |
| 4.3       | Γραμματικές χωρίς συμφραζόμενα . . . . .                   | 110        |
| 4.4       | Κανονικές γραμματικές . . . . .                            | 112        |
| 4.5       | Ιεραρχία Chomsky . . . . .                                 | 113        |
|           | Ασκήσεις . . . . .                                         | 114        |
| <b>II</b> | <b>Υπολογισιμότητα</b>                                     | <b>117</b> |
| <b>5</b>  | <b>Μη-αποφασισιμότητα</b>                                  | <b>119</b> |
| 5.1       | Θέση Church-Turing . . . . .                               | 119        |
| 5.2       | Μη-αποφασισιμότητα γλωσσών . . . . .                       | 122        |
| 5.2.1     | Το πρόβλημα του τερματισμού . . . . .                      | 122        |
| 5.2.2     | Απεικονιστικές Αναγωγές . . . . .                          | 125        |
|           | Ασκήσεις . . . . .                                         | 132        |
| <b>6</b>  | <b>Το Θεώρημα του Rice</b>                                 | <b>135</b> |
| 6.1       | Η περίπτωση του REC . . . . .                              | 137        |
| 6.2       | Η περίπτωση του RE . . . . .                               | 138        |
|           | Ασκήσεις . . . . .                                         | 144        |
| <b>7</b>  | <b>Το Θεώρημα Αναδρομής</b>                                | <b>147</b> |
| 7.1       | Μπορούν οι μηχανές να αυτοαναπαράγονται; . . . . .         | 147        |
| 7.2       | Το Θεώρημα Αναδρομής . . . . .                             | 150        |
| 7.3       | Το Πρώτο Θεώρημα Μη-πληρότητας του Gödel . . . . .         | 154        |
| 7.4       | Μπορούν οι μηχανές να σκέφτονται; . . . . .                | 159        |
|           | Ασκήσεις . . . . .                                         | 162        |
| <b>8</b>  | <b>Αριθμητική Ιεραρχία</b>                                 | <b>165</b> |
| 8.1       | Σχετικός υπολογισμός . . . . .                             | 165        |
| 8.2       | Αριθμητική Ιεραρχία . . . . .                              | 175        |
| 8.3       | Αλγοριθμικές Αναγωγές . . . . .                            | 181        |
| 8.4       | Πληρότητα γλωσσών ως προς σχέση αναγωγής . . . . .         | 184        |
| 8.5       | Πέρα από την Αριθμητική Ιεραρχία . . . . .                 | 186        |
|           | Ασκήσεις . . . . .                                         | 190        |

|                                                       |            |
|-------------------------------------------------------|------------|
| <b>Παράρτημα Α Εισαγωγή στην Πρωτοβάθμια Λογική</b>   | <b>193</b> |
| Α.1 Βασικές έννοιες . . . . .                         | 193        |
| Α.2 Σημασιολογία . . . . .                            | 195        |
| Α.3 Τυπικές αποδείξεις . . . . .                      | 196        |
| Α.4 Τα Θεωρήματα Εγκυρότητας και Πληρότητας . . . . . | 197        |
| Α.5 Αριθμητική Peano . . . . .                        | 198        |
| Α.5.1 Αριθμητικοποίηση . . . . .                      | 199        |
| <b>Βιβλιογραφία</b>                                   | <b>203</b> |
| <b>Κατάλογος σχημάτων</b>                             | <b>205</b> |
| <b>Ευρετήριο Όρων και Συμβόλων</b>                    | <b>209</b> |



Οι πρωτοποριακές εργασίες του *Georg Cantor* που έμελε να γεννήσουν τη Θεωρία Συνόλων (της θεωρίας που ενοποιεί το σύνολο των μαθηματικών που χρησιμοποιούμε) είχαν μία πάρα πολύ σημαντική αδυναμία: την *Αρχή της Συμπερίληψης*. Σύμφωνα με αυτήν την αρχή, η συλλογή οποιονδήποτε αντικειμένων που ικανοποιούν κάποια συγκεκριμένη ιδιότητα αποτελεί ένα σύνολο. Η αρχή αυτή καθαυτή δεν είναι εσφαλμένη, η μη ελεγχόμενη εφαρμογή της όμως μας οδηγεί σε διάφορα παράδοξα. Παραδείγματος χάρη, μπορούμε να ορίσουμε το σύνολο  $\{x \mid x \notin x\}$  (το σύνολο όλων των συνόλων που δεν ανήκουν στον εαυτό τους) ή ακόμα το σύνολο  $\{x \mid x = x\}$  (το σύνολο όλων των συνόλων). Ο *Bertrand Russell* το 1901 παρατήρησε ότι αυτά τα σύνολα δεν μπορούν να υπάρξουν <sup>1</sup> και διατύπωσε το γνωστό *Παράδοξο του Russell*. Τέτοιου είδους παράδοξα κλόνισαν τα δεμέλια των μαθηματικών και ώθησαν τους μαθηματικούς στην αναζήτηση τρόπων να εξαλειφθούν. Σε αντίθετη περίπτωση υπήρχε ο κίνδυνος να απορριφθούν οι θεωρίες και τα αποτελέσματα που είχαν μέχρι τότε αποδειχθεί ως αίολα. Ο μόνος τρόπος να αποφευχθεί αυτό ήταν να τεθούν συγκεκριμένα *Αξιώματα* (κοινώς αποδεχτές αλήθειες, για τις οποίες δεν απαιτείται απόδειξη) και να δεμελιωθούν τα μαθηματικά πάνω σε αυτά, έτσι ώστε οι μαθηματικές αλήθειες να είναι τυπικές απόρροιές τους. Ο *David Hilbert* εξέφρασε ρητά αυτόν τον στόχο στο λεγόμενο *Πρόγραμμα του Hilbert*:

« ...Να δεμελιωθούν οι υπάρχουσες θεωρίες πάνω σε ένα πεπερασμένο σύνολο αξιωμάτων που θα μπορεί να αποδείξει όλες τις αλήθειες της εκάστοτε θεωρίας. Επιπλέον θα πρέπει αυτό το σύνολο αξιωμάτων να είναι συνεπές... »

Ως αφετηρία για το εγχείρημα αυτό πρότεινε τη στοιχειώδη αριθμητική (στους φυσικούς αριθμούς, δες Παράγραφο Α.5), έχοντας κατά νου ότι η συνέπεια των υπόλοιπων θεωριών θα μπορούσε να προκύψει μέσα από (ή αντίστοιχα με) τη συνέπεια της αριθμητικής. Πιο αναλυτικά τα στάδια του προγράμματος ήταν τα ακόλουθα:

<sup>1</sup> Μπορείτε να δείτε γιατί;

1. *Φορμαλισμός Μαθηματικών*: Εδραίωση μίας «γλώσσας» ικανής να εκφράσει τις μαθηματικές προτάσεις με σαφή και (κυρίως) τυπικό τρόπο. Ο φορμαλισμός αυτός θα συνοδεύεται από ένα αξιωματικό σύστημα μέσα από το οποίο θα αποδεικνύονται οι αληθείς μαθηματικές εκφράσεις της γλώσσας.

Στον φορμαλισμό αυτό τυπική απόδειξη μιας πρότασης θα είναι μία πεπερασμένη ακολουθία προτάσεων που θα καταλήγει στην προς απόδειξη πρόταση (δες Παράγραφο Α.3). Συνεπώς, όχι μόνο οι προτάσεις (εκφρασμένες τυπικά στη γλώσσα) αλλά ακόμα και οι αποδείξεις τους (ως ακολουθίες εκφράσεων) θα αποτελούν σαφώς ορισμένα μαθηματικά αντικείμενα.

Τα αξιώματα που θα επιλεγούν θα πρέπει απαραίτητως να ικανοποιούν τις ακόλουθες ιδιότητες:

2. *Συνέπεια*: Στα πλαίσια του αξιωματικού συστήματος δεν μπορεί να προκύψει κάποια «αντίφαση». Κάτι τέτοιο θα σήμαινε ότι το σύστημα είναι πρακτικά άχρηστο, καθώς τότε όλες οι προτάσεις θα μπορούσαν να αποδειχθούν από αυτό <sup>1</sup>.
3. *Πληρότητα*: Κάθε αληθής μαθηματική πρόταση μπορεί να αποδειχθεί τυπικά στα πλαίσια του αξιωματικού συστήματος. Σε αντίθετη περίπτωση το σύστημά θα άφηνε «κενά» με ενδεχομένως σημαντικές επιπτώσεις.

Μάλιστα, η συνέπεια και η πληρότητα θα πρέπει να μπορούν να αποδειχθούν μέσα από το αξιωματικό σύστημα, εφόσον ο φορμαλισμός που θα επιλέξουμε θα μας επιτρέψει να εκφράσουμε τις δύο αυτές ιδιότητες ως προτάσεις της γλώσσας.

Παρατηρήστε ότι η αναζήτηση απόδειξης στον φορμαλισμό αυτόν δεν θα αποτελεί αναζήτηση μιας ακολουθίας «επιχειρημάτων» εκφρασμένα σε κάποια φυσική γλώσσα, αλλά θα αποτελεί έλεγχο για την ύπαρξη ενός μαθηματικού αντικειμένου με κάποιες συγκεκριμένες ιδιότητες. Φυσικά η ύπαρξη τυπικής απόδειξης για μια πρόταση θα σηματοδοτεί ότι η πρόταση αυτή είναι αληθής. Το γεγονός αυτό ενέπνευσε τον Hilbert να οραματιστεί την κατασκευή μίας «συστηματικής διαδικασίας» που θα φέρνει εις πέρας τον έλεγχο ύπαρξης τυπικής απόδειξης και κατ' επέκταση τον έλεγχο της αλήθειας μιας μαθηματικής πρότασης:

4. *Αποφασισιμότητα*: Εύρεση μίας πεπερασμένης διαδικασίας που θα αποφασίζει αν μία δοσμένη μαθηματική πρόταση (εκφρασμένη στην τυπική γλώσσα) είναι αληθής ή ψευδής (το πρόβλημα αυτό είναι γνωστό ως *Entscheidungsproblem* <sup>2</sup>).

Το πρόγραμμα του Hilbert αποτέλεσε ίσως τη μεγαλύτερη πηγή έμπνευσης για τους μαθηματικούς του εικοστού αιώνα. Δυστυχώς όμως πολύ γρήγορα αποδείχθηκε ότι είναι καταδικασμένο να αποτύχει:

- Όσον αφορά τον φορμαλισμό, η *Μαθηματική Λογική* και η «γλώσσα» που χρησιμοποιεί έχει τη δυνατότητα να τυποποιήσει τόσο την αριθμητική όσο και γενικότερα το σύνολο των μαθηματικών (αυτή η πτυχή του προγράμματος στέφθηκε με επιτυχία).

<sup>1</sup> Για παράδειγμα, είναι γνωστή η ρήση του Russell ότι αν  $2 = 1$  τότε ο Russell είναι ο Πάπας (το σύνολο {Russell, Πάπας} έχει δύο μέλη, αλλά  $2 = 1$ )!

<sup>2</sup> Ελεύθερη μετάφραση: Το Πρόβλημα Απόφασης Λογικών Θεωριών.

- Όσον αφορά όμως τη συνέπεια/πληρότητα του συστήματος που χρησιμοποιείται παραδείγματος χάρη στην αριθμητική, ο Kurt Gödel το 1931 έδειξε ότι αυτές είναι δύο ιδιότητες που δεν μπορούν να ισχύουν ταυτόχρονα (δες Θεώρημα 7.3.7 ή *Πρώτο Θεώρημα Μη-πληρότητας* στη βιβλιογραφία).

Για να το δείξει αυτό υπέθεσε ότι η αριθμητική είναι συνεπής και κατασκεύασε μια πρόταση που ενώ είναι αληθής δεν μπορεί να αποδειχθεί. Η συγκεκριμένη πρόταση παρόλο που εκφράζει κάτι πολύ ισχυρό <sup>1</sup> στην πραγματικότητα δεν έχει κάτι το ξεχωριστό: Ακόμα και αν θεωρηθεί και αυτή αξίωμα, θα υπάρξει άλλη αληθής πρόταση που δεν μπορεί να αποδειχθεί. Το πρόβλημα είναι θεμελιώδες και καταδεικνύει το γεγονός ότι στην πραγματικότητα σε οποιονδήποτε φορμαλισμό των μαθηματικών θα υπάρχουν πάντα τριών ειδών προτάσεις: οι αληθείς (που αποδεικνύονται τυπικά), οι ψευδείς (που αποδεικνύεται τυπικά η άρνησή τους) και οι μη αποδείξιμες.

Το δεύτερο πλήγμα στο πρόγραμμα του Hilbert δόθηκε και πάλι από τον Gödel καθώς έδειξε ότι εφόσον η αριθμητική είναι συνεπής, η συνέπειά της δεν μπορεί να αποδειχθεί μέσα στα πλαίσιά της: Υπάρχει πρόταση στη γλώσσα της αριθμητικής που εκφράζει το γεγονός ότι η αριθμητική είναι συνεπής, η οποία όμως δεν μπορεί να αποδειχθεί (*Δεύτερο Θεώρημα Μη-πληρότητας*).

Εμάς το ενδιαφέρον μας θα στραφεί στο Entscheidungsproblem, καθώς αυτό αποτέλεσε την απαρχή της *Θεωρίας Αναδρομής* ή *Θεωρία Υπολογισιμότητας*. Δυστυχώς <sup>2</sup> η απάντηση και σε αυτό το πρόβλημα είναι αρνητική (δες Θεώρημα 8.5.12), αν και οι περισσότεροι αναγνώστες θα αναρωτιούνται τι ακριβώς αποτελεί απάντηση στο Entscheidungsproblem. Αν υπήρχε πεπερασμένη διαδικασία ή *Αλγόριθμος* που αποφασίζει αν μία πρόταση είναι αληθής ή όχι, τότε το μόνο που θα είχαμε να κάνουμε θα ήταν να περιγράψουμε τον αλγόριθμο με σαφή τρόπο και έτσι θα απαντούσαμε θετικά. Για να αποδείξουμε όμως ότι δεν υπάρχει τέτοιος αλγόριθμος θα πρέπει αρχικά να δώσουμε έναν ορισμό της έννοιας του αλγορίθμου ως μαθηματικό αντικείμενο. Έπειτα, με μαθηματικές μεθόδους θα πρέπει να δείξουμε ότι το εν λόγω αντικείμενο δεν μπορεί να υπάρξει.

Την εποχή εκείνη προτάθηκαν πολλές και διαφορετικές «προσεγγίσεις» της έννοιας του αλγορίθμου και πολλοί φορμαλισμοί της έννοιας του *Υπολογισμού*, όμως όλες αποδείχθηκαν ισοδύναμες. Αυτό οδήγησε στη λεγόμενη *Θέση Church-Turing* <sup>3</sup> (δες Σελίδα 121) και την τοποθέτηση του Entscheidungsproblem σε αυστηρές μαθηματικές βάσεις. Η δέση φέρει τα ονόματα των Alonzo Church και Alan Turing δύο ερευνητών που το 1935 και 1936, ανεξάρτητα ο ένας από τον άλλον, απέδειξαν ότι το Entscheidungsproblem δεν επιδέχεται λύσης καθώς δεν μπορεί να υπάρξει λ-όρος (Κεφάλαιο 3) ή *Μηχανή Turing* (Κεφάλαιο 1) που να το «λύνει».

Αυτήν την ιστορία θα αναπτύξουμε στις σημειώσεις που ακολουθούν, επισκεπτόμενοι

<sup>1</sup> Εκφράζει το γεγονός ότι αυτή καθαυτή δεν μπορεί να αποδειχθεί στη στοιχειώδη αριθμητική.

<sup>2</sup> Δυστυχώς για το πρόγραμμα του Hilbert, ευτυχώς για τους μαθηματικούς, καθώς θετική απάντηση στο Entscheidungsproblem θα σήμαινε ότι πλέον η δουλειά τους θα περιοριζόταν μόνο στο να κάνουν τις ερωτήσεις και όχι στο να βρίσκουν και τις απαντήσεις! Σαφώς με την έλευση της *τεχνητής νοημοσύνης* το ουτοπικό αυτό σενάριο μοιάζει πιο αληθοφανές, όμως τα όρια στο τι μπορεί να απαντηθεί και τι όχι που θα δούμε εδώ συνεχίζουν να ισχύουν ανεπηρέαστα σε οποιοδήποτε (εύλογο) υπολογιστικό μοντέλο και να σκεφτούμε.

<sup>3</sup> Θα μπορούσαμε να πούμε ότι η δέση αυτή είναι ο ζητούμενος τυπικός ορισμός της έννοιας του αλγορίθμου.

μερικά από τα σημαντικότερα αποτελέσματα που γέννησε. Στο υπόλοιπο του Κεφαλαίου 0 θα εδραιώσουμε τον συμβολισμό που θα χρησιμοποιήσουμε στη συνέχεια και θα υπενθυμίσουμε κάποιους βασικούς ορισμούς από τη *Θεωρία Συνόλων*.

Έπειτα οι σημειώσεις θα χωρισθούν σε δύο μέρη. Το πρώτο παρουσιάζει τέσσερις από τους σημαντικότερους φορμαλισμούς της Θεωρίας Αναδρομής (τα λεγόμενα και *Μοντέλα Υπολογισμού*), καθώς και τις αποδείξεις ισοδυναμίας μεταξύ μερικών εξ αυτών. Στο κομμάτι αυτό των σημειώσεων θα δεμελιώσουμε την έννοια του αλγορίθμου και, εφόσον πλέον έχει καλλιεργηθεί μέσα μας η πεποίθηση ότι η Θέση Church-Turing είναι μια εύλογη παραδοχή, θα υιοθετήσουμε τον φορμαλισμό που εισήγαγε ο Turing (για λόγους που θα συζητηθούν εν καιρώ) και θα περάσουμε στο δεύτερο και πιο βασικό μέρος της θεωρίας, την *Υπολογισσιμότητα*.

## 0.1 Σχέσεις και συναρτήσεις

**Συμβολισμός 0.1.1.** Στις σημειώσεις αυτές χρησιμοποιούνται κατά κόρον τα ακόλουθα σύμβολα:

$$\emptyset, \in, 2^A, \cup, \cap, \subseteq, \setminus, \overline{A}, |A|, \times, \wedge, \vee, \neg, \rightarrow, \leftrightarrow, \forall, \exists, \text{ όπου } A \text{ σύνολο}$$

Θεωρούμε ότι ο αναγνώστης είναι στοιχειωδώς εξοικειωμένος με αυτά <sup>1</sup>.

**Συμβολισμός 0.1.2.** Με  $\mathbb{N}$  συμβολίζουμε το σύνολο των φυσικών αριθμών <sup>2</sup> και με  $\mathbb{Z}$  το σύνολο των ακεραίων αριθμών. Για οικονομία χώρου θα γράφουμε  $[n]$  αντί για  $\{1, \dots, n\}$ , όπου  $n \in \mathbb{N} \setminus \{0\}$ . Τέλος, με  $\mathbb{R}$  συμβολίζουμε το σύνολο των πραγματικών αριθμών.

**Ορισμός 0.1.3.**  $P$  είναι μία  $n$ -μελής σχέση αν <sup>3</sup>  $P \subseteq A_1 \times A_2 \times \dots \times A_n$  όπου  $A_i$  σύνολα,  $i \in [n]$  και  $n \in \mathbb{N} \setminus \{0\}$ . Η  $P$  είναι  $n$ -μελής σχέση στο σύνολο  $A$  αν  $P \subseteq A^n$  <sup>4</sup>.

**Ορισμός 0.1.4.**  $\mathcal{R}$  είναι μία ιδιότητα του συνόλου  $A$  αν  $\mathcal{R} \subseteq 2^A$ .

**Ορισμός 0.1.5.** Η ανακλαστική ιδιότητα του συνόλου  $A^2$  είναι η  $\mathcal{R}_{\text{αν}}^A = \{P \subseteq A^2 \mid (a, a) \in P \text{ για κάθε } a \in A\}$ . Η μεταβατική ιδιότητα του συνόλου  $A^2$  είναι η  $\mathcal{R}_{\text{μετ}}^A = \{P \subseteq A^2 \mid \text{Αν } (a, b), (b, c) \in P \text{ τότε και } (a, c) \in P\}$ .

**Ορισμός 0.1.6.** Μία διμελής σχέση  $P \subseteq A^2$  καλείται μεταβατική αν  $P \in \mathcal{R}_{\text{μετ}}^A$ .

**Ορισμός 0.1.7.** Έστω διμελής σχέση  $P \subseteq A \times B$ , και ιδιότητα  $\mathcal{R} \subseteq 2^{A \times B}$ . Η κλειστότητα της  $P$  ως προς την  $\mathcal{R}$  είναι η σχέση  $P^{\mathcal{R}}$  που προκύπτει από την  $P$  αν προσδέσουμε το ελάχιστο απαραίτητο πλήθος ζευγών ώστε  $P^{\mathcal{R}} \in \mathcal{R}$ .

<sup>1</sup> Για περισσότερες πληροφορίες ανατρέξτε στα [8, 9].

<sup>2</sup> Το 0 θεωρείται φυσικός αριθμός. Στη Θεωρία Συνόλων ορίζεται ως το σύνολο  $\emptyset$ .

<sup>3</sup> Παρακαλώ μην συγκαταλέξετε το «αν» στη λίστα των τυπογραφικών λαθών αυτών των σημειώσεων. Το χρησιμοποιούμε σαν συντόμευση του «αν και μόνο αν».

<sup>4</sup>  $A^n = \underbrace{A \times \dots \times A}_{n\text{-φορές}}$

**Παράδειγμα 0.1.8.** Η μεταβατική κλειστότητα της σχέσης  $\{(n, m) \in \mathbb{N}^2 \mid m = n+1\}$  είναι η σχέση  $\{(n, m) \in \mathbb{N}^2 \mid n < m\}$ . Η ανακλαστική κλειστότητα της σχέσης  $\{(n, m) \in \mathbb{N}^2 \mid n < m\}$  είναι η σχέση  $\{(n, m) \in \mathbb{N}^2 \mid n \leq m\}$ .

**Ορισμός 0.1.9.**  $f$  είναι συνάρτηση από το  $A$  στο  $B$ , συμβολισμός  $f : A \rightarrow B$ , αν

- $f$  διμελής σχέση ( $f \subseteq A \times B$ ) και
- $((a, b_1) \in f \wedge (a, b_2) \in f) \rightarrow b_1 = b_2$ .

Αν  $(a, b) \in f$  θα γράφουμε  $f(a) = b$ .

**Ορισμός 0.1.10.** Έστω  $f : A \rightarrow B$ .

- Το πεδίο ορισμού της  $f$  είναι το σύνολο  $\text{dom}(f) = \{a \in A \mid f(a) \in B\}$ .
- Το πεδίο τιμών της  $f$  είναι το σύνολο  $\text{im}(f) = \{b \in B \mid \exists a \in A (f(a) = b)\}$ .
- Η  $f$  είναι επί του  $B$  αν  $\forall b \in B \exists a \in \text{dom}(f) (f(a) = b)$  <sup>1</sup>.
- Η  $f$  είναι ένα προς ένα (1-1) αν  $(f(a_1) = b \wedge f(a_2) = b) \rightarrow a_1 = a_2$ .

**Ορισμός 0.1.11.** Έστω  $f : A \rightarrow B$ . Η  $f$  είναι μερική συνάρτηση αν  $\exists a \in A (a \notin \text{dom}(f))$ . Σε αυτήν την περίπτωση θα γράφουμε  $f(a) = \perp$ , όπου  $\perp \notin A \cup B$  <sup>2</sup>. Μία συνάρτηση που δεν είναι μερική καλείται ολική συνάρτηση (ή πλήρης).

**Παράδειγμα 0.1.12.** Θεωρήστε τη συνάρτηση  $f : \mathbb{R} \rightarrow \mathbb{R}$  με  $f(x) = \sqrt{x}$ . Η  $f$  προφανώς είναι μερική συνάρτηση, καθώς για οποιοδήποτε  $r < 0$  ισχύει ότι  $r \notin \text{dom}(f)$  (ή αλλιώς  $f(r) = \perp$ ).

Προφανώς μία συνάρτηση  $f$  με  $f : \text{dom}(f) \rightarrow \text{im}(f)$  είναι ολική. Ένα εύλογο ερώτημα είναι γιατί μπαίνουμε στη διαδικασία να ορίζουμε τις συναρτήσεις σε ένα γενικότερο σύνολο από το πεδίο ορισμού τους (για παράδειγμα  $f : A \rightarrow B$ ) και έπειτα να τις χωρίζουμε σε ολικές (όπου  $\text{dom}(f) = A$ ) και μερικές (όπου  $\text{dom}(f) \subset A$ ). Η εξήγηση είναι πολύ απλή: Δεν γνωρίζουμε πάντα το πεδίο ορισμού μίας συνάρτησης! Μπορεί με κάποιον τρόπο να γνωρίζουμε ότι αυτή η συνάρτηση δεν είναι ολική αλλά να αδυνατούμε να βρούμε για ποια ακριβώς στοιχεία δεν έχει τιμή <sup>3</sup>.

**Ορισμός 0.1.13.** Έστω  $f : A \rightarrow B$  1-1 συνάρτηση. Η αντίστροφη συνάρτηση της  $f$  είναι η συνάρτηση  $f^{-1} : \text{im}(f) \rightarrow \text{dom}(f)$  με  $f^{-1}(x) = y$ , όπου το  $y$  είναι τέτοιο ώστε  $f(y) = x$ .

**Ορισμός 0.1.14.** Έστω  $f : A \rightarrow B$  και  $g : B \rightarrow C$ . Η σύνθεση των  $f$  και  $g$  είναι η συνάρτηση  $g \circ f : A \rightarrow C$  με  $g \circ f(x) = g(f(x))$ .

<sup>1</sup> Κάθε συνάρτηση  $f$  είναι επί του  $\text{im}(f)$ .

<sup>2</sup> Επομένως ισχύει ότι  $f(\perp) = \perp$  αφού  $\perp \notin \text{dom}(f)$ . Το σύμβολο  $\perp$  συνήθως καλείται πάτος.

<sup>3</sup> Για παράδειγμα, ας πάρουμε έναν αλγόριθμο ο οποίος λειτουργεί με κάποιον «μυστήριο» τρόπο και τελικά υπολογίζει μία συνάρτηση που προφανώς δεν μας είναι γνώριμη. Ας υποθέσουμε επίσης ότι ξέρουμε ότι ο αλγόριθμος αυτός δεν τερματίζει για κάποια είσοδο, πράγμα που σημαίνει ότι η εν λόγω συνάρτηση είναι μερική. Στις περισσότερες των περιπτώσεων δεν είμαστε σε θέση να γνωρίζουμε επακριβώς για ποιες εισόδους ο αλγόριθμος δεν τερματίζει, επομένως το πεδίο ορισμού της συνάρτησης μας είναι άγνωστο.

**Ορισμός 0.1.15.** Έστω σύνολο  $B$ . Η χαρακτηριστική συνάρτηση  $\chi_A : B \rightarrow \{0, 1\}$  ενός συνόλου  $A \subseteq B$  ορίζεται ως εξής:

**Ορισμός 0.1.16.** Δύο σύνολα  $A, B$  είναι *ισοπληθικά* αν υπάρχει ολική 1-1 και επί συνάρτηση  $f : A \rightarrow B$ . Θα γράφουμε  $|A| \leq |B|$  αν υπάρχει ολική 1-1 συνάρτηση  $f : A \rightarrow B$  και θα λέμε ότι το  $B$  έχει περισσότερα στοιχεία από το  $A$ <sup>1</sup>. Αν επιπλέον τα  $A, B$  δεν είναι ισοπληθικά θα γράφουμε  $|A| < |B|$ .

*Απόδειξη.* Προφανώς  $|A| \leq |2^A|$ . Έστω (προς άτοπο) ολική 1-1 και επί συνάρτηση  $f : A \rightarrow 2^A$ . Θεωρούμε το σύνολο  $B = \{x \in A \mid x \notin f(x)\}$ . Αφού  $B \subseteq A$  και η  $f$  είναι επί του  $2^A$ , υπάρχει  $b \in A$  τέτοιο ώστε  $f(b) = B$ . Όμως τότε  $b \in B$  ανν  $b \notin B$ . Άτοπο.  $\square$

Κλείνοντας αυτήν την παράγραφο, να αναφέρουμε ότι στο Κεφάλαιο 2 που πραγματευόμαστε συναρτήσεις φυσικών αριθμών χρησιμοποιούμε τα σύμβολα:

$$x \mid y : \text{το } x \text{ διαιρεί το } y$$

**Ορισμός 0.2.1.** Αλφάβητο είναι ένα πεπερασμένο μη κενό σύνολο συμβόλων.

- $\{0, 1\}$
- $\{0, 1, 2, 3, 4, 5, 6, 7, 8, 9\}$
- $\{q, w, e, r, t, y, u, i, o, p, a, s, d, f, g, h, j, k, l, z, x, c, v, b, n, m, \text{ , , , ? , ! } \}^2$

<sup>2</sup> Για λόγους ευκρίνειας για το σύμβολο του κενού (το 27ο σύμβολο σε αυτό το αλφάβητο) θα χρησιμοποιούμε το σύμβολο  $\sqcup$ .

**Παράδειγμα 0.2.4.**

- 1010101010110 είναι μία λέξη του  $\{0, 1\}$
- 1917 είναι μία λέξη του  $\{0, 1, 2, 3, 4, 5, 6, 7, 8, 9\}$
- $mpla$  είναι μια λέξη του  $\{q, w, e, r, t, y, u, i, o, p, a, s, d, f, g, h, j, k, l, z, x, c, v, b, n, m, \sqcup, \cdot, ?, !\}$

**Ορισμός 0.2.5.** Έστω  $w$  μία λέξη του αλφάβητου  $\Sigma$ . Το μήκος της  $w$ , συμβολισμός  $|w|$ , είναι το πλήθος συμβόλων της <sup>1</sup>.

**Παράδειγμα 0.2.6.**

- $|1010101010110| = 15$
- $|1917| = 4$
- $|mpla| = 4$

**Συμβολισμός 0.2.7.**

- Με  $\epsilon$  συμβολίζουμε την *κενή λέξη*, δηλαδή τη μοναδική λέξη με μήκος 0.
- Ορίζουμε τα σύνολα  $\Sigma^i = \{w \text{ λέξη του } \Sigma \mid |w| = i\}$ ,  $i \in \mathbb{N}$ .
- Η *κλειστότητα Kleene (Kleene Star)* του  $\Sigma$  είναι το σύνολο:

$$\Sigma^* = \bigcup_{i \in \mathbb{N}} \Sigma^i$$

Το σύνολο αυτό περιέχει όλες τις (πεπερασμένου μήκους) λέξεις που μπορούν να κατασκευαστούν με σύμβολα από το  $\Sigma$ .

- Έστω λέξη  $w$  ενός αλφαβήτου. Με  $w^R$  συμβολίζουμε την *αντίστροφη λέξη* της  $w$ . Για παράδειγμα  $mpla^R = alpm$ .

**Ορισμός 0.2.8.** Έστω  $w_1 = x_1 \cdots x_m$  και  $w_2 = y_1 \cdots y_n$  δύο λέξεις στο  $\Sigma^*$ . Η *παράθεσή τους*, συμβολισμός  $w_1 \circ w_2$  (ή και  $w_1 w_2$ ), είναι η λέξη:

$$w_1 \circ w_2 = x_1 \cdots x_m y_1 \cdots y_n$$

**Ορισμός 0.2.9.** Έστω  $w, w' \in \Sigma^*$ . Η  $w'$  είναι *υπολέξη* της  $w$  αν υπάρχουν  $w_1, w_2 \in \Sigma^*$  (ενδεχομένως  $w_1 = \epsilon$  ή  $w_2 = \epsilon$ ) τέτοιες ώστε  $w = w_1 \circ w' \circ w_2$ .

**Συμβολισμός 0.2.10.** Έστω αλφάβητο  $\Sigma$  και λέξη  $x \in \Sigma^*$ . Με  $x^k$  συμβολίζουμε τη λέξη  $\underbrace{x \circ \cdots \circ x}_k$ , όπου  $k \in \mathbb{N}$  (όταν  $k = 0$  το  $x^k$  ισούται με την κενή λέξη  $\epsilon$ ).

$k$  φορές

---

<sup>1</sup> Μετράμε κάθε πολλαπλή εμφάνιση του ίδιου συμβόλου.

Ενίοτε, προς αποφυγή αμφισημιών καθώς θα εφαρμόζουμε αυτήν την «επανάληψη» και σε υπολέξεις μίας λέξης, θα βάζουμε παρενθέσεις γύρω από τη λέξη ή υπολέξη που θα επαναλάβουμε (φτάνει οι παρενθέσεις να μην είναι σύμβολα του αλφαβήτου μας). Για παράδειγμα  $(01)^2 = 0101$  ενώ  $01^2 = 011$ .

**Ορισμός 0.2.11.** Έστω αλφάβητο  $\Sigma$  και αρίθμηση  $\sigma : \Sigma \rightarrow \mathbb{N}$  των στοιχείων του. Η λεξικογραφική διάταξη των λέξεων του  $\Sigma^*$ , σύμφωνα με τη  $\sigma$ , είναι η διάταξη που χρησιμοποιείται στα λεξικά<sup>1</sup> μόνο που οι λέξεις με μικρότερο μήκος προηγούνται.

**Παράδειγμα 0.2.12.** Η λεξικογραφική διάταξη του  $\{0, 1\}^*$  (με την αρίθμηση  $\sigma(0) = 1$  και  $\sigma(1) = 2$ ) είναι  $\epsilon, 0, 1, 00, 01, 10, 11, 000, 001, \dots$

**Ορισμός 0.2.13.** Έστω αλφάβητο  $\Sigma$ , συνάρτηση  $\sigma : \Sigma \rightarrow \mathbb{N}$  και  $w, w' \in \Sigma^*$ . Αν η  $w$  βρίσκεται πριν από την  $w'$  στη λεξικογραφική διάταξη, σύμφωνα με τη  $\sigma$ , θα γράφουμε  $w <_\sigma w'$ .

**Σύμβαση 0.2.14.** Θα θεωρούμε ότι κάθε αλφάβητο  $\Sigma$  συνοδεύεται από μια προσυμφωνημένη λεξικογραφική διάταξη, χωρίς να αναφερόμαστε ρητά στην αρίθμηση  $\sigma$ . Έτσι θα γράφουμε  $w < w'$  (ή ακόμα και  $w \leq w'$ , στην περίπτωση που η  $w$  μπορεί να ταυτίζεται με την  $w'$ ).

**Παράδειγμα 0.2.15.** Σύμφωνα με το Παράδειγμα 0.2.12  $11 < 000$ .

**Παρατήρηση 0.2.16.** Έστω αλφάβητο  $\Sigma$  και συνάρτηση  $\sigma : \Sigma \rightarrow \mathbb{N}$ . Η λεξικογραφική διάταξη του  $\Sigma^*$  (σύμφωνα με τη  $\sigma$ ) είναι μία (ολική) 1-1 και επί συνάρτηση από το  $\Sigma^*$  στο  $\mathbb{N}$ . Συνεπώς  $|\Sigma^*| = \aleph_0$ .

**Ορισμός 0.2.17.** Έστω αλφάβητο  $\Sigma$ . Κάθε υποσύνολο  $L \subseteq \Sigma^*$  καλείται γλώσσα του  $\Sigma$ .

**Παράδειγμα 0.2.18.** Τα παρακάτω σύνολα είναι γλώσσες του  $\{0, 1\}^*$ :

- $L = \{w \in \{0, 1\}^* \mid w = 0^n 1^n, n \in \mathbb{N}\}$
- $L_{\text{Παλίνδρομο}} = \{w \in \{0, 1\}^* \mid w = w^R\}$
- $L = \emptyset$  (κενή γλώσσα)
- $L = \{\epsilon\}$  (η γλώσσα που περιέχει μόνο την κενή λέξη)

**Ορισμός 0.2.19.** Έστω αλφάβητο  $\Sigma$ ,  $a \in \Sigma$  και γλώσσα  $L \subseteq \Sigma^*$ . Ορίζουμε τη γλώσσα:

$$aL = \{w \in \Sigma^* \mid \exists x \in L (w = a \circ x)\}$$

**Ορισμός 0.2.20.** Έστω αλφάβητο  $\Sigma$  και γλώσσες  $L_1, L_2 \subseteq \Sigma^*$ . Ορίζουμε τη γλώσσα:

$$L_1 L_2 = \{w \in \Sigma^* \mid \exists w_1 \in L_1 \exists w_2 \in L_2 (w = w_1 \circ w_2)\}$$

<sup>1</sup> Παραδείγματος χάρι αν  $\$, @ \in \Sigma$  και  $\sigma(\$) < \sigma(@)$  τότε οι λέξεις που αρχίζουν από  $\$$  προηγούνται αυτών που αρχίζουν από  $@$ . Για λέξεις που αρχίζουν με το ίδιο σύμβολο συγκρίνουμε το δεύτερο σύμβολο και ούτω καθεξής.

**Ορισμός 0.2.21.** Έστω αλφάβητο  $\Sigma$  και γλώσσα  $L \subseteq \Sigma^*$ . Ορίζουμε:

$$\begin{aligned} L^0 &= \{\epsilon\} \\ L^1 &= L \\ L^n &= LL^{n-1} \\ L^* &= \bigcup_{i \in \mathbb{N}} L^i \end{aligned}$$

**Ορισμός 0.2.22.** Έστω αλφάβητο  $\Sigma$ . Κανονική έκφραση του  $\Sigma$  είναι κάθε λέξη του αλφαβήτου  $\Sigma \cup \{[, ], \emptyset, \epsilon, \sqcup, ^*\}$  που κατασκευάζεται σύμφωνα με τους ακόλουθους κανόνες:

1. Το  $\emptyset$ , το  $\epsilon$  και κάθε σύμβολο του  $\Sigma$  είναι κανονική έκφραση.
2. Αν  $a, b$  κανονικές εκφράσεις τότε και η  $[ab]$  είναι κανονική έκφραση.
3. Αν  $a, b$  κανονικές εκφράσεις τότε και η  $[a \sqcup b]$  είναι κανονική έκφραση.
4. Αν  $a$  κανονική έκφραση τότε και η  $a^*$  είναι κανονική έκφραση.

Συμβολίζουμε με  $R_\Sigma$  το σύνολο των κανονικών εκφράσεων του  $\Sigma$ .

**Παράδειγμα 0.2.23.** Οι λέξεις  $[0^*1^*]$ ,  $[0^* \sqcup 1^*]$ ,  $[[01^*]0]$ ,  $[01] \sqcup \emptyset$  είναι κανονικές εκφράσεις του  $\{0, 1\}$ .

**Ορισμός 0.2.24.** Έστω αλφάβητο  $\Sigma$ . Θεωρούμε τη συνάρτηση  $\mathcal{L} : R_\Sigma \rightarrow 2^{\Sigma^*}$  που αντιστοιχεί σε κάθε κανονική έκφραση μία γλώσσα ως εξής:

$$\mathcal{L}(x) = \begin{cases} \emptyset & , \text{αν } x = \emptyset \\ \{\epsilon\} & , \text{αν } x = \epsilon \\ \{a\} & , \text{αν } x = a \in \Sigma \\ \mathcal{L}(a)\mathcal{L}(b) & , \text{αν } x = [ab] \text{ όπου } a, b \in R_\Sigma \\ \mathcal{L}(a) \cup \mathcal{L}(b) & , \text{αν } x = [a \sqcup b] \text{ όπου } a, b \in R_\Sigma \\ \mathcal{L}(a)^* & , \text{αν } x = a^* \text{ όπου } a \in R_\Sigma \end{cases}$$

**Παράδειγμα 0.2.25.** Η  $\mathcal{L}$  αντιστοιχεί στην κανονική έκφραση  $[[0 \sqcup 1]^*0]$  του  $\{0, 1\}$  τη γλώσσα:

$$\begin{aligned} \mathcal{L}([0 \sqcup 1]^*0) &= \mathcal{L}([0 \sqcup 1]^*)\mathcal{L}(0) \\ &= \mathcal{L}([0 \sqcup 1])^*\{0\} \\ &= (\mathcal{L}(0) \cup \mathcal{L}(1))^*\{0\} \\ &= (\{0\} \cup \{1\})^*\{0\} \\ &= \{0, 1\}^*\{0\} \\ &= \{w \in \{0, 1\}^* \mid \exists w_1 \in \{0, 1\}^* (w = w_1 \circ 0)\} \end{aligned}$$



# ΜΕΡΟΣ Ι

---

ΜΟΝΤΕΛΑ ΥΠΟΛΟΓΙΣΜΟΥ



Στις αρχές του 20<sup>ου</sup> αιώνα, στα πλαίσια της γενικευμένης ανάγκης να λυθούν τα πα-  
ράδοξα που είχαν προκύψει στη Θεωρία Συνόλων, ο *David Hilbert* έθεσε μια σειρά από  
ερωτήματα-στόχους στην επιστημονική κοινότητα. Στα ερωτήματα αυτά εκφραζόταν ρητά η  
απαίτηση για την τυπική θεμελίωση των μαθηματικών και καταδεικνυόταν η αναγκαιότητα  
διερεύνησης των ορίων της *Αλγοριθμικής Υπολογισιμότητας*. Όπως είδαμε οι απαντήσεις  
που δόθηκαν σε αυτά τα ερωτήματα ήταν αρνητικές: Πρώτα ο *Kurt Gödel* έδειξε ότι δεν  
είναι δυνατό να υπάρξει αξιωματικοποίηση των μαθηματικών που να είναι συνεπής και  
παράλληλα ικανή να αποδείξει όλες τις αλήθειες των μαθηματικών, και έπειτα οι *Alonzo*  
*Church* και *Alan Turing* απέδειξαν ότι το Entscheidungsproblem (δες Σελίδα 2) δεν μπο-  
ρεί να λυθεί αλγοριθμικά καθώς δεν μπορεί να υπάρξει διαδικασία που να ελέγχει αν μια  
μαθηματική έκφραση είναι αληθής είτε όχι (δες Θεώρημα 8.5.12).

Κύριο πόνημά μας στις σημειώσεις αυτές είναι να παρουσιάσουμε αναλυτικά τη θεωρία  
που δημιουργήθηκε από τα παραπάνω γεγονότα. Ο αρχικός μας στόχος είναι να δώσουμε  
τυπικούς ορισμούς των συναρτήσεων που είναι *αλγοριθμικά υπολογίσιμες*. Για την ακρίβεια  
θα δώσουμε τέσσερις διαφορετικούς – αλλά ισοδύναμους – ορισμούς, βασιζόμενοι κάθε  
φορά και σε μία διαφορετική «προσέγγιση» της έννοιας του *Αλγορίθμου*. Η πρώτη πηγάζει  
στη δουλειά του *Alan Turing* και παρουσιάζεται σε αυτό το κεφάλαιο (οι υπόλοιπες θα  
παρουσιαστούν στα Κεφάλαια 2, 3 και 4).

## 1.1 Ορισμός Μηχανής Turing και Υπολογισμού

**Ορισμός 1.1.1.** *Μηχανή Turing (TM)* είναι μια εξάδα  $M = (Q, \Sigma, \Gamma, \delta, q_0, q_{\text{τέλος}})$  όπου  
 $Q, \Sigma, \Gamma$  πεπερασμένα σύνολα, και:

1.  $Q$  είναι το σύνολο των καταστάσεων
2.  $q_0, q_{\text{τέλος}} \in Q$ ,  $q_0$  είναι η αρχική κατάσταση και  $q_{\text{τέλος}}$  η τερματική κατάσταση

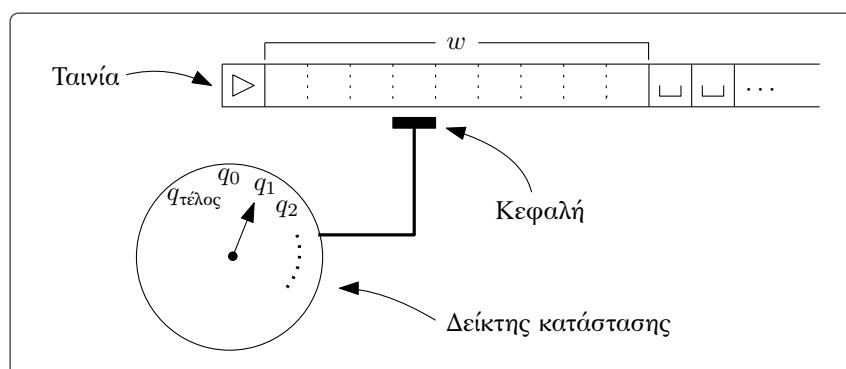
3.  $\Sigma$  είναι το αλφάβητο εισόδου
4.  $\Gamma$  είναι το αλφάβητο ταινίας
5.  $\Sigma \subset \Gamma$
6.  $\triangleright, \sqcup \in \Gamma \setminus \Sigma$ , το  $\triangleright$  είναι το μαξιλαράκι και  $\sqcup$  το σύμβολο του κενού
7.  $\delta : Q \times \Gamma \rightarrow Q \times \Gamma \times \{A, \Delta\}$  είναι η συνάρτηση μετάβασης, τα  $A, \Delta$  συμβολίζουν τις δύο κατευθύνσεις (αριστερά και δεξιά αντίστοιχα), και η συνάρτηση αυτή ικανοποιεί τους ακόλουθους περιορισμούς:
  - $\forall a \in \Gamma (\delta(q_{\text{τέλος}}, a) = \perp)$
  - $\forall q \in Q \setminus \{q_{\text{τέλος}}\} \forall q' \in Q \forall a \in \Gamma (\delta(q, \triangleright) = (q', a, x) \rightarrow x = \Delta \wedge a = \triangleright)$

Η λέξη εισόδου (ή απλά η είσοδος) μίας TM  $M = (Q, \Sigma, \Gamma, \delta, q_0, q_{\text{τέλος}})$  είναι μία λέξη  $w \in \Sigma^*$ . Μπορούμε να φανταστούμε την  $M$  ως εξής (δες Σχήμα 1.1.1):

*Η  $M$  αποτελείται από μια άπειρη (από τα δεξιά) ταινία, χωρισμένη σε κελιά που μπορούν να περιέχουν ακριβώς ένα σύμβολο του  $\Gamma$ , έναν δείκτη καταστάσεων (ή αλλιώς έναν ελεγκτή) και μία κεφαλή που κινείται πάνω στην ταινία και μπορεί να διαβάζει το περιεχόμενο ενός κελιού ή να γράφει ένα σύμβολο του  $\Gamma$  σε αυτό.*

Το πρώτο κελί της ταινίας περιέχει το σύμβολο  $\triangleright$ , πάνω στο οποίο δεν μπορεί να γράφει η κεφαλή της  $M$  (λόγω του δεύτερου περιορισμού της συνάρτησης μετάβασής της). Τα επόμενα  $|w|$  κελιά περιέχουν την είσοδο  $w$  (στην αρχή της «λειτουργίας» της) και τα υπόλοιπα κελιά το σύμβολο  $\sqcup$ . Σε κάθε «βήμα λειτουργίας» της  $M$  η κεφαλή βρίσκεται σε ένα κελί της ταινίας (που φυσικά περιέχει ένα σύμβολο του  $\Gamma$ ) και ο ελεγκτής δείχνει μία κατάσταση του  $Q$  (έχουμε δηλαδή ένα όρισμα για τη συνάρτηση μετάβασης  $\delta$ ). Η «λειτουργία» της  $M$  με είσοδο  $w$  εξελίσσεται ως εξής:

1. Διαβάζουμε το σύμβολο που περιέχει το κελί που βρίσκεται η κεφαλή και την κατάσταση που δείχνει ο ελεγκτής.
2. Συμβουλευόμαστε τη συνάρτηση μεταβάσεων  $\delta$  (βλέπουμε δηλαδή την τιμή της για το δεδομένο όρισμα) και βρίσκουμε:
  - το σύμβολο που πρέπει να γράψουμε στην ταινία,
  - τη νέα κατάσταση που πρέπει να δείξει ο ελεγκτής και
  - τη φορά που πρέπει να κινήσουμε την κεφαλή πάνω στην ταινία.
3. Γράφουμε το καινούριο σύμβολο στο κελί που βρίσκεται η κεφαλή (στη θέση του παλιού συμβόλου).
4. Αλλάζουμε τον δείκτη του ελεγκτή ώστε να δείχνει τη νέα κατάσταση.



Σχήμα 1.1.1: Σχηματική αναπαράσταση μίας TM.

5. Κινούμε την κεφαλή ένα κελί αριστερά αν έχουμε A ή ένα κελί δεξιά αν έχουμε Δ.

Είναι ιδιαίτερα βοηθητικό να φανταζόμαστε τη συνάρτηση  $\delta$  σαν τις εντολές του αλγορίθμου που υλοποιεί η μηχανή Turing. Οι εντολές αυτές δεν θυμίζουν τις εντολές που συνήθως χρησιμοποιούμε στον προγραμματισμό (εντολές ανάθεσης, εντολές ελέγχου ροής κ.λπ.). Η υλοποίηση του αλγορίθμου μέσω μίας μηχανής Turing μοιάζει περισσότερο με τον προγραμματισμό σε μία «χαμηλού επιπέδου» γλώσσα προγραμματισμού (π.χ. τη γλώσσα μηχανής).

**Παράδειγμα 1.1.2.** Έστω ότι  $(q_3, 0, q_4, 3, A) \in \delta$ , το Σχήμα 1.1.2 δείχνει τις αλλαγές που γίνονται στην TM.

**Ορισμός 1.1.3.** Έστω TM  $M = (Q, \Sigma, \Gamma, \delta, q_0, q_{\text{τέλος}})$ . Κάθε δυνατός συνδυασμός λέξης του  $\Gamma^*$ , σειρά συμβόλου στη λέξη αυτή και κατάστασης του  $Q$  καλείται *φάση* ή *στιγμιότυπο* λειτουργίας.

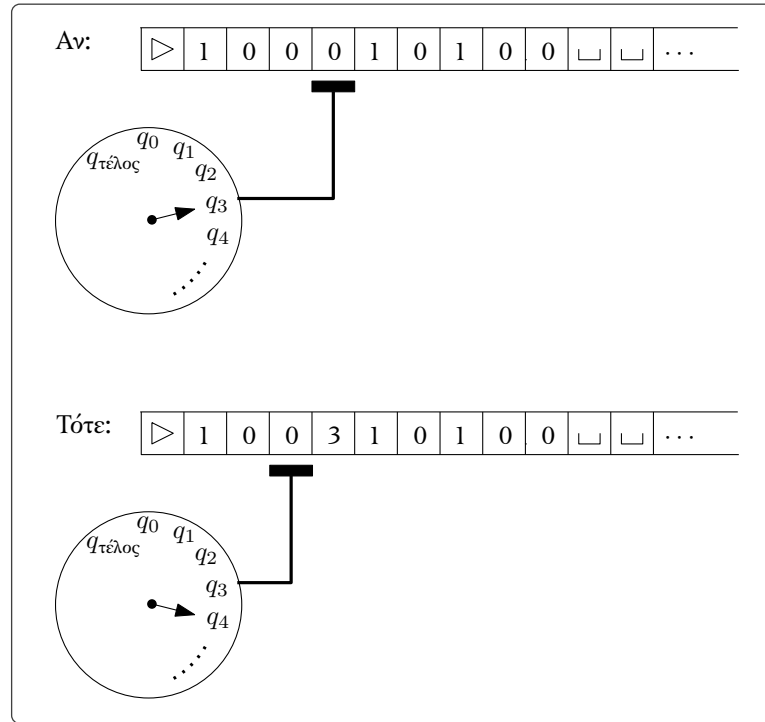
Ο παραπάνω ορισμός είναι πολύ γενικός και χαρακτηρίζει ως στιγμιότυπα λειτουργίας πολλούς συνδυασμούς που δεν θα μπορούν να προκύψουν κατά τη λειτουργία της  $M$  με είσοδο μία λέξη  $w \in \Sigma^*$ <sup>1</sup>. Ο απώτερος σκοπός μας είναι η λέξη του  $\Gamma^*$  να αντιστοιχεί στη λέξη που περιέχει η ταινία της TM σε κάποια δεδομένη στιγμή, ο αριθμός συμβόλου στη θέση της κεφαλής και η κατάσταση στην κατάσταση που δείχνει ο ελεγκτής.

Προτού ξεκαθαρίσουμε ποια από τα στιγμιότυπα λειτουργίας είναι εφικτά, ας δούμε πρώτα έναν πιο τυπικό τρόπο να τα αναπαραστήσουμε.

**Συμβολισμός 1.1.4.** Έστω TM  $M = (Q, \Sigma, \Gamma, \delta, q_0, q_{\text{τέλος}})$ . Θα συμβολίζουμε ένα στιγμιότυπο λειτουργίας με μία λέξη του  $(\Gamma \cup Q)^*$  ως εξής: Θα προσθέτουμε στη λέξη του  $\Gamma^*$ , στη θέση που αντιστοιχεί στη σειρά του συμβόλου, το σύμβολο από το  $Q$  που αντιστοιχεί στην κατάσταση.

**Παράδειγμα 1.1.5.** Ας δούμε το στιγμιότυπο λειτουργίας που αντιστοιχεί στο «Αν» του Σχήματος 1.1.2: Η ταινία γράφει τη λέξη  $\triangleright 100010100$ , η κεφαλή βρίσκεται στο πέμπτο κελί

<sup>1</sup> Από εδώ και στο εξής αντί για «η λειτουργία της  $M$  με είσοδο την  $w$ » χάριν συντομίας θα γράφουμε  $M(w)$ .



**Σχήμα 1.1.2:** Παράδειγμα λειτουργίας ΤΜ που περιέχει τη μετάβαση  $(q_3, 0, q_4, 3, A)$ .

και ο δείκτης δείχνει την  $q_3$ . Αυτό το στιγμιότυπο λειτουργίας το συμβολίζουμε με τη λέξη  $\triangleright 100q_3010100 \in (\Gamma \cup Q)^*$ .

**Ορισμός 1.1.6.** Έστω ΤΜ  $M = (Q, \Sigma, \Gamma, \delta, q_0, q_{\text{τέλος}})$  και στιγμιότυπο:

$$a_1 a_2 \cdots a_{i-1} q a_i \cdots a_n$$

όπου  $a_i \in \Gamma$ ,  $i \in [n]$  και  $q \in Q$ .

- Αν  $\delta(q, a_i) = (p, b, A)$  και  $i > 1$  τότε το επόμενο στιγμιότυπο είναι το:

$$a_1 a_2 \cdots a_{i-2} p a_{i-1} b a_{i+1} \cdots a_n$$

- Αν  $\delta(q, a_i) = (p, b, \Delta)$  και  $1 \leq i < n$  τότε το επόμενο στιγμιότυπο είναι το:

$$a_1 a_2 \cdots a_{i-1} b p a_{i+1} \cdots a_n$$

- Αν  $\delta(q, a_i) = (p, b, \Delta)$  και  $i = n$  τότε το επόμενο στιγμιότυπο είναι το:

$$a_1 a_2 \cdots b p \sqcup$$

Δεν θα υπάρχει επόμενο στιγμιότυπο:

- Αν  $\delta(q, a_i) = (p, b, A)$  και  $i = 1$ .
- Αν  $\delta(q, a_i) = \perp$ . Στην περίπτωση αυτή θα λέμε ότι η  $M$  σταματάει τη λειτουργία της αν  $q = q_{\text{τέλος}}$  ή ότι κολλάει αν  $q \neq q_{\text{τέλος}}$ .

**Παρατήρηση 1.1.7.** Ας αναλύσουμε λίγο την πρώτη περίπτωση μη ύπαρξης επόμενου στιγμιότυπου. Στα στιγμιότυπα λειτουργίας που μπορούν να προκύψουν κατά τη λειτουργία της  $M(w)$ , για μια λέξη  $w \in \Sigma^*$ , η λέξη που θα περιέχει η ταινία πάντα θα ξεκινάει με το σύμβολο  $\triangleright$  λόγω των υποθέσεών μας και του δευτέρου περιορισμού της συνάρτησης  $\delta$  (δες Ορισμό 1.1.1). Άρα  $a_1 = \triangleright$  και πάντα θα υπάρχει επόμενο στιγμιότυπο καθώς δεν υπάρχει μετάβαση της μορφής  $\delta(q, \triangleright) = (p, \triangleright, A)$  (πάλι λόγω του δευτέρου περιορισμού της συνάρτησης  $\delta$ ). Συνεπώς, αυτή η περίπτωση δεν θα μπορεί να προκύψει <sup>1</sup>.

Θα αναρωτιέται κανείς γιατί προσθέτουμε το σύμβολο  $\sqcup$  στην τρίτη περίπτωση του Ορισμού 1.1.6. Ο λόγος είναι ότι στη προτιθέμενη χρήση των στιγμιότυπων λειτουργίας και στην προκειμένη περίπτωση, η κεφαλή θα βρίσκεται στο τελευταίο σύμβολο της λέξης που περιέχει η ταινία και, καθώς κινούμε την κεφαλή δεξιά, πλέον διαβάζουμε ένα από τα άπειρα σύμβολα  $\sqcup$  που περιέχονται στην ταινία.

**Ορισμός 1.1.8.** Έστω TM  $M = (Q, \Sigma, \Gamma, \delta, q_0, q_{\text{τέλος}})$  και  $C_1, C_2$  στιγμιότυπα λειτουργίας.

- Αν το  $C_2$  είναι επόμενο στιγμιότυπο του  $C_1$  θα γράφουμε  $C_1 \vdash_M C_2$  και θα λέμε ότι από το  $C_1$  μεταβαίνουμε στο  $C_2$  (σύμφωνα με τη  $\delta$ ). Με αυτόν τον τρόπο ορίζουμε μία διμελή σχέση  $\vdash_M \subseteq (\Gamma \cup Q)^* \times (\Gamma \cup Q)^*$ .
- Έστω  $\vdash_M^*$  η ανακλαστική και μεταβατική κλειστότητα της σχέσης  $\vdash_M$ . Αν  $C_1 \vdash_M^* C_2$  θα λέμε ότι το  $C_1$  παράγει το  $C_2$ .

Ας δούμε πως θα χρησιμοποιήσουμε τα στιγμιότυπα λειτουργίας για να ορίσουμε τον υπολογισμό της  $M(w)$ , για μία λέξη εισόδου  $w \in \Sigma^*$ .

**Ορισμός 1.1.9.** Έστω TM  $M = (Q, \Sigma, \Gamma, \delta, q_0, q_{\text{τέλος}})$  και λέξη  $w \in \Sigma^*$ .

- Το αρχικό στιγμιότυπο της  $M(w)$  είναι το:  $\triangleright q_0 w$ .
- Καταληκτικό στιγμιότυπο της  $M(w)$  είναι κάθε στιγμιότυπο της μορφής:  $\triangleright w_1 q_{\text{τέλος}} w_2$ , όπου  $w_1, w_2 \in \Gamma^*$  <sup>2</sup>.

**Ορισμός 1.1.10.** Έστω TM  $M = (Q, \Sigma, \Gamma, \delta, q_0, q_{\text{τέλος}})$  και  $w \in \Sigma^*$ . Υπολογισμός της  $M(w)$  είναι μια ακολουθία στιγμιότυπων  $C_0, C_1, \dots$  (πιθανώς πεπερασμένη) όπου:

1.  $C_0$  είναι το αρχικό στιγμιότυπο και
2.  $C_i \vdash_M C_{i+1}$  για κάθε  $i \in \mathbb{N}$ .

<sup>1</sup> Εδώ γίνεται εμφανής η αναγκαιότητα χρήσης ενός συμβόλου που θα σηματοδοτεί την αρχή της ταινίας.

<sup>2</sup> Δεν είναι απαραίτητο ότι υπάρχει καταληκτικό στιγμιότυπο για την  $M(w)$ . Περισσότερα σε λίγο...

Μπορούμε να φανταστούμε τον υπολογισμό της  $M(w)$  σαν ένα (πιθανώς άπειρο) διατεταγμένο γραφο-θεωρητικό μονοπάτι με κορυφές του τα στιγμιότυπα λειτουργίας της  $M(w)$  και ακμές μεταξύ προηγούμενου και επόμενου στιγμιότυπου.

**Ορισμός 1.1.11.** Έστω TM  $M = (Q, \Sigma, \Gamma, \delta, q_0, q_{\text{τέλος}})$  και  $w \in \Sigma^*$ . Ο υπολογισμός της  $M(w)$  *τερματίζει* αν υπάρχουν  $w_1, w_2 \in \Gamma^*$  τέτοια ώστε:

$$\triangleright q_0 w \vdash_M^* w_1 q_{\text{τέλος}} w_2$$

δηλαδή από το αρχικό στιγμιότυπο μεταβαίνουμε σε ένα καταληκτικό στιγμιότυπο.

Στην περίπτωση που έχουμε τερματισμό η ακολουθία στιγμιότυπων είναι πεπερασμένη<sup>1</sup>. Σε αυτήν την περίπτωση θα γράφουμε  $M(w) \downarrow$ . Αν ο υπολογισμός της  $M(w)$  *δεν τερματίζει* θα γράφουμε  $M(w) \uparrow$ <sup>2</sup>.

**Συμβολισμός 1.1.12.** Όταν μας ενδιαφέρει το πλήθος βημάτων, δηλαδή το πλήθος στιγμιότυπων λειτουργίας στην ακολουθία υπολογισμού, που χρειάζεται μία TM  $M$  με είσοδο  $w \in \Sigma^*$  για να τερματίσει θα χρησιμοποιούμε τον συμβολισμό  $M(w) \downarrow^t$ , όπου  $t \in \mathbb{N}$  το πλήθος βημάτων. Τέλος, θα γράφουμε  $M(w) \downarrow_q$  για μία κατάσταση  $q$  δέλοντας να δηλώσουμε το γεγονός ότι η  $M(w)$  μεταβαίνει σε στιγμιότυπο που περιέχει την  $q$  (και αν επιπλέον μας ενδιαφέρει και το πλήθος βημάτων θα γράφουμε  $M(w) \downarrow_q^t$ ).

## 1.2 Τι κάνουν οι Μηχανές Turing;

Η συνάρτηση μεταβάσεων μίας TM μπορεί να μην προσεγγίζει καθόλου την έννοια του αλγορίθμου που έχουμε συναντήσει στα μαθηματικά, όπως και ο τυπικός ορισμός του υπολογισμού μπορεί να μη θυμίζει σε τίποτα τον υπολογισμό από έναν Ηλεκτρονικό Υπολογιστή (H/Y), όμως, όπως θα δούμε άμεσα, στην πραγματικότητα η TM είναι μία πολύ καλή μαθηματική θεμελίωση του Αλγορίθμου και ο υπολογισμός μία αρκετά πιστή περιγραφή των στοιχειωδών εργασιών που κάνει ο H/Y μας κατά τη λειτουργία του.

Σε αυτήν την παράγραφο θα εξετάσουμε τις τρεις βασικές λειτουργίες που μπορούν να φέρουν εις πέρας οι TM και θα επιχειρηματολογήσουμε ότι μπορούμε να τις θεωρήσουμε τις βασικές λειτουργίες ενός H/Y. Οι λειτουργίες αυτές είναι:

- Ο υπολογισμός συναρτήσεων.
- Η αναγνώριση ή η απόφαση γλωσσών.
- Η απαρίθμηση γλωσσών.

<sup>1</sup> Λόγω του πρώτου περιορισμού που θέσαμε στη συνάρτηση μετάβασης δεν θα υπάρξει επόμενο στιγμιότυπο, συνεπώς η ακολουθία θα είναι πεπερασμένη.

<sup>2</sup> Ο υπολογισμός μπορεί να μην τερματίζει είτε επειδή η ακολουθία στιγμιότυπων είναι άπειρη, είτε επειδή η  $M$  κολλάει, οπότε η ακολουθία στιγμιότυπων να μην είναι πεπερασμένη, αλλά το τελευταίο στιγμιότυπο της δεν είναι καταληκτικό. Παρατηρήστε ότι η πρώτη περίπτωση μη τερματισμού είναι η ουσιαστική καθώς τη δεύτερη θα μπορούσαμε να την αποφύγουμε αν είχαμε προνοήσει να ορίσουμε τη  $\delta$  για όλες τις δυνατές εισόδους που μπορούν να προκύψουν.

### 1.2.1 Υπολογισμός συναρτήσεων

Σε αυτές τις σημειώσεις ενδιαφερόμαστε κυρίως για μία ειδική κατηγορία αριθμητικών συναρτήσεων (δες Κεφάλαιο 2). Όμως, όπως είδαμε στην προηγούμενη παράγραφο, ο υπολογισμός μίας Μηχανής Turing αφορά τις λέξεις του αλφάβητου εισόδου της. Το αντικείμενο του υπολογισμού δηλαδή είναι μία λέξη και όχι ένας αριθμός όπως θα επιθυμούσαμε. Αυτό το πρόβλημα μπορεί εύκολα να ξεπεραστεί αν συμφωνήσουμε σε έναν τρόπο να «κωδικοποιούμε» τους αριθμούς σε κάποιο αλφάβητο <sup>1</sup>. Έτσι, παρόλο που το αντικείμενο του υπολογισμού θα παραμένει μία λέξη ο υπολογισμός θα αφορά κάποιον αριθμό.

Ας δούμε με ποιον τρόπο οι μηχανές Turing μπορούν να υπολογίσουν μία συνάρτηση.

**Ορισμός 1.2.1.** Μία συνάρτηση  $f : \Sigma^* \rightarrow \Sigma^*$  καλείται (Turing) υπολογίσιμη αν υπάρχει TM  $M = (Q, \Sigma, \Gamma, \delta, q_0, q_{\text{τέλος}})$  τέτοια ώστε:

$$\forall w \in \text{dom}(f) (\triangleright q_0 w \vdash_M^* q_{\text{τέλος}} f(w)) \text{ και } \forall w \notin \text{dom}(f) (M(w) \uparrow)$$

Στην περίπτωση αυτή θα λέμε ότι η  $M$  υπολογίζει την  $f$ .

**Παράδειγμα 1.2.2.** Έστω  $\text{id} : \{0, 1\}^* \rightarrow \{0, 1\}^*$  η ταυτοτική συνάρτηση με  $\text{id}(x) = x$ . Η TM  $M = (Q, \Sigma, \Gamma, \delta, q_{\text{τέλος}}, q_{\text{τέλος}})$  <sup>2</sup> με  $Q = \{q_{\text{τέλος}}\}$ ,  $\Sigma = \{0, 1\}$ ,  $\Gamma = \{\triangleright, \sqcup, 0, 1\}$  και  $\delta = \emptyset$  την υπολογίζει <sup>3</sup>.

Σε αυτήν την περίπτωση ο υπολογισμός της  $M(x)$  για οποιαδήποτε λέξη  $x \in \{0, 1\}^*$  θα αποτελείται από ένα μόνο στιγμιότυπο λειτουργίας, το οποίο θα είναι ταυτόχρονα αρχικό και καταληκτικό (το  $\triangleright q_{\text{τέλος}} x$ ).

Το Παράδειγμα 1.2.2 είναι ένα «ακραίο» δείγμα υπολογισμού συνάρτησης. Τα παραδείγματα που ακολουθούν θα είναι πιο διδακτικά. Αντί να παρουσιάζουμε αναλυτικά τη συνάρτηση μεταβάσεων  $\delta$  (που όπως θα δούμε συνήθως αποτελείται από πάρα πολλά στοιχεία) θα δίνουμε μια συμβολική περιγραφή της, το λεγόμενο *διάγραμμα καταστάσεων* (δες Παράδειγμα 1.2.3 <sup>4</sup>).

**Παράδειγμα 1.2.3.** Έστω  $f : \{0, 1\}^* \rightarrow \{0, 1\}^*$  η σταθερή συνάρτηση  $f(x) = 1$ . Η  $M = (Q, \Sigma, \Gamma, \delta, q_0, q_{\text{τέλος}})$  με  $Q = \{q_0, q_1, q_2, q_{\text{τέλος}}\}$ ,  $\Sigma = \{0, 1\}$ ,  $\Gamma = \{\triangleright, \sqcup, 0, 1\}$  και

$$\begin{aligned} \delta = \{ & (q_0, 0, q_1, 1, \Delta), (q_0, 1, q_1, 1, \Delta), (q_0, \sqcup, q_1, 1, \Delta), \\ & (q_1, 0, q_1, \sqcup, \Delta), (q_1, 1, q_1, \sqcup, \Delta), (q_1, \sqcup, q_2, \sqcup, A), \\ & (q_2, \sqcup, q_2, \sqcup, A), (q_2, 1, q_2, 1, A), (q_2, \triangleright, q_{\text{τέλος}}, \triangleright, \Delta) \} \end{aligned}$$

την υπολογίζει <sup>5</sup>. Το διάγραμμα καταστάσεων της  $\delta$  φαίνεται στο Σχήμα 1.2.1.

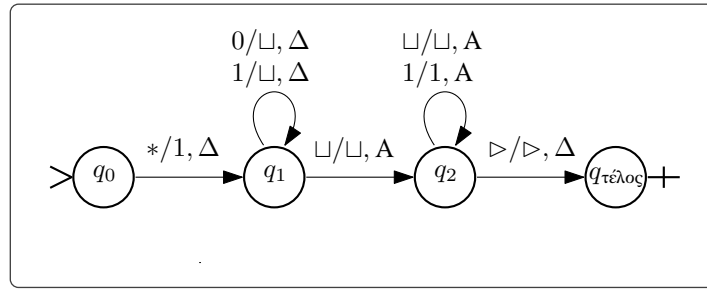
<sup>1</sup> Για παράδειγμα μπορούμε να κωδικοποιήσουμε τους φυσικούς αριθμούς στο αλφάβητο  $\{0, 1\}$ , παίρνοντας τη δυαδική αναπαράστασή τους, όπως επίσης θα μπορούσαμε απλά να ορίσουμε TM με αλφάβητο εισόδου το  $\{0, 1, 2, 3, 4, 5, 6, 7, 8, 9\}$ . Και στις δύο περιπτώσεις θα πρέπει να δώσουμε μεγάλη προσοχή κατά τον σχεδιασμό της TM έτσι ώστε να χειρίζεται ειδικά τις λέξεις που δεν αντιστοιχούν σε φυσικούς αριθμούς (όπως π.χ. τη 0000).

<sup>2</sup> Ο Ορισμός 1.1.1 επιτρέπει η αρχική και η τερματική κατάσταση να ταυτίζονται!

<sup>3</sup> Θεωρούμε ότι η κενή συνάρτηση ικανοποιεί τετριμμένα τις προϋποθέσεις της συνάρτησης μετάβασης στη Σελίδα 14.

<sup>4</sup> Θα αποφύγουμε να δώσουμε τυπική περιγραφή των διαγραμμάτων καταστάσεων καθώς ο τρόπος που αναπαριστούν τη  $\delta$  φαίνεται ξεκάθαρα στα παραδείγματα που ακολουθούν.

<sup>5</sup> Μπορούμε να φανταστούμε ότι η  $M$  υλοποιεί το ακόλουθο πρόγραμμα:



**Σχήμα 1.2.1:** Η ΤΜ που υπολογίζει τη συνάρτηση του Παραδείγματος 1.2.3 (το σύμβολο  $*$  παίρνει όλες τις τιμές του  $\Sigma \setminus \{\triangleright\}$ ).

**Σημείωση 1.2.4.** Από εδώ και πέρα (αν δεν συντρέχει σημαντικός λόγος) θα παρουσιάζουμε μόνο το διάγραμμα καταστάσεων μίας ΤΜ καθώς αυτό περιέχει όλη την πληροφορία που χρειαζόμαστε<sup>1</sup>.

**Παράδειγμα 1.2.5.** Έστω  $f : \{0, 1\}^* \rightarrow \{0, 1\}^*$  με:

$$f(x) = \begin{cases} 0 & , \text{αν } x \in \{0^n \mid n \in \mathbb{N}\} \\ \perp & , \text{αλλιώς} \end{cases}$$

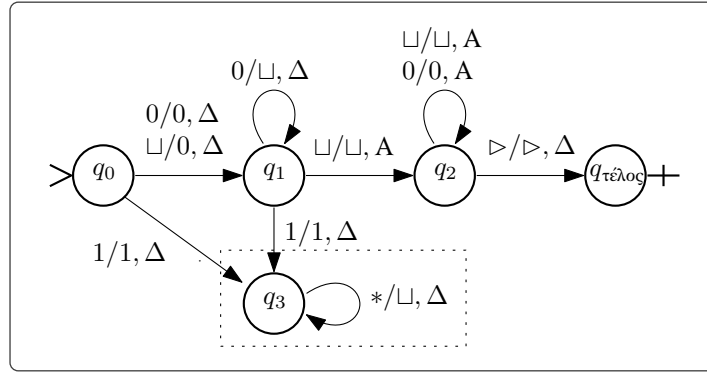
Η ΤΜ του Σχήματος 1.2.2 την υπολογίζει.

**Παράδειγμα 1.2.6.** Έστω  $\emptyset: \Sigma^* \rightarrow \Sigma^*$  η κενή συνάρτηση με  $\emptyset(x) = \perp$ . Η ΤΜ του Σχήματος 1.2.3 την υπολογίζει.

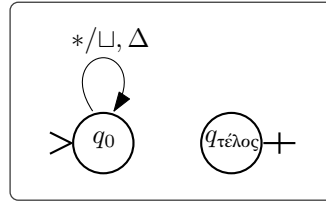
- 
1. **while**  $1 > 0$
  2.   **if**  $q_0 0$  **then**  $q_1 1 \Delta$
  3.   **elseif**  $q_0 1$  **then**  $q_1 1 \Delta$
  4.   **elseif**  $q_0 \sqcup$  **then**  $q_1 1 \Delta$
  5.   **elseif**  $q_1 0$  **then**  $q_1 \sqcup \Delta$
  6.   **elseif**  $q_1 1$  **then**  $q_1 \sqcup \Delta$
  7.   **elseif**  $q_1 \sqcup$  **then**  $q_2 \sqcup A$
  8.   **elseif**  $q_2 \sqcup$  **then**  $q_2 \sqcup A$
  9.   **elseif**  $q_2 1$  **then**  $q_2 1 A$
  10.   **else**  $q_2 \triangleright$  **then**  $q_{\text{τελος}} \triangleright \Delta$  ; **break**

Η επανάληψη θα τελειώσει μόνο αν φτάσουμε στο **break** στο βήμα 10.

<sup>1</sup> Το μόνο ενδεχομένως που δεν είναι ξεκάθαρο στο διάγραμμα καταστάσεων είναι το αλφάβητο εισόδου της ΤΜ (και το αν υπάρχουν σύμβολα στο αλφάβητο ταινίας που δεν χρησιμοποιούνται). Στην επόμενη παράγραφο θα δούμε ότι (χωρίς βλάβη της γενικότητας) μπορούμε να θεωρήσουμε πως όλες οι ΤΜ έχουν ως αλφάβητο εισόδου το  $\{0, 1\}$ .



**Σχήμα 1.2.2:** Η TM που υπολογίζει τη συνάρτηση του Παραδείγματος 1.2.5 (το σύμβολο \* παίρνει όλες τις τιμές του  $\Sigma \setminus \{\triangleright\}$ ). Παρατηρήστε ότι η TM «κολλάει» στην κατάσταση  $q_3$ .



**Σχήμα 1.2.3:** Το διάγραμμα καταστάσεων της TM του Παραδείγματος 1.2.21 (το σύμβολο \* παίρνει όλες τις τιμές του  $\Sigma \setminus \{\triangleright\}$ ).

**Σύμβαση 1.2.7.** Για να απλοποιήσουμε τη σχεδίαση των TM θα «χαλαρώσουμε» την απαίτηση να γυρίζουν την κεφαλή στην αρχή της ταινίας πριν τερματίσουν<sup>1</sup>.

**Παράδειγμα 1.2.8.** Έστω  $\text{next} : \{0, 1\}^* \rightarrow \{0, 1\}^*$  με:

$$\text{next}(x) = \text{«Η επόμενη λέξη της } x \text{ στη λεξικογραφική διάταξη του } \{0, 1\}^* \text{»}^2$$

Η TM  $M_{\text{next}}$  του Σχήματος 1.2.4 την υπολογίζει.

**Παράδειγμα 1.2.9.** Έστω  $\text{space} : \{0, 1, \_ \}^* \rightarrow \{0, 1, \_ \}^*$  με:

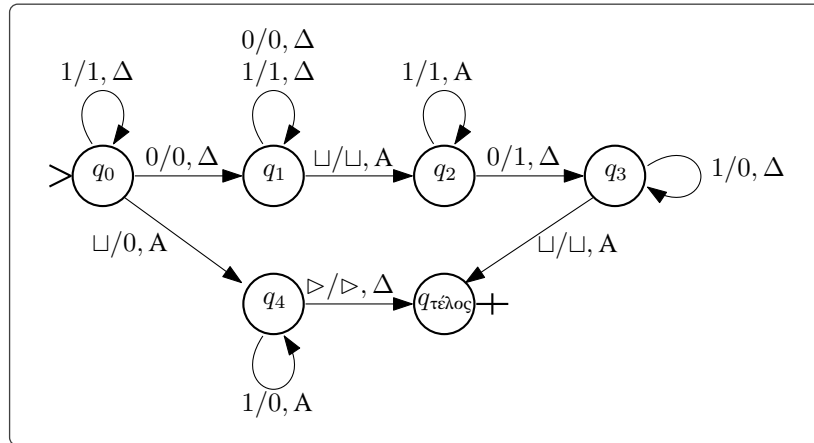
$$\text{space}(x) = \begin{cases} \_x & , \text{ αν } x \in \{0, 1\}^* \\ \perp & , \text{ αλλιώς} \end{cases}$$

Η TM  $M_{\text{space}}$  του Σχήματος 1.2.5 την υπολογίζει<sup>3</sup>.

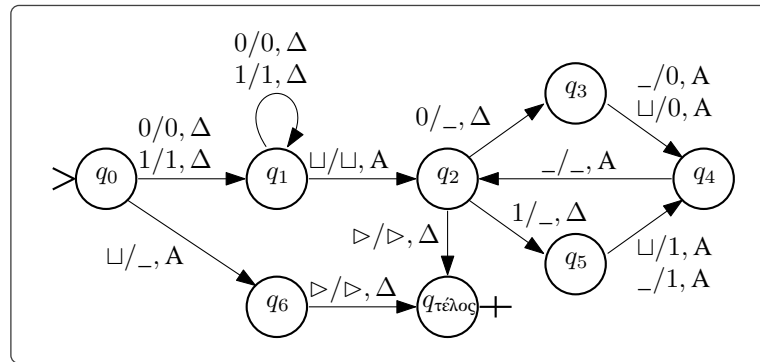
<sup>1</sup> Ούτως ή άλλως, αυτό το κομμάτι του υπολογισμού το φέρει εις πέρας η ίδια πάντα «υπορουτίνα» (με ενδεχομένως πολύ μικρές διαφοροποιήσεις).

<sup>2</sup> Η  $\text{next}$ , αν λάβουμε υπόψιν ότι πολλές λέξεις του  $\{0, 1\}^*$  δεν αντιστοιχούν σε δυαδική αναπαράσταση φυσικών αριθμών και θα πρέπει να παραβλεφθούν, μπορεί να τροποποιηθεί στη συνάρτηση του επομένου  $s(x) = x + 1$  στο δυαδικό σύστημα (Άσκηση 1.1).

<sup>3</sup> Εδώ αγνοφάνεται ίσως ο τρόπος που μπορούμε να εξομοιώσουμε σε μία TM τον έλεγχο υποθέσεων (if-then-else) προσθέτοντας επιπλέον καταστάσεις.



**Σχήμα 1.2.4:** Η TM που υπολογίζει την επόμενη λέξη στην λεξικογραφική διάταξη του  $\{0,1\}^*$ .



**Σχήμα 1.2.5:** Η TM  $M_{\text{space}}$  του Παραδείγματος 1.2.9.

**Παράδειγμα 1.2.10.** Έστω  $f : \{0, 1, _\}^* \rightarrow \{0, 1, _\}^*$  με:

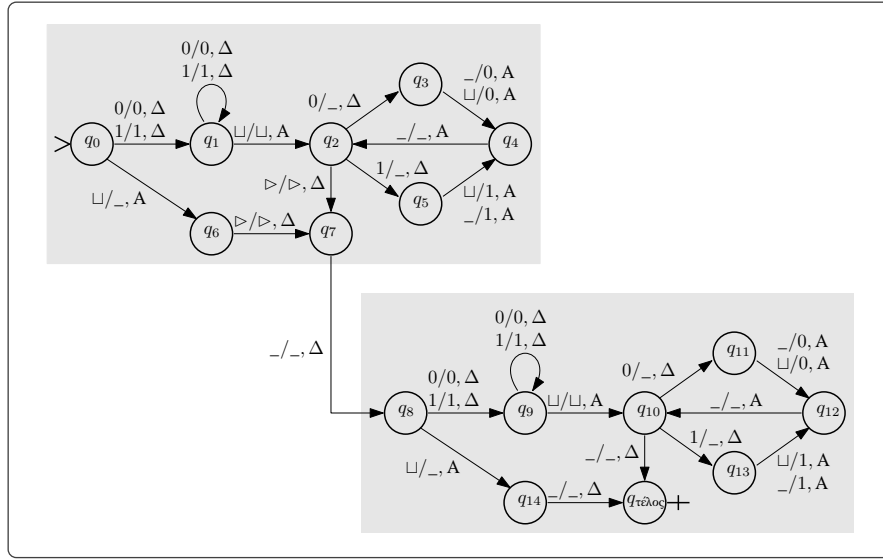
$$f(x) = \begin{cases} \_ \_ x & , \text{ αν } x \in \{0, 1\}^* \\ \perp & , \text{ αλλιώς} \end{cases}$$

Η TM του Σχήματος 1.2.6 την υπολογίζει (χρησιμοποιώντας την  $M_{\text{space}}$  σαν «υπορουτίνα»<sup>1</sup>).

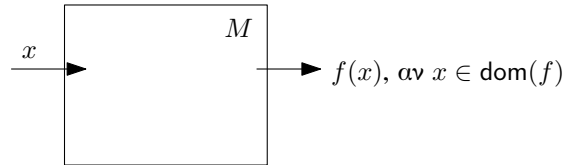
**Συμβολισμός 1.2.11 (Κουτάκια).** Για διευκόλυνση της παρουσίασης θα χρησιμοποιούμε «κουτάκια» για να περιγράψουμε τις υπορουτίνες των TM:

1. Αν η  $f : \Sigma^* \rightarrow \Sigma^*$  είναι υπολογίσιμη συνάρτηση και  $M$  είναι μία TM που την υπολογίζει θα γράφουμε:

<sup>1</sup> Δηλαδή κατασκευάζουμε μία TM της οποίας η συνάρτηση μετάβασης χρησιμοποιεί τις μεταβάσεις της  $M_{\text{space}}$  (κατάλληλα τροποποιημένες) μαζί με κάποιες επιπλέον μεταβάσεις.



Σχήμα 1.2.6: Η TM που υπολογίζει τη συνάρτηση του Παραδείγματος 1.2.10.



και θα λέμε ότι η  $M(x)$  επιστρέφει  $f(x)$ .

Ο συμβολισμός με τα κουτάκια μας επιτρέπει να απλοποιήσουμε δραστηρικά την παρουσίαση των TM. Από εδώ και στο εξής θα χρησιμοποιούμε απλές υπορουτίνες σαν «κουτάκια», χωρίς να παρουσιάζουμε τις λεπτομέρειες σχεδιασμού τους<sup>1</sup>. Προκειμένου να γίνει πιο κατανητός ο συμβολισμός θα τον χρησιμοποιήσουμε για να αποδείξουμε μία πρόταση.

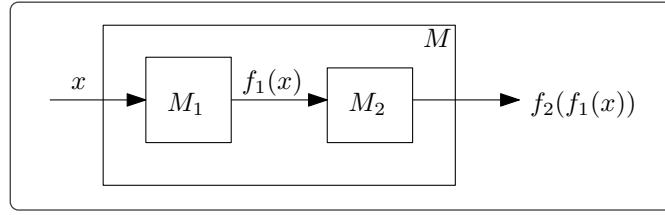
**Πρόταση 1.2.12.** Έστω  $f_1, f_2 : \Sigma^* \rightarrow \Sigma^*$  υπολογίσιμες συναρτήσεις. Η συνάρτηση  $f_2 \circ f_1$  είναι επίσης υπολογίσιμη.

*Απόδειξη.* Έστω  $M_1$  και  $M_2$  οι TM που υπολογίζουν τις  $f_1$  και  $f_2$  αντίστοιχα. Παρατηρούμε ότι για την TM  $M$  του Σχήματος 1.2.7 ισχύει ότι:

- αν  $f_2(f_1(x)) \in \Sigma^*$  η  $M(x)$  την επιστρέφει,
- αν  $f_1(x) = \perp$  ή  $f_2(f_1(x)) = \perp$  η  $M(x)$  δεν τερματίζει.

Συνεπώς η  $M$  υπολογίζει την  $f_2 \circ f_1$ . □

<sup>1</sup> Ο λόγος που απαιτήσαμε οι TM να γυρίζουν την κεφαλή στην αρχή της ταινίας προτού τερματίσουν είναι για να γίνεται σωστά η «σύνδεση» των υπορουτινών.



**Σχήμα 1.2.7:** Η ΤΜ που υπολογίζει τη συνάρτηση  $f_2 \circ f_1$ .

**Ορισμός 1.2.13.** Έστω ΤΜ  $M$ . Με  $\phi_M$  θα συμβολίζουμε τη συνάρτηση που υπολογίζει.

Όπως είναι εμφανές κάθε ΤΜ υπολογίζει και κάποια συνάρτηση. Αυτή η αντιστοίχιση όμως δεν είναι 1-1 καθώς υπάρχουν πολλές ΤΜ που υπολογίζουν την ίδια συνάρτηση<sup>1</sup>. Επομένως έχει νόημα ο παρακάτω ορισμός.

**Ορισμός 1.2.14.** Δύο ΤΜ  $M_1$  και  $M_2$  είναι *ισοδύναμες* αν  $\phi_{M_1} = \phi_{M_2}$ .

Θα μπορούσαμε να πούμε ότι ο παραπάνω ορισμός στην ουσία μας δίνει μία ισοδυναμία μεταξύ αλγορίθμων, όταν η οπτική μας δεν είναι αρκετά ευαίσθητη ώστε να διακρίνει ποιος από τους δύο αλγορίθμους είναι πιο «αποδοτικός». Μπορούμε να διακρίνουμε μόνο ότι οι δύο αλγόριθμοι υπολογίζουν την ίδια συνάρτηση.

**Σύμβαση 1.2.15.** Στην Παράγραφο 1.4 θα δούμε ότι μπορούμε να απαριθμήσουμε τις ΤΜ. Για να ελαφρύνουμε λίγο τον συμβολισμό, όταν έχουμε μία απαρίθμηση των ΤΜ θα αναφερόμαστε στη συνάρτηση που υπολογίζει η ΤΜ  $M_i$  γράφοντας  $\phi_i$  αντί για  $\phi_{M_i}$ , όπου  $i \in \mathbb{N}$  η σειρά της ΤΜ σύμφωνα με την απαρίθμηση.

## 1.2.2 Αναγνώριση ή απόφαση γλώσσων

Στη *θεωρητική πληροφορική* είναι πολύ σημαντικό να μπορούμε να ελέγχουμε αν μία είσοδος στον ηλεκτρονικό υπολογιστή αποτελεί *θετικό-στιγμιότυπο* ή *αρνητικό-στιγμιότυπο* για το πρόβλημα που εξετάζουμε. Πιο απλά, μας ενδιαφέρει να μπορούμε να απαντάμε με ένα «ναι» ή ένα «όχι» στα λεγόμενα *προβλήματα απόφασης*. Στη δική μας θεωρία τα προβλήματα απόφασης εισάγονται ως εξής: Οι είσοδοι είναι κωδικοποιημένες σε ένα αλφάβητο  $\Sigma$ , οπότε τα θετικά-στιγμιότυπα αποτελούν ένα υποσύνολο του  $\Sigma^*$ , δηλαδή μία γλώσσα<sup>2</sup>.

Σε αυτήν την παράγραφο θα δούμε πως οι ΤΜ μπορούν να χρησιμοποιηθούν ως αλγόριθμοι που ελέγχουν αν η είσοδος τους είναι θετικό ή αρνητικό στιγμιότυπο του προβλήματος. Μάλιστα θα δούμε ότι μία μηχανή μπορεί είτε απλά να «αναγνωρίζει» τα θετικά

<sup>1</sup> Για την ακρίβεια για κάθε συνάρτηση υπάρχουν άπειρες ΤΜ που την υπολογίζουν. Γιατί;

<sup>2</sup> Πάρτε για παράδειγμα το πρόβλημα του *Χρωματισμού Γραφήματος* όπου μας δίνουν ένα γράφημα  $G$  και έναν ακέραιο  $k$  και μας ρωτούν αν είναι δυνατόν να χρωματιστούν οι κορυφές του γραφήματος με  $k$  χρώματα έτσι ώστε τα άκρα των ακμών να έχουν διαφορετικό χρώμα. Η «τυπική» περιγραφή του προβλήματος είναι η εξής: Τα  $G, k$  είναι κωδικοποιημένα σε ένα αλφάβητο, ας πούμε το  $\{0, 1\}$ , και μας ενδιαφέρει να δούμε αν μια λέξη του  $\{0, 1\}^*$  ανήκει στη γλώσσα  $L = \{w \in \{0, 1\}^* \mid \text{Η } w \text{ είναι κωδικοποίηση γραφήματος } G \text{ και ακεραίου } k \text{ και το } G \text{ χρωματίζεται με } k \text{ χρώματα}\}$ . Αργότερα (στο Κεφάλαιο 8) θα δούμε ότι ανάλογα με την τυπική περιγραφή μίας γλώσσας (πιο συγκεκριμένα την εναλλαγή ποσοδεικτών σε αυτή) μπορούμε να την κατατάξουμε σε διαφορετική κατηγορία «δυσκολίας».

στιγμιότυπα ενός προβλήματος είτε να «αποφασίζει» αν ένα στιγμιότυπο είναι θετικό ή όχι. Παρόλο που η διαφορά μεταξύ των δύο μοιάζει λεπτή, το δεύτερο είναι πολύ πιο ισχυρό. Όταν έχουμε απλή αναγνώριση μίας γλώσσας η ΤΜ μας επιστρέφει θετική απάντηση για τα θετικά στιγμιότυπα αλλά δεν επιστρέφει αρνητική απάντηση για (τουλάχιστον ένα από) τα υπόλοιπα. Στην απόφαση, για κάθε στιγμιότυπο λαμβάνουμε την αντίστοιχη απάντηση.

**Παρατήρηση 1.2.16.** Κάθε αλφάβητο  $\Sigma$  μπορεί να κωδικοποιηθεί στο  $\{0, 1\}^*$ <sup>1</sup>. Επομένως, χωρίς βλάβη της γενικότητας, μπορούμε να θεωρήσουμε ότι όλες οι γλώσσες ανήκουν στο  $2^{\{0,1\}^*}$ .

Από εδώ και στο εξής θα εστιάσουμε στο αλφάβητο  $\{0, 1\}$  (αυτό όπως είδαμε δεν θα προκαλέσει βλάβη της γενικότητας).

**Ορισμός 1.2.17.** Έστω γλώσσα  $L \subseteq \{0, 1\}^*$  και  $\chi_L$  η χαρακτηριστική της συνάρτηση (δες Ορισμό 0.1.15). Η  $L$  είναι *αποφάνσιμη* αν υπάρχει ΤΜ  $M$  που υπολογίζει τη  $\chi_L$ .

**Παράδειγμα 1.2.18.** Η γλώσσα  $L = \{0, 1\}^*$  είναι αποφάνσιμη καθώς η ΤΜ του Σχήματος 1.2.1 υπολογίζει τη χαρακτηριστική της συνάρτηση (που ταυτίζεται με τη σταθερή συνάρτηση του Παραδείγματος 1.2.3).

Για να ελέγξουμε αν μία λέξη  $w$  ανήκει σε μία γλώσσα  $L$  (ή αντίστοιχα αν ένα στιγμιότυπο του προβλήματος είναι θετικό στιγμιότυπο) βασική προϋπόθεση είναι η ύπαρξη μιας ΤΜ, έστω  $M$ , που υπολογίζει τη χαρακτηριστική συνάρτηση της  $L$ . Έτσι, τρέχοντας την  $M$  με είσοδο τη  $w$  αν ο υπολογισμός επιστρέψει 1 έπεται ότι  $w \in L$  και αν επιστρέψει 0 ότι  $w \notin L$ . Όπως θα δούμε αργότερα (Κεφάλαιο 5) υπάρχουν γλώσσες για τις οποίες δεν μπορούμε να έχουμε και τα δύο κομμάτια πληροφορίας (και το «ναι» και το «όχι»). Για τον λόγο αυτό θα ορίσουμε άλλη μία κατηγορία γλωσσών τις *αναγνωρίσιμες* (ή *ημι-αποφάνσιμες*).

**Ορισμός 1.2.19.** Έστω ΤΜ  $M = (Q, \Sigma, \Gamma, \delta, q_0, q_{\text{τέλος}})$ . Η γλώσσα που *αναγνωρίζει* (ή *αποδέχεται*) η  $M$  είναι η:

$$L(M) = \{w \in \Sigma^* \mid q_0 w \vdash_M^* q_{\text{τέλος}} 1\}$$

ή αλλιώς (δες Ορισμό 1.2.13):

$$L(M) = \{w \in \Sigma^* \mid \phi_M(w) = 1\}$$

**Παρατήρηση 1.2.20.** Παρατηρήστε ότι στον Ορισμό 1.2.19 η  $M$  δεν υπολογίζει κατ' ανάγκη τη χαρακτηριστική συνάρτηση της γλώσσας  $L(M)$ .

**Παράδειγμα 1.2.21.** Έστω ΤΜ  $M = (Q, \Sigma, \Gamma, \delta, q_0, q_{\text{τέλος}})$  με  $Q = \{q_0, q_{\text{τέλος}}\}$ ,  $\Sigma = \{0, 1\}$ ,  $\Gamma = \{\triangleright, \sqcup, 0, 1\}$  και  $\delta$  με διάγραμμα καταστάσεων αυτό του Σχήματος 1.2.3. Παρατηρούμε ότι  $L(M) = \emptyset$ .

<sup>1</sup> Για παράδειγμα το  $\{A, B, C\}$  μπορούμε να το κωδικοποιήσουμε ως εξής:

$$\begin{aligned} A &\rightsquigarrow 01 \\ B &\rightsquigarrow 011 \\ C &\rightsquigarrow 0111 \end{aligned}$$

Άρα η λέξη  $ACAB$  θα κωδικοποιείται ως 01011101011. Θα αναφερθούμε πιο αναλυτικά στην κωδικοποίηση λέξεων στην Παράγραφο 1.4.

**Ορισμός 1.2.22.** Έστω  $L \subseteq \{0, 1\}^*$ . Η  $L$  είναι *αναγνωρίσιμη* (ή *ημι-αποφάνσιμη*) αν υπάρχει TM  $M$  τέτοια ώστε  $L = L(M)$ .

Παρατηρήστε ότι στον παραπάνω ορισμό ζητάμε κάτι πιο ασθενές από τον Ορισμό 1.2.17, καθώς δεν απαιτούμε από τη TM να επιστρέφει 0 για τις λέξεις που δεν ανήκουν στη γλώσσα (δεν απαιτούμε καν να έχουμε τερματισμό για αυτές τις εισόδους). Η ύπαρξη γλωσσών που είναι ημι-αποφάνσιμες και όχι αποφάνσιμες ενδεχομένως να μην γίνεται εύκολα πιστευτή. Για να μπορέσουμε να δείξουμε ότι αυτός ο ισχυρισμός είναι αληθής θα χρειαστεί να χρησιμοποιήσουμε ισχυρά «εργαλεία» της Θεωρίας Συνόλων (συγκεκριμένα τη μέθοδο της *Διαγωνιοποίησης* που εφαρμόσαμε στην απόδειξη του Θεωρήματος 0.1.17). Να τονίσουμε εδώ ότι ο λόγος που έχουμε απλή αναγνώριση δεν είναι ότι η TM επιστρέφει κάποια λέξη διαφορετική του 0 για τις εισόδους που δεν ανήκουν στη γλώσσα, και ως εκ τούτου δεν υπολογίζει ακριβώς τη χαρακτηριστική συνάρτηση<sup>1</sup>. Το πρόβλημα είναι ότι όποια TM και να σχεδιάσουμε, για κάποιες λέξεις που δεν ανήκουν στη γλώσσα η TM δεν θα τερματίζει, χωρίς να γνωρίζουμε για ποιές ακριβώς λέξεις θα σημβεί αυτό.

Συνήθως στη βιβλιογραφία αναφέρεται ένας διαφορετικός ορισμός των TM, όπου χρησιμοποιούνται δύο τερματικές καταστάσεις αντί για μία: η  $q_{\text{ναι}}$  και η  $q_{\text{όχι}}$ . Αυτό είναι ιδιαιτέρως χρήσιμο όταν θέλουμε να ελέγχουμε αν μία λέξη ανήκει σε μια γλώσσα ή όχι. Ας δούμε αυτόν τον εναλλακτικό ορισμό.

**Ορισμός 1.2.23.** Μηχανή Turing είναι μια επτάδα  $M = (Q, \Sigma, \Gamma, \delta, q_0, q_{\text{ναι}}, q_{\text{όχι}})$  όπου  $Q, \Sigma, \Gamma$  πεπερασμένα σύνολα, και:

1.  $q_0, q_{\text{ναι}}, q_{\text{όχι}} \in Q$ , με  $q_{\text{ναι}} \neq q_{\text{όχι}}$ , όπου  $q_{\text{ναι}}, q_{\text{όχι}}$  οι τερματικές καταστάσεις
2.  $\Sigma \subset \Gamma$
3.  $\triangleright, \sqcup \in \Gamma \setminus \Sigma$
4.  $\delta : Q \times \Gamma \rightarrow Q \times \Gamma \times \{A, \Delta\}$  τέτοια ώστε:
  - $\forall a \in \Gamma \forall q \in \{q_{\text{ναι}}, q_{\text{όχι}}\} (\delta(q, a) = \perp)$
  - $\forall q \in Q \setminus \{q_{\text{ναι}}, q_{\text{όχι}}\} \forall q' \in Q \forall a \in \Gamma (\delta(q, \triangleright) = (q', a, x) \rightarrow x = \Delta \wedge a = \triangleright)$

Ο υπολογισμός ορίζεται εντελώς αντίστοιχα με την TM του Ορισμού 1.1.1, πλέον όμως έχουμε δύο διαφορετικά είδη τερματισμού.

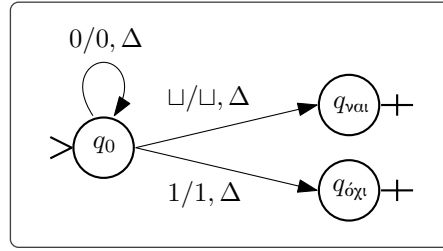
**Ορισμός 1.2.24.** Έστω TM  $M = (Q, \Sigma, \Gamma, \delta, q_0, q_{\text{ναι}}, q_{\text{όχι}})$  και  $w \in \Sigma^*$ . Ο υπολογισμός της  $M(w)$  τερματίζει αν υπάρχουν  $w_1, w_2 \in \Gamma^*$  τέτοια ώστε

$$\triangleright q_0 w \vdash_M^* w_1 q w_2$$

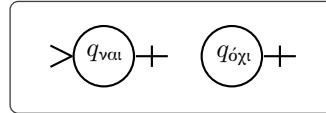
όπου  $q \in \{q_{\text{ναι}}, q_{\text{όχι}}\}$ .

- Αν  $q = q_{\text{ναι}}$  (δηλαδή  $M(w) \downarrow_{q_{\text{ναι}}}$ ) λέμε ότι η  $M$  *αποδέχεται* την  $w$ .

<sup>1</sup> Σε αυτήν την περίπτωση θα μπορούσαμε να σχεδιάσουμε άλλη TM που όντως θα επέστρεφε 0 όποτε η αρχική TM επέστρεφε λέξη διαφορετική από την 1.



**Σχήμα 1.2.8:** Το διάγραμμα καταστάσεων της TM του Παραδείγματος 1.2.26.



**Σχήμα 1.2.9:** Το διάγραμμα καταστάσεων της TM του Παραδείγματος 1.2.27.

- Αν  $q = q_{όχι}$  (δηλαδή  $M(w) \downarrow_{q_{όχι}}$ ) λέμε ότι η  $M$  απορρίπτει την  $w$ .

Χρησιμοποιώντας την παραπάνω «παραλλαγή» των TM μπορούμε να παρακάμψουμε κατά τον υπολογισμό το κομμάτι που προετοιμάζει την «έξοδο» (το 1 ή το 0 ανάλογα με το αν η λέξη ανήκει ή όχι στη γλώσσα) και απλά να μεταβούμε στην κατάλληλη τερματική κατάσταση. Καθώς αυτό διευκολύνει πολύ την παρουσίαση, θα χρησιμοποιήσουμε τον Ορισμό 1.2.23 σε αυτήν την παράγραφο (και σε όποιο άλλο κομμάτι των σημειώσεων ενδιαφερόμαστε για την *αποφανσιμότητα* μίας γλώσσας). Για λόγους πληρότητας θα χρειαστεί να επαναλάβουμε κάποιους από τους ορισμούς που μόλις δώσαμε.

**Ορισμός 1.2.25.** Έστω TM  $M = (Q, \Sigma, \Gamma, \delta, q_0, q_{ναι}, q_{όχι})$ . Η γλώσσα που αναγνωρίζει (ή αποδέχεται) η  $M$  είναι η:

$$L(M) = \{w \in \Sigma^* \mid M(w) \downarrow_{q_{ναι}}\}$$

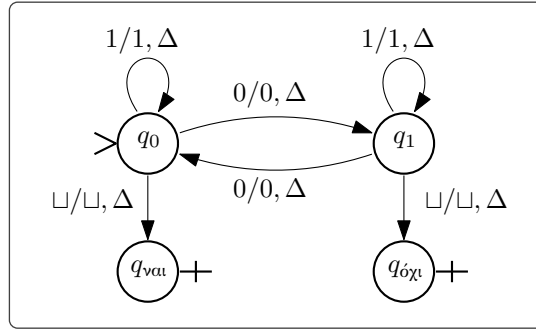
**Παράδειγμα 1.2.26.** Έστω TM  $M = (Q, \Sigma, \Gamma, \delta, q_0, q_{ναι}, q_{όχι})$  με  $Q = \{q_0, q_{ναι}, q_{όχι}\}$ ,  $\Sigma = \{0, 1\}$ ,  $\Gamma = \{\triangleright, \sqcup, 0, 1\}$  και  $\delta$  με διάγραμμα καταστάσεων αυτό του Σχήματος 1.2.8. Παρατηρούμε ότι:

$$L(M) = \{w \in \{0, 1\}^* \mid w = 0^n, n \in \mathbb{N}\}$$

**Παράδειγμα 1.2.27.** Έστω TM  $M = (Q, \Sigma, \Gamma, \delta, q_{ναι}, q_{ναι}, q_{όχι})$  με  $Q = \{q_{ναι}, q_{όχι}\}$ ,  $\Sigma = \{0, 1\}$ ,  $\Gamma = \{\triangleright, \sqcup, 0, 1\}$  και  $\delta$  με διάγραμμα καταστάσεων αυτό του Σχήματος 1.2.9. Παρατηρούμε ότι  $L(M) = \{0, 1\}^*$ .

Δείτε πόσο πιο απλή περιγραφή έχει η TM του Παραδείγματος 1.2.27 σε σχέση με αυτήν του Παραδείγματος 1.2.18.

**Ορισμός 1.2.28.** Έστω  $L \subseteq \Sigma^*$ . Η  $L$  είναι αναγνωρίσιμη (ή ημι-αποφάνσιμη) αν υπάρχει TM  $M = (Q, \Sigma, \Gamma, \delta, q_0, q_{ναι}, q_{όχι})$  τέτοια ώστε:



**Σχήμα 1.2.10:** Η ΤΜ του Παραδείγματος 1.2.31.

$$(A) \quad w \in L \Leftrightarrow M(w) \downarrow_{q_{\nu\alpha\iota}}$$

**Ορισμός 1.2.29.** Έστω  $L \subseteq \Sigma^*$ . Η  $L$  είναι αποφάνσιμη αν υπάρχει ΤΜ  $M = (Q, \Sigma, \Gamma, \delta, q_0, q_{\nu\alpha\iota}, q_{\acute{o}\chi\iota})$  τέτοια ώστε:

$$(A) \quad w \in L \Leftrightarrow M(w) \downarrow_{q_{\nu\alpha\iota}}$$

$$(B) \quad w \notin L \Leftrightarrow M(w) \downarrow_{q_{\acute{o}\chi\iota}}$$

**Παρατήρηση 1.2.30.** Στον Ορισμό 1.2.29 έχουμε πάντα τερματισμό της ΤΜ ενώ στον Ορισμό 1.2.28 όχι απαραίτητα (αν  $w \notin L$ ).

**Παράδειγμα 1.2.31.** Έστω  $L = \{w \in \{0, 1\}^* \mid \text{το πλήθος των } 0 \text{ στην } w \text{ είναι άρτιο}\}$ . Η  $L$  είναι αποφάνσιμη καθώς για την ΤΜ του Σχήματος 1.2.10 για κάθε  $w \in \{0, 1\}^*$  ισχύει ότι:

$$(A) \quad \text{Το πλήθος των } 0 \text{ στην } w \text{ είναι άρτιο αν } M(w) \downarrow_{q_{\nu\alpha\iota}}.$$

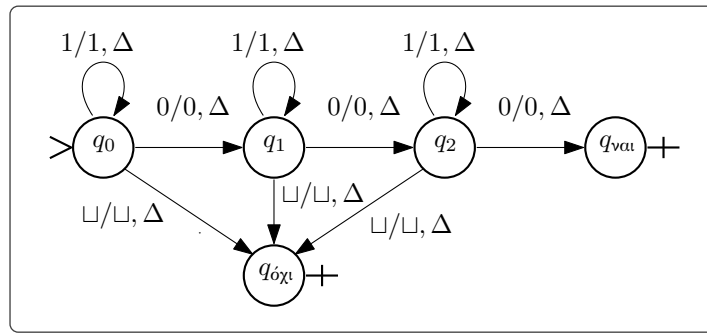
$$(B) \quad \text{Το πλήθος των } 0 \text{ στην } w \text{ είναι περιττό αν } M(w) \downarrow_{q_{\acute{o}\chi\iota}}.$$

**Παράδειγμα 1.2.32.** Έστω  $L = \{w \in \{0, 1\}^* \mid \text{το πλήθος των } 0 \text{ στην } w \text{ είναι } \geq 3\}$ . Η  $L$  είναι αποφάνσιμη από την ΤΜ του Σχήματος 1.2.11.

Να τονίσουμε εδώ ότι αν για παράδειγμα το πλήθος των μηδενικών ήταν κομμάτι της εισόδου, δηλαδή είχαμε σαν είσοδο μία λέξη και έναν αριθμό (κωδικοποιημένα με κάποιον τρόπο σε μία λέξη του  $\{0, 1\}$ ) δεν θα μπορούσαμε να χρησιμοποιήσουμε καταστάσεις για να «μετρήσουμε» τα μηδενικά. Εκεί θα έπρεπε να χρησιμοποιήσουμε έναν μετρητή<sup>1</sup>.

**Παράδειγμα 1.2.33.** Η  $L_{\text{Παλίνδρομο}}$  (Παράδειγμα 0.2.18) είναι αποφάνσιμη από την ΤΜ με  $Q = \{q_0, q_1, q_2, q_3, q_4, q_5, q_{\nu\alpha\iota}, q_{\acute{o}\chi\iota}\}$ ,  $\Sigma = \{0, 1\}$ ,  $\Gamma = \{\triangleright, \sqcup, 0, 1, \times\}$  και  $\delta$  με διάγραμμα καταστάσεων αυτό του Σχήματος 1.2.12.

<sup>1</sup> Θα δούμε παραδείγματα στη συνέχεια (όπως στην απόδειξη της Πρότασης 1.2.37), προσπαθήστε όμως να σκεφτείτε πως θα μπορούσαμε να το πετύχουμε αυτό.



Σχήμα 1.2.II: Η TM του Παραδείγματος 1.2.32.

**Παρατήρηση 1.2.34.** Αν στη TM του Σχήματος 1.2.12 είχαμε παραλείψει κάποια από τις μεταβάσεις στην κατάσταση  $q_{\text{όχι}}$  τότε αυτή η μηχανή δεν θα αποφάσιζε την  $L_{\text{Παλίνδρομο}}$ , αλλά μόνο θα την αναγνώριζε.

**Ορισμός 1.2.35.** Ορίζουμε τις ακόλουθες κλάσεις <sup>1</sup> γλωσσών:

- $RE = \{L \subseteq \{0, 1\}^* \mid \text{υπάρχει TM που ημι-αποφασίζει την } L\}$
- $REC = \{L \subseteq \{0, 1\}^* \mid \text{υπάρχει TM που αποφασίζει την } L\}$

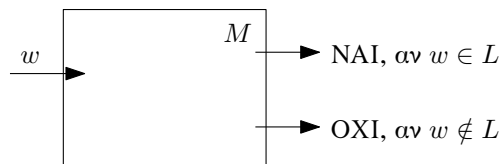
Προφανώς ισχύει ότι  $REC \subseteq RE \subseteq 2^{\{0,1\}^*}$  (Σχήμα 1.2.13). Ένας από τους βασικούς σκοπούς μας είναι να ερευνήσουμε κατά πόσον αυτοί οι εγκλεισμοί είναι αυστηροί, δηλαδή να απαντήσουμε στα ερωτήματα:

**Ερώτημα 1:**  $\exists L \in RE \setminus REC$ ;

**Ερώτημα 2:**  $\exists L \in 2^{\{0,1\}^*} \setminus RE$ ;

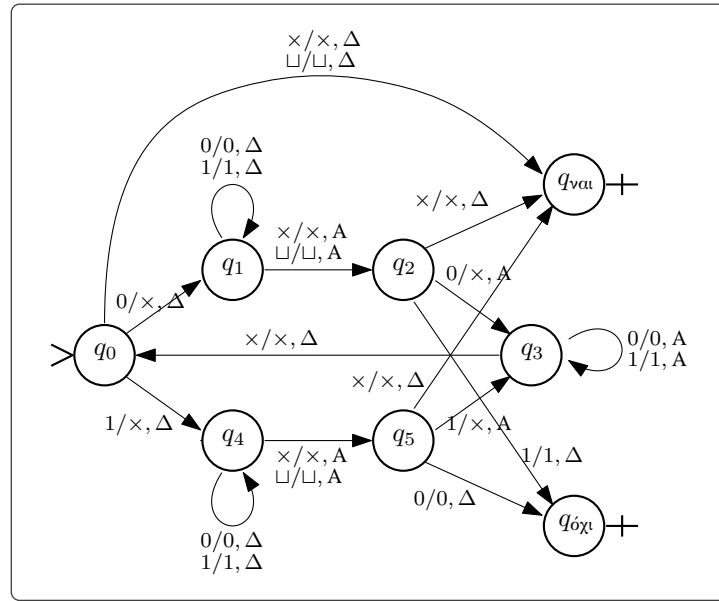
**Συμβολισμός 1.2.36** (Κουτάκια, συνέχεια...).

2. Αν  $L \in REC$  και  $M$  είναι μία TM που αποφασίζει την  $L$  θα γράφουμε:

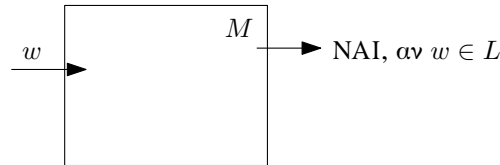


3. Αν  $L \in RE$  και  $M$  είναι μία TM που ημι-αποφασίζει την  $L$  θα γράφουμε:

<sup>1</sup> Είδισται στη Θεωρία Συνόλων τα σύνολα με στοιχεία σύνολα που έχουν κάποια κοινή ιδιότητα να τα αποκαλούμε κλάσεις. Έτσι και εδώ τα σύνολα γλωσσών θα τα αποκαλούμε κλάσεις γλωσσών.



Σχήμα 1.2.12: Η ΤΜ του Παραδείγματος 1.2.33.



Όσο εξοικειωνόμαστε με τις δυνατότητες των ΤΜ θα μπορούμε να χρησιμοποιούμε τον συμβολισμό με τα κουτάκια με μεγαλύτερη ελευθερία.

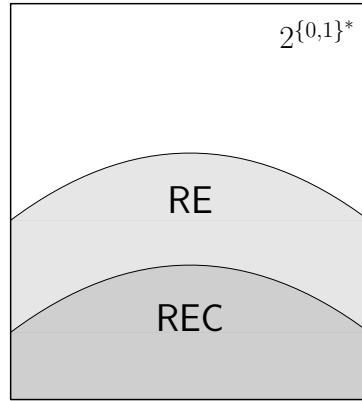
### Παραδείγματα σύνδετων ΤΜ

Θα δούμε μερικά παραδείγματα του τρόπου που θα σχεδιάζουμε ΤΜ χρησιμοποιώντας υπορουτίνες-κουτάκια.

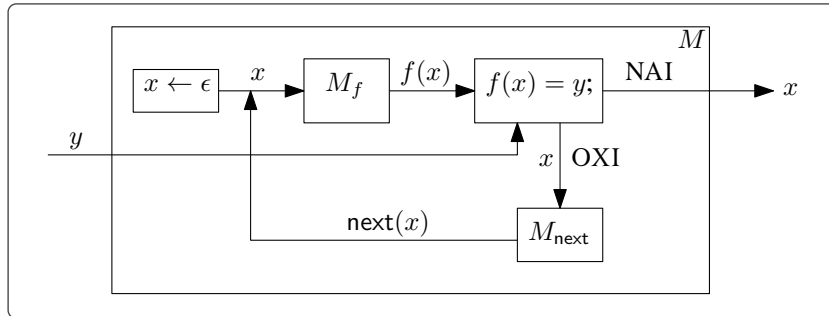
**Πρόταση 1.2.37.** Έστω  $f : \{0, 1\}^* \rightarrow \{0, 1\}^*$  πλήρης, 1-1 και επί, υπολογίσιμη συνάρτηση. Η συνάρτηση  $f^{-1}$  είναι επίσης υπολογίσιμη.

**Απόδειξη.** Έστω  $M_f$  η ΤΜ που υπολογίζει την  $f$ . Θα κατασκευάσουμε μία ΤΜ που χρησιμοποιεί σαν υπορουτίνες τις  $M_f$  και  $M_{\text{next}}$  (δες Παράδειγμα 1.2.8), καθώς και μία ΤΜ που αρχικοποιεί έναν μετρητή  $y$  στην τιμή  $\epsilon$  (και επιστρέφει αυτήν την τιμή)<sup>1</sup> και μία ΤΜ που

<sup>1</sup> Μπορούμε να χρησιμοποιήσουμε μετρητές κατά τον υπολογισμό μίας ΤΜ αποθηκεύοντας την τιμή τους σε συγκεκριμένα μέρη της ταινίας (για παράδειγμα τα πρώτα κελιά της) που θα χωρίζονται μεταξύ τους με κάποιο ειδικό σύμβολο (για παράδειγμα το #). Όποτε χρειαζόμαστε παραπάνω χώρο για κάποιο μετρητή μπορούμε να χρησιμοποιούμε κάποια παραλλαγή της  $M_{\text{space}}$  (δες Παράδειγμα 1.2.9) για να τον δημιουργήσουμε.



**Σχήμα 1.2.13:** Η σχέση εγκλεισμού μεταξύ REC και RE. Στο Κεφάλαιο 5 θα δούμε ότι ο εγκλεισμός αυτός είναι γνήσιος (δηλαδή ότι  $REC \neq RE$ ).



**Σχήμα 1.2.14:** Η ΤΜ που υπολογίζει τη συνάρτηση  $f^{-1}$ .

ελέγχει αν δύο λέξεις ταυτίζονται <sup>1</sup>. Η μηχανή αυτή φαίνεται στο Σχήμα 1.2.14. □

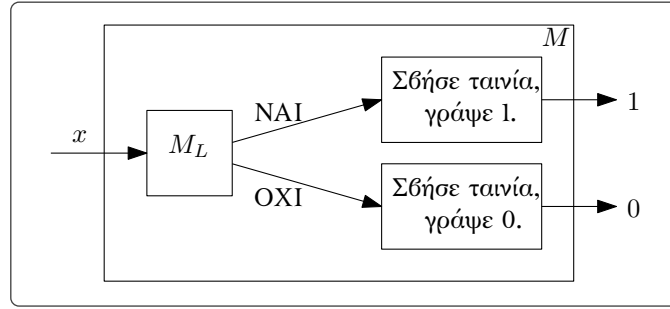
**Παρατήρηση 1.2.38.** Η Πρόταση 1.2.37 ισχύει ακόμα και αν η  $f$  δεν είναι πλήρης συνάρτηση (Άσκηση 1.12).

Για λόγους πληρότητας θα πρέπει να δείξουμε ότι οι δύο ορισμοί των ΤΜ που είδαμε είναι *ισοδύναμοι*. Όσον αφορά τον υπολογισμό συναρτήσεων η ύπαρξη μίας επιπλέον τερματικής κατάστασης δεν αλλοιώνει καθόλου τον υπολογισμό (επιλέγουμε μία από αυτές σαν τερματική κατάσταση και σχεδιάζουμε ΤΜ που δεν μπορούν να μεταβούν ποτέ στην άλλη). Για την αποφανσιμότητα γλωσσών η ισοδυναμία προκύπτει από τις ακόλουθες προτάσεις.

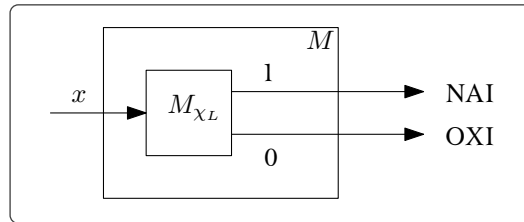
**Πρόταση 1.2.39.** Έστω  $L \subseteq \{0, 1\}^*$ . Ισχύει ότι  $L \in REC$  αν η χαρακτηριστική συνάρτηση  $\chi_L$  της  $L$  είναι υπολογίσιμη.

**Απόδειξη.** ( $\Rightarrow$ ) Έστω ότι  $L \in REC$  και έστω  $M_L$  μία ΤΜ που την αποφασίζει. Η ΤΜ του Σχήματος 1.2.15 υπολογίζει την  $\chi_L$ .

<sup>1</sup> Οι λέξεις αυτές, όπως και πριν, είναι αποθηκευμένες σε ξεχωριστά κομμάτι της ταινίας. Η ΤΜ κινεί την κεφαλή, τότε στη μία λέξη και πότε στην άλλη, και ελέγχει αν οι λέξεις περιέχουν τα ίδια σύμβολα στις ίδιες θέσεις.



**Σχήμα 1.2.15:** Η TM που υπολογίζει τη συνάρτηση  $\chi_L$  όταν  $L \in \text{REC}$ .



**Σχήμα 1.2.16:** Η TM που αποφασίζει την  $L$  όταν η  $\chi_L$  είναι υπολογίσιμη.

( $\Leftarrow$ ) Έστω ότι η TM  $M_{\chi_L}$  υπολογίζει την  $\chi_L$ . Η TM  $M$  του Σχήματος 1.2.16 αποφασίζει την  $L$ .  $\square$

**Πρόταση 1.2.40.** Έστω  $L \subseteq \{0,1\}^*$ . Ισχύει ότι  $L \in \text{RE}$  αν η συνάρτηση  $f : \{0,1\}^* \rightarrow \{0,1\}^*$  με  $f(x) = \begin{cases} 1 & , \text{αν } x \in L \\ \perp & , \text{αλλιώς} \end{cases}$  είναι υπολογίσιμη.

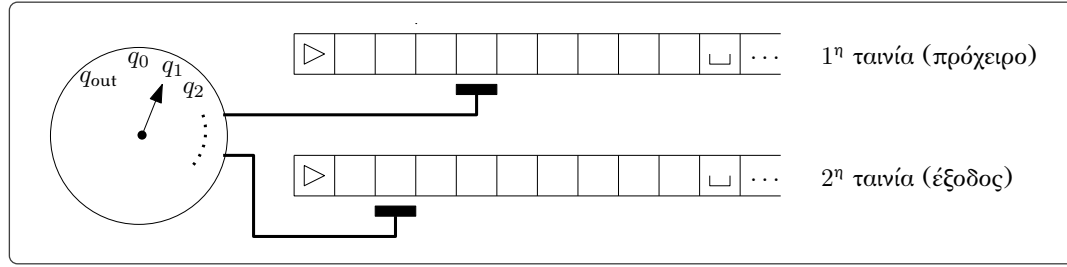
Η απόδειξη της Πρότασης 1.2.40 αφήνεται ως άσκηση.

### 1.2.3 Απαρίθμηση γλωσσών

Στο Κεφάλαιο 4 θα δούμε πως μπορούμε να «παράγουμε» τις λέξεις μιας γλώσσας από ένα πεπερασμένο σύνολο κανόνων (κάτι αντίστοιχο με την παραγωγή λέξεων σε μία φυσική γλώσσα, η οποία βασίζεται σε κάποιους γραμματικούς κανόνες). Η παραγωγή μιας γλώσσας (ή η απαρίθμηση όπως την αποκαλούμε σε αυτήν την παράγραφο), παρουσιάζει μεγάλο ενδιαφέρον, όχι μόνο γιατί αποτελεί έναν πεπερασμένο και αυστηρό τρόπο να περιγραφεί ένα ενδεχομένως άπειρο σύνολο <sup>1</sup>, αλλά γιατί στην ουσία μας περιγράφει τη διαδικασία που πρέπει να ακολουθήσουμε για να κατασκευάσουμε τις λέξεις της γλώσσας (στην πραγματικότητα αποτελεί έναν αναδρομικό ορισμό της γλώσσας). Μάλιστα από αυτήν πηγάζουν τα ονόματα-ακρωνύμια των κλάσεων γλωσσών που ορίσαμε πριν <sup>2</sup>.

<sup>1</sup> Ειδικά αν φέρουμε στο μυαλό ότι αυτό το σύνολο περιέχει τα θετικά-στιμιότυπα ενός προβλήματος απόφασης.

<sup>2</sup> Το RE αντιστοιχεί στο Recursive Enumerable και το REC στο Recursive.



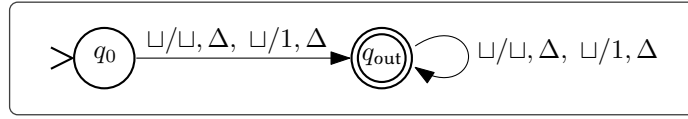
Σχήμα 1.2.17: Σχηματική αναπαράσταση ενός απαριθμητή.

Θα εισάγουμε ακόμα μία παραλλαγή του ορισμού της TM που θα έχει ως σκοπό να «τυπώσει» όλες τις λέξεις μιας γλώσσας <sup>1</sup>. Αυτή η TM θα αποτελείται από δύο ταινίες, η πρώτη θα χρησιμοποιείται ως «πρόχειρο» για τη λειτουργία της, ενώ στη δεύτερη θα γράφεται η εκάστοτε λέξη που θα τυπώνει η μηχανή. Φυσικά κάθε ταινία θα συνοδεύεται και από μία (αποκλειστικά δικιά της) κεφαλή (δες Σχήμα 1.2.17). Η ύπαρξη των δύο ταινιών (και κεφαλών) αποτυπώνεται στη συνάρτηση μετάβασης, η οποία δέχεται ως όρισμα μία κατάσταση και τα σύμβολα που διαβάζουν οι δύο κεφαλές και επιστρέφει την καινούργια κατάσταση και τα καινούργια σύμβολα που πρέπει να γραφτούν στις δύο ταινίες. Έπειτα οι κεφαλές κινούνται, ανεξάρτητα η μία από την άλλη.

**Ορισμός 1.2.41.** Απαριθμητής είναι μια εξάδα  $E = (Q, \Sigma, \Gamma, \delta, q_0, q_{out})$  όπου  $Q, \Sigma, \Gamma$  πεπερασμένα σύνολα, και:

1.  $Q$  είναι το σύνολο των καταστάσεων
2.  $q_0, q_{out} \in Q$ ,  $q_0$  είναι η αρχική κατάσταση και  $q_{out}$  είναι η κατάσταση εξόδου
3. Το  $Q$  δεν έχει τερματικές καταστάσεις
4.  $\Sigma$  είναι το αλφάβητο εξόδου
5.  $\Gamma$  είναι το αλφάβητο ταινίας
6.  $\Sigma \subset \Gamma$
7.  $\triangleright, \sqcup \in \Gamma \setminus \Sigma$ ,
8.  $\delta : Q \times \Gamma \times \Sigma \cup \{\triangleright, \sqcup\} \rightarrow Q \times \Gamma \times \Sigma \cup \{\triangleright, \sqcup\} \times \{A, \Delta\} \times \{A, \Delta\}$  είναι η συνάρτηση μετάβασης για την οποία ισχύει ότι:
  - $\forall i \in [2] \forall q \in Q \forall q' \in Q \forall a_1, a_2, b_1, b_2 \in \Gamma \forall x_1, x_2 \in \{A, \Delta\}$   
 $(\delta(q, a_1, a_2) = (q', b_1, b_2, x_1, x_2) \wedge a_i = \triangleright \rightarrow x_i = \Delta \wedge b_i = \triangleright)$

<sup>1</sup> Προφανώς αν η γλώσσα είναι άπειρη η μηχανή θα πρέπει να δουλεύει για πάντα. Η έννοια του τερματισμού δεν υφίσταται σε αυτού του είδους τον υπολογισμό.



**Σχήμα 1.2.18:** Ο απαριθμητής της γλώσσας  $\{1^n \mid n \geq 1\}$ .

Όσον αφορά τον υπολογισμό του  $E$ , θεωρούμε ως στιγμιότυπα λειτουργίας λέξεις του αλφαβήτου  $(\Gamma \cup Q \cup \{\#\})^*$ , που απαρτίζονται από τα στιγμιότυπα για κάθε ταινία (πρόχειρο και έξοδο), με το σύμβολο  $\#$  ανάμεσά τους. Παρατηρήστε εδώ ότι η λέξη της δεύτερης ταινίας (η έξοδος) θα περιέχει μόνο σύμβολα από το αλφάβητο εξόδου  $\Sigma$ . Το αρχικό στιγμιότυπο είναι το  $\triangleright q_0 \# \triangleright q_0$ , δηλαδή και οι δύο ταινίες είναι κενές (οπότε ο  $E$  δεν δέχεται σαν είσοδο κάποια λέξη). Το επόμενο στιγμιότυπο λειτουργίας ενός στιγμιότυπου ορίζεται μέσω της  $\delta$  αντίστοιχα με τον Ορισμό 1.1.6, μόνο που εδώ το κάθε στιγμιότυπο λειτουργίας αποτελείται από δύο μέρη. Έτσι ο υπολογισμός του  $E$  είναι πάλι μία ακολουθία στιγμιότυπων λειτουργίας που προκύπτουν μέσω της  $\delta$ . Όπως αναφέραμε και πριν, η ακολουθία αυτή είναι πάντα άπειρη καθώς δεν υπάρχουν τερματικές καταστάσεις <sup>1</sup>.

Περιγραφικά ο  $E$  κάνει υπολογισμούς στο πρόχειρο (πρώτη ταινία) και όταν μεταβεί στην κατάσταση  $q_{out}$  λέμε ότι *τυπώνει* τη λέξη που βρίσκεται στην έξοδο (δεύτερη ταινία). Στην περίπτωση όπου ο  $E$  τυπώνει τη λέξη  $w \in \Sigma^*$  θα γράφουμε  $\text{print}_E(w)$  (ή σκέτο  $\text{print}(w)$  αν ο  $E$  εννοείται από τα συμφραζόμενα). Ο  $E$  δεν τερματίζει ποτέ (ακόμα και αν τυπώσει όλες τις λέξεις μιας πεπερασμένης γλώσσας).

**Ορισμός 1.2.42.** Έστω απαριθμητής  $E = (Q, \Sigma, \Gamma, \delta, q_0, q_{out})$ . Η γλώσσα που *απαριθμεί* ο  $E$  είναι η:

$$L(E) = \{w \in \Sigma^* \mid \exists w' \in \Gamma^* (\triangleright q_0 \# \triangleright q_0 \vdash_E^* q_{out} w' \# \triangleright q_{out} w)\}^2$$

ή αλλιώς:

$$L(E) = \{w \in \Sigma^* \mid \text{print}_E(w)\}$$

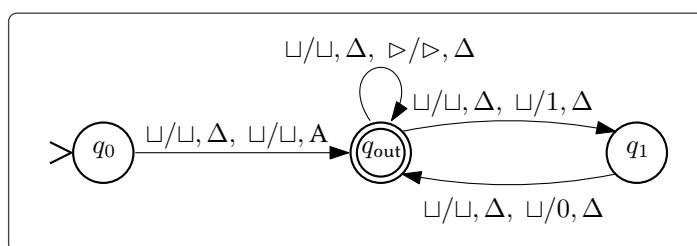
Για να παρουσιάσουμε έναν απαριθμητή πάλι χρησιμοποιούμε διαγράμματα καταστάσεων. Το πως θα φανεί μέσα από τα παραδείγματα που ακολουθούν.

**Παράδειγμα 1.2.43.** Ο απαριθμητής  $E$  του Σχήματος 1.2.18 απαριθμεί τη γλώσσα  $L(E) = \{1^n \mid n \geq 1\}$ .

**Παράδειγμα 1.2.44.** Ο απαριθμητής  $E$  του Σχήματος 1.2.19 απαριθμεί τη γλώσσα  $L(E) = \{(10)^n \mid n \in \mathbb{N}\}$  (παρατηρήστε ότι τυπώνει δύο φορές την κενή λέξη).

<sup>1</sup> Θεωρούμε ότι δεν μπορεί να προκύψει κόλλημα της πρώτης – μη ουσιαστικής – μορφής (δες υποσημείωση στη Σελίδα 18).

<sup>2</sup> Και εδώ η σύμβαση ότι πριν μεταβεί ο  $E$  στην  $q_{out}$  θα πρέπει να έχει γυρίσει τις κεφαλές στην αρχή των δύο ταινιών δεν είναι ουσιαστική.

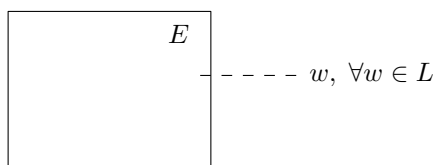


Σχήμα 1.2.19: Ο απαριθμητής της γλώσσας  $\{10^n \mid n \in \mathbb{N}\}$ .

**Ορισμός 1.2.45.** Μία γλώσσα  $L \subseteq \Sigma^*$  καλείται *αναδρομικά απαριθμήσιμη* αν υπάρχει απαριθμητής  $E = (Q, \Sigma, \Gamma, \delta, q_0, q_{out})$  τέτοιος ώστε  $L = L(E)$ .

**Συμβολισμός 1.2.46 (Κουτάκια, συνέχεια...).**

4. Αν ο απαριθμητής  $E$  απαριθμεί τη γλώσσα  $L$  θα γράφουμε:



Η χρησιμοποίηση ενός απαριθμητή  $E$  ως υπορουτίνα σε μία ΤΜ  $M$  είναι εξ ορισμού προβληματική. Όχι τόσο γιατί ο Ορισμός 1.2.41 διαφέρει από τον Ορισμό 1.1.1 ως προς το πλήθος των ταινιών<sup>1</sup>, αλλά γιατί στους απαριθμητές δεν υφίσταται τερματισμός! Στην πραγματικότητα αυτό που κάνουμε είναι να προσδίδουμε στην  $M$  τις απαραίτητες μεταβάσεις του  $E$  για να παραχθούν οι λέξεις της  $L(E)$ , και όχι να «συνδέουμε» τις δύο μηχανές.

**Θεώρημα 1.2.47.** Έστω γλώσσα  $L \subseteq \{0, 1\}^*$ .  $L \in \text{RE}$  αν υπάρχει απαριθμητής  $E$  τέτοιος ώστε  $L(E) = L$ .

*Απόδειξη.* ( $\Rightarrow$ ) Η απόδειξη θα γίνει αργότερα (δες σελίδα 53) καθώς χρειάζεται να εισάγουμε την έννοια της *Καθολικής ΤΜ* πρώτα<sup>2</sup>.

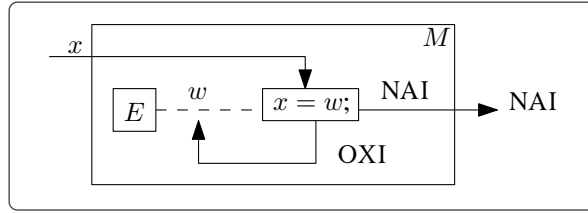
( $\Leftarrow$ ) Έστω απαριθμητής  $E$  που απαριθμεί τη γλώσσα  $L$ . Η ΤΜ  $M$  του Σχήματος 1.2.20 ημι-αποφασίζει την  $L$ <sup>3</sup>. □

**Παρατήρηση 1.2.48.** Σύμφωνα με το Θεώρημα 1.2.47 μία γλώσσα  $L$  είναι αναδρομικά απαριθμήσιμη αν  $L \in \text{RE}$ .

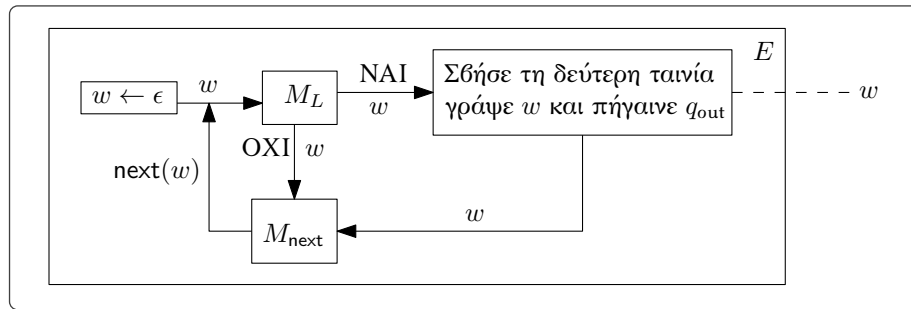
<sup>1</sup> Θα δούμε στη συνέχεια ότι για κάθε ΤΜ με δύο ταινίες υπάρχει ισοδύναμη ΤΜ με μία ταινία.

<sup>2</sup> Θα χρειαστεί να κάνουμε «χρονομετρημένη προσομοίωση» της ΤΜ που ημιαποφασίζει την  $L$ .

<sup>3</sup> Ο τρόπος που χρησιμοποιείται ως υπορουτίνα ο  $E$  είναι ο εξής: Ο  $E$  παράγει μια λέξη που την τροφοδοτεί στις υπόλοιπες υπορουτίνες της  $M$ . Όταν ο υπολογισμός γυρίσει πίσω στον  $E$  αυτός παράγει καινούργια λέξη που την τροφοδοτεί ξανά στις υπόλοιπες υπορουτίνες κ.ο.κ..



**Σχήμα 1.2.20:** Η ΤΜ που ημι-αποφασίζει μία γλώσσα όταν υπάρχει απαριθμητής  $E$  που την απαριθμεί.



**Σχήμα 1.2.21:** Ο απαριθμητής που απαριθμεί την  $L \in \text{REC}$  σύμφωνα με τη λεξικογραφική διάταξη ( $M_{\text{next}}$  είναι η ΤΜ του Παραδείγματος 1.2.8).

**Παρατήρηση 1.2.49.** Έστω γλώσσα  $L \subseteq \Sigma^*$  και απαριθμητής  $E = (Q, \Sigma, \Gamma, \delta, q_0, q_{\text{out}})$  που την απαριθμεί. Ο ορισμός που δώσαμε για τον απαριθμητή αφήνει ανοιχτό το ενδεχόμενο ο  $E$  να τυπώνει τις λέξεις της  $L$  σε οποιαδήποτε σειρά, ακόμα και με επαναλήψεις<sup>1</sup>.

**Θεώρημα 1.2.50.** Έστω γλώσσα  $L \subseteq \{0, 1\}^*$ .  $L \in \text{REC}$  ανν υπάρχει απαριθμητής  $E$  που απαριθμεί τις λέξεις της  $L$  σύμφωνα με τη λεξικογραφική διάταξη.

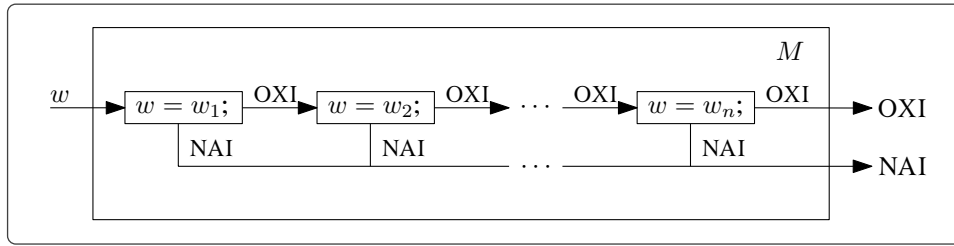
**Απόδειξη.** ( $\Rightarrow$ ) Έστω ότι  $L \in \text{REC}$  και ότι η ΤΜ  $M_L$  την αποφασίζει. Ο απαριθμητής  $E$  του Σχήματος 1.2.21 είναι ο ζητούμενος.

( $\Leftarrow$ ) Αν η  $L$  είναι πεπερασμένη γλώσσα, έστω η  $\{w_1, w_2, \dots, w_n\}$ , τότε π.χ. η ΤΜ του Σχήματος 1.2.22 την αποφασίζει.

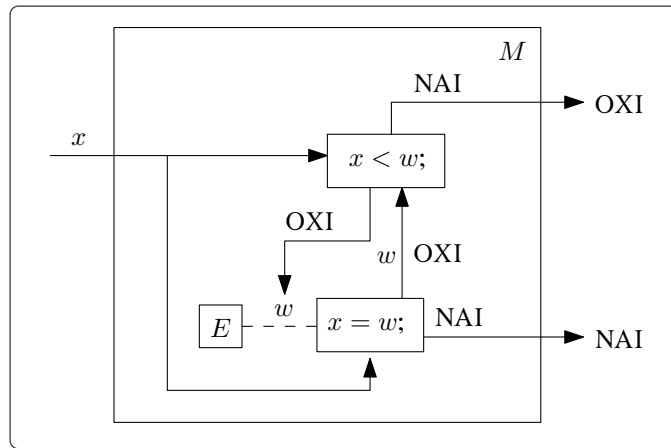
Έστω ότι η  $L$  είναι άπειρη γλώσσα και ότι ο απαριθμητής  $E$  την απαριθμεί σύμφωνα με τη λεξικογραφική διάταξη. Η ΤΜ  $M$  του Σχήματος 1.2.23 αποφασίζει την  $L$ .  $\square$

**Ορισμός 1.2.51.** Μία γλώσσα  $L$  λέγεται *αναδρομική* ανν υπάρχει απαριθμητής που απαριθμεί τις λέξεις της σύμφωνα με τη λεξικογραφική διάταξη.

<sup>1</sup> Ενδεχομένως να έχουμε και άπειρες επαναλήψεις!



**Σχήμα 1.2.22:** Η ΤΜ που αποφασίζει την πεπερασμένη γλώσσα  $L = \{w_1, w_2, \dots, w_n\}$ .



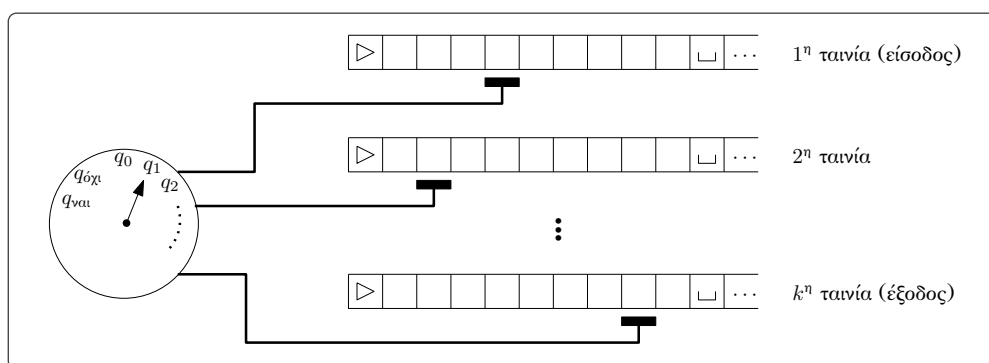
**Σχήμα 1.2.23:** Η ΤΜ που αποφασίζει την  $L$  όταν υπάρχει απαριθμητής  $E$  που τη απαριθμεί σύμφωνα με την λεξικογραφική διάταξη.

### 1.3 Επεκτάσεις Μηχανών Turing

Μπορούμε να φανταστούμε πολλούς τρόπους να «βελτιώσουμε» τις ΤΜ ούτως ώστε ο υπολογισμός να γίνεται ευκολότερα και γρηγορότερα. Θα δούμε όμως ότι αυτό είναι μάταιο καθώς το ενδιαφέρον μας εδώ στρέφεται στο κατά πόσον μία συνάρτηση είναι υπολογίσιμη (ή μία γλώσσα είναι αναγνωρίσιμη/αποφάνσιμη), χωρίς να ενδιαφερόμαστε για την πολυπλοκότητα του τρόπου που υπολογίζεται (αντίστοιχα αναγνωρίζεται/αποφασίζεται). Σε αυτήν την παράγραφο θα δούμε ότι οι πιο εύλογες βελτιώσεις-επεκτάσεις στον ορισμό των ΤΜ δεν είναι ικανές να επεκτείνουν το σύνολο των υπολογίσιμων συναρτήσεων (ή των αναγνωρίσιμων/αποφάνσιμων γλωσσών)<sup>1</sup>, πράγμα που καταδεικνύει πως αν θέλουμε απλά να ερευνήσουμε τους ορίζοντες της υπολογισιμότητας, η μηχανή του Ορισμού 1.1.1 είναι η μόνη που χρειαζόμαστε.

Ξεκινάμε προσθέτοντας παραπάνω ταινίες στις ΤΜ. Αυτές οι ταινίες μπορούν να χρησιμοποιηθούν για να αποθηκεύουν διαφορετικού τύπου δεδομένα (μετρητές, μεταβλητές κ.λπ.) ή να περιέχουν την έξοδο που επιστρέφει η μηχανή.

<sup>1</sup> Αποδεικνύεται ότι το ίδιο ισχύει και για όλες τις άλλες (εύλογες) επεκτάσεις ΤΜ (δες Σημείωση 1.3.16).



Σχήμα 1.3.1: Σχηματική αναπαράσταση μίας TM  $k$ -ταινιών.

### 1.3.1 Πολυταινιακές Μηχανές Turing

**Ορισμός 1.3.1.** Για κάθε  $k \geq 1$  Μηχανή Turing  $k$ -ταινιών είναι μια εξάδα  $M_k = (Q, \Sigma, \Gamma, \delta, q_0, q_{\text{τέλος}})$  όπου  $Q, \Sigma, \Gamma$  πεπερασμένα σύνολα, και:

1.  $Q$  είναι το σύνολο των καταστάσεων
2.  $q_0, q_{\text{τέλος}} \in Q$ ,  $q_{\text{τέλος}}$  η τερματική κατάσταση
3.  $\Sigma$  είναι το αλφάβητο εισόδου
4.  $\Gamma$  είναι το αλφάβητο ταινίας
5.  $\Sigma \subset \Gamma$
6.  $\triangleright, \sqcup \in \Gamma \setminus \Sigma$
7.  $\delta : Q \times \Gamma^k \rightarrow Q \times \Gamma^k \times \{A, \Delta\}^k$  που ικανοποιεί τους ακόλουθους περιορισμούς:
  - $\forall a_1, \dots, a_k \in \Gamma (\delta(q_{\text{τέλος}}, a_1, \dots, a_k) = \perp)$
  - $\forall i \in [k] \forall q \in Q \setminus \{q_{\text{τέλος}}\} \forall q' \in Q \forall a_1, \dots, a_k, b_1, \dots, b_k \in \Gamma \forall x_1, \dots, x_k \in \{A, \Delta\}$   
 $(\delta(q, a_1, \dots, a_k) = (q', b_1, \dots, b_k, x_1, \dots, x_k) \wedge a_i = \triangleright \rightarrow x_i = \Delta \wedge b_i = \triangleright)$

Μπορούμε να φανταστούμε την  $M_k$  ως εξής (δες Σχήμα 1.3.1):

Η  $M_k$  αποτελείται από  $k$ -ταινίες,  $k$ -κεφαλές (μία για κάθε ταινία) και έναν δείκτη καταστάσεων. Η είσοδος βρίσκεται στην ταινία 1<sup>1</sup> και η έξοδος βρίσκεται στην ταινία  $k$  (οι υπόλοιπες ταινίες χρησιμοποιούνται ως πρόχειρο).

<sup>1</sup> Μπορούμε ακόμα να θεωρήσουμε ότι η  $M_k$  δέχεται παραπάνω από μια λέξεις σαν είσοδο, για παράδειγμα  $i \in \mathbb{N}$  λέξεις. Στην περίπτωση όπου  $i \leq k$ , οι λέξεις μπορεί να γραφτούν, η κάθε μία ξεχωριστά, στις  $i$ -πρώτες ταινίες. Αν  $i > k$  θα πρέπει κάποια ταινία να περιέχει παραπάνω από μία λέξεις, τις οποίες θα χωρίζουμε με ένα ειδικό σύμβολο όπως παραδείγματος χάρη το #.

Το κάθε «βήμα» υπολογισμού, όπως και στις μονοταινιακές TM, αποτελείται από μία μετάβαση της συνάρτησης  $\delta$ . Αυτό σημαίνει ότι το βήμα ολοκληρώνεται όταν έχουν γίνει οι αλλαγές στις  $k$  ταινίες και στον ελεγκτή καταστάσεων. Μιλώντας «μηχανιστικά» θα λέγαμε ότι σε κάθε βήμα η πολυταινιακή TM κάνει «παράλληλα» τις αλλαγές στις  $k$  ταινίες. Μιλώντας όμως μαθηματικά μπορούμε να ορίσουμε το επόμενο στιγμιότυπο μέσα από τη συνάρτηση μεταβάσεων όπως κάναμε στον Ορισμό 1.1.6 (φτάνει πρώτα να συμφωνήσουμε σε έναν τρόπο να κωδικοποιήσουμε τα στιγμιότυπα λειτουργίας ως λέξεις, π.χ. όπως στη Σελίδα 34). Επίσης, εύκολα μπορούμε να μεταφέρουμε τον Ορισμό 1.2.1 στο μοντέλο των πολλών ταινιών, απαιτώντας η έξοδος της συνάρτησης να βρίσκεται στην  $k$ -οστή ταινία (το περιεχόμενο των υπόλοιπων ταινιών δεν μας ενδιαφέρει).

Για να δείξουμε ότι οι πολλαπλές ταινίες (παρόλο που αντικειμενικά διευκολύνουν πολύ τον σχεδιασμό των TM και επισπεύδουν τον υπολογισμό) δεν έχουν τη δυνατότητα να υπολογίζουν συναρτήσεις που δεν είναι υπολογίσιμες, θα δείξουμε ότι για κάθε πολυταινιακή TM υπάρχει ισοδύναμη μονοταινιακή (σύμφωνα με τον Ορισμό 1.2.14).

**Θεώρημα 1.3.2.** Για κάθε TM  $k$ -ταινιών,  $k \in \mathbb{N}$ , υπάρχει ισοδύναμη μονοταινιακή TM.

*Απόδειξη.* Έστω  $M_k = (Q, \Sigma, \Gamma, \delta, q_0, q_{\text{τέλος}})$  η TM  $k$ -ταινιών. Θα προσομοιώσουμε <sup>1</sup> τη λειτουργία της με μία μονοταινιακή TM  $M = (Q', \Sigma, \Gamma', \delta', q_0, q_{\text{τέλος}})$  όπου

$$\Gamma' = \Gamma \cup \{\#\} \cup \{\dot{a} \mid a \in \Gamma \setminus \{\triangleright\}\} \cup \{\blacktriangleright, \dot{\blacktriangleright}\}$$

Το σύμβολο  $\#$  χρησιμοποιείται για να χωρίσουμε την ταινία της  $M$  σε  $k$ -τμήματα που αντιστοιχούν στις  $k$  ταινίες της  $M_k$ . Τα σύμβολα με κουκκίδα χρησιμοποιούνται για να επισημάνουν τη θέση του συμβόλου που βρίσκεται η κεφαλή σε κάθε ταινία της  $M_k$ . Σε κάθε βήμα υπολογισμού της  $M$  θα υπάρχουν  $k$ -σύμβολα με κουκκίδα στην ταινία, ένα σε κάθε τμήμα της. Τέλος, το  $\blacktriangleright$  παίζει τον ρόλο του αριστερού μαξιλαρακιού σε κάθε τμήμα της ταινίας (δες Σχήμα 1.3.2).

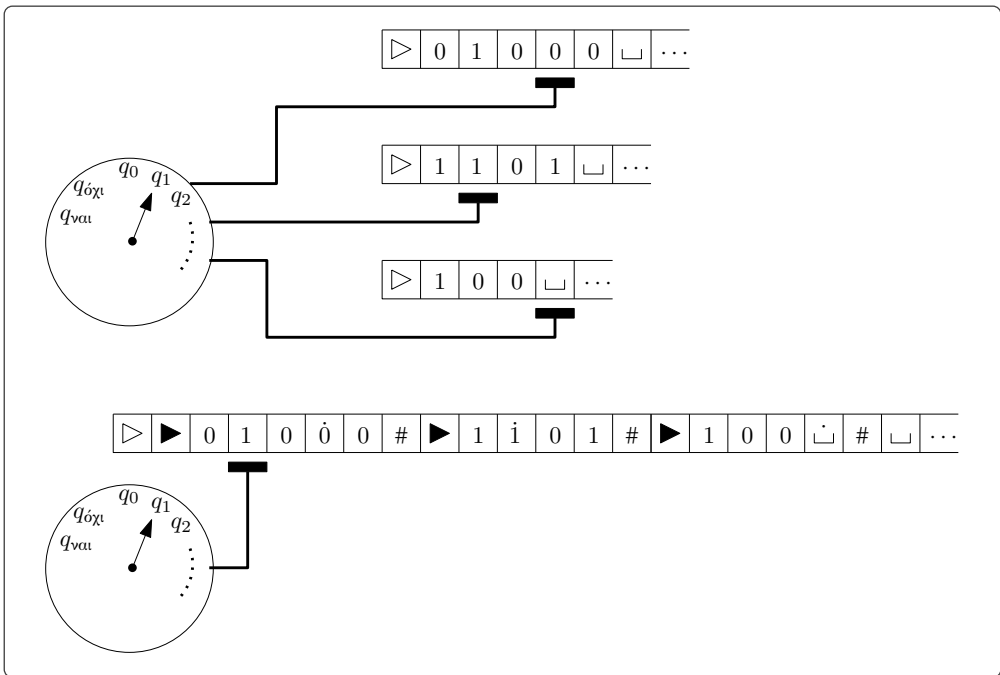
Η συνάρτηση  $\delta'$  (και το σύνολο καταστάσεων  $Q'$ ) ορίζεται ως εξής <sup>2</sup>:

1. Η  $M$  ξεκινάει από το  $\triangleright$  και διαβάζει τα σύμβολα που έχουν κουκκίδα σε κάθε τμήμα της ταινίας μέχρι να βρει το πρώτο σύμβολο κενού που ακολουθεί το σύμβολο  $\#$  (τα σύμβολα αυτά τα «θυμάται» χρησιμοποιώντας επιπλέον καταστάσεις <sup>3</sup>).
2. Επιστρέφει στην αρχή της ταινίας.
3. Διασχίζει πάλι την ταινία (από τα αριστερά προς τα δεξιά) και κάνει τις αλλαγές στα σύμβολα με την κουκκίδα, σε κάθε τμήμα, σύμφωνα με τη  $\delta$  (γράφοντας σύμβολα χωρίς κουκκίδα). Στο ίδιο πέρασμα αλλάζει το σύμβολο αριστερά ή δεξιά από τα σύμβολα αυτά, γράφοντας το αντίστοιχο σύμβολο με κουκκίδα, ανάλογα με το αν η κεφαλή στην εν λόγω ταινία της  $M_k$  κινείται αριστερά ή δεξιά.

<sup>1</sup> Για κάθε μετάβαση της  $M_k$  θα ορίσουμε (περιγραφικά και όχι τυπικά) μία ακολουθία μεταβάσεων της  $M$  που καταλήγει στο ίδιο (ή, πιο σωστά, σε αντίστοιχο) στιγμιότυπο.

<sup>2</sup> Δεν θα δώσουμε αναλυτική περιγραφή της  $\delta'$  και του  $Q'$ . Αντ'αυτού θα περιγράψουμε τη λειτουργία της  $M$ .

<sup>3</sup> Θυμηθείτε ότι τόσο το  $\Gamma$  όσο και το  $k$  είναι σταθερά, άρα και το πλήθος καταστάσεων που χρειαζόμαστε για αυτήν τη δουλειά είναι σταθερό.

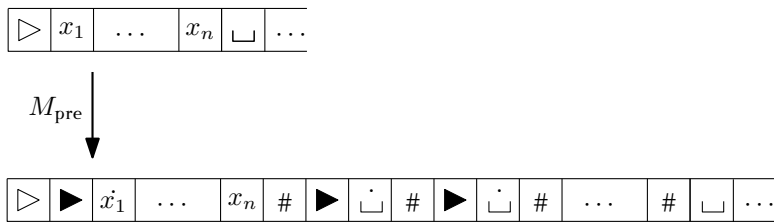


**Σχήμα 1.3.2:** Παράδειγμα προσομοίωσης TM  $k$ -ταινιών από μονοταινιακή TM.

Αν χρειαστεί να γράψει πάνω στο # σε κάποιο κομμάτι της ταινίας <sup>1</sup>, μεταφέρει το περιεχόμενο της ταινίας που ακολουθεί το εν λόγω # ένα κελί δεξιά (χρησιμοποιώντας παραδείγματος χάρη κάποια παραλλαγή της  $M_{\text{space}}$  του Παραδείγματος 1.2.9), κάνει την αλλαγή που πρέπει και μετά γράφει # στο «κενό» κελί (που θα περιέχει π.χ. το σύμβολο \_ αν χρησιμοποιήσουμε την  $M_{\text{space}}$ ).

4. Επιστρέφει στην αρχή της ταινίας και αλλάζει την κατάσταση στον ελεγκτή σύμφωνα με τη  $\delta$ .

Τέλος, πριν ξεκινήσει τη λειτουργία της η  $M$  με είσοδο τη λέξη  $w = x_1 \dots x_n \in \Sigma^*$ , η  $M$  τρέχει μία υπορουτίνα, έστω  $M_{\text{pre}}$ , που τροποποιεί την ταινία της ως εξής:

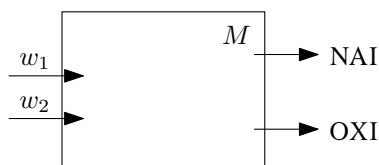


**Παρατήρηση 1.3.3.** Εφαρμόζοντας τις ιδέες της παραπάνω απόδειξης μπορούμε να ορίσουμε τους απαριθμητές της Παραγράφου 1.2.3 ως μονοταϊνιακές μηχανές.

<sup>1</sup> Για παράδειγμα αν η  $M_k$  πρέπει να προσδέσει κάποιο σύμβολο στο τέλος της λέξης που περιέχει μία ταινία.

### Συμβολισμός 1.3.4 (Κουτάκια, συνέχεια...).

5. Πολλές φορές στη συνέχεια, όταν σχεδιάζουμε μία TM  $M$ , θα γράφουμε (παραδείγματος χάρι):



εννοώντας ότι η  $M$  είναι TM δύο ταινιών, όπου η πρώτη ταινία γράφει την είσοδο  $w_1$  και η δεύτερη την είσοδο  $w_2$  <sup>1</sup>.

Τον παραπάνω συμβολισμό τον έχουμε χρησιμοποιήσει ήδη σε παλιότερα παραδείγματα (όπως στην TM του Σχήματος 1.2.14 και του Σχήματος 1.2.23). Θεωρώντας όμως ότι υπάρχουν δύο διαφορετικές ταινίες εισόδου απλοποιεί αρκετά τη λειτουργία μίας TM, καθώς δεν αναλωνόμαστε στο πως διαχειρίζεται τη μοναδική της ταινία για να φέρει εις πέρας αυτούς τους υπολογισμούς.

## 1.3.2 Μη-ντετερμινιστικές Μηχανές Turing

Από τη Θεωρία Υπολογιστικής Πολυπλοκότητας γνωρίζουμε ότι η προσθήκη επιπλέον ταινιών σε μία TM δεν βελτιώνει ουσιαστικά τον χρόνο του υπολογισμού. Από την άλλη μεριά, αν προσθέσουμε στη TM τη δυνατότητα να κάνει μη-ντετερμινιστικά βήματα, τότε η βελτίωση στον χρόνο είναι ουσιαστική <sup>2</sup>. Όμως όσον αφορά τη Θεωρία Υπολογισμού που μελετάμε εδώ, βελτιώσεις στη χρονική πολυπλοκότητα δεν λαμβάνονται υπόψιν καθώς ενδιαφερόμαστε αποκλειστικά και μόνο για το αν μία συνάρτηση είναι υπολογίσιμη ή όχι.

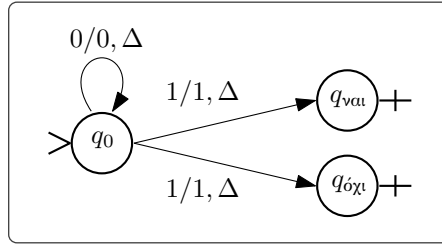
Για τον ορισμό της Μη-ντετερμινιστικής TM θα χρησιμοποιήσουμε την παραλλαγή με τις δύο τερματικές καταστάσεις, καθώς η αποφανσιμότητα γλωσσών μέσω μη-ντετερμινιστικών μηχανών παρουσιάζει μεγαλύτερο ενδιαφέρον (δες Σημείωση 1.3.12).

**Ορισμός 1.3.5.** Μη-ντετερμινιστική Μηχανή Turing (NTM) είναι μια επτάδα  $N = (Q, \Sigma, \Gamma, \delta, q_0, q_{\text{ναι}}, q_{\text{όχι}})$  όπου  $Q, \Sigma, \Gamma$  πεπερασμένα σύνολα, και:

1.  $Q$  είναι το σύνολο των καταστάσεων
2.  $q_0, q_{\text{ναι}}, q_{\text{όχι}} \in Q$ , με  $q_{\text{ναι}} \neq q_{\text{όχι}}$  όπου  $q_{\text{ναι}}, q_{\text{όχι}}$  οι τερματικές καταστάσεις

<sup>1</sup> Γνωρίζοντας (από το Θεώρημα 1.3.2) ότι υπάρχει ισοδύναμη μονοταινιακή TM, θα θεωρούμε καταχρηστικά ότι και η μηχανή που χρησιμοποιεί την  $M$  ως υπορουτίνα είναι μονοταινιακή.

<sup>2</sup> Για παράδειγμα αν θέλουμε να βρούμε τη θέση ενός στοιχείου  $x$  σε έναν πίνακα  $A$  με  $n$  στοιχεία, μη-ντετερμινιστικά μπορούμε να πάρουμε την απάντηση σε ένα μόνο βήμα (ελέγχουμε μη-ντετερμινιστικά αν το στοιχείο  $A[i]$ ,  $i = 1, \dots, n$ , ταυτίζεται με το  $x$ ). Ντετερμινιστικά όμως, στη χειρότερη περίπτωση, θα πρέπει να επισκεφτούμε όλα τα κελιά του  $A$  για να βρούμε την απάντηση (εκτός βέβαια αν ο  $A$  είναι ταξινομημένος, όπου και πάλι θα χρειαστεί να ελέγξουμε  $\log n$  κελιά).



Σχήμα 1.3.3: Παράδειγμα μη-ντετερμινιστικής TM.

3.  $\Sigma$  είναι το αλφάβητο εισόδου
4.  $\Gamma$  είναι το αλφάβητο ταινίας
5.  $\Sigma \subset \Gamma$
6.  $\triangleright, \sqcup \in \Gamma \setminus \Sigma$
7.  $\delta \subseteq Q \times \Gamma \times Q \times \Gamma \times \{A, \Delta\}$  είναι η σχέση μετάβασης που ικανοποιεί τους ακόλουθους περιορισμούς:
  - $\forall a, b \in \Gamma \forall q \in Q \forall x \in \{A, \Delta\} ((q_{\nu\alpha\iota}, a, q, b, x) \notin \delta \wedge (q_{\omicron\chi\iota}, a, q, b, x) \notin \delta)$
  - $\forall q \in Q \setminus \{q_{\nu\alpha\iota}, q_{\omicron\chi\iota}\} \forall q' \in Q \forall a \in \Gamma ((q, \triangleright, q', a, x) \in \delta \rightarrow x = \Delta \wedge a = \triangleright)$

Ο υπολογισμός της  $N$  ορίζεται εντελώς αντίστοιχα με τις απλές TM, μόνο που πλέον μπορούν να υπάρχουν παραπάνω από ένα επόμενα στιγμιότυπα λειτουργίας. Κάθε φορά που η  $\delta$  έχει παραπάνω από μία επιλογές για το επόμενο στιγμιότυπο (μη-ντετερμινιστικό βήμα) χωρίζεται σε δύο ή περισσότερα υπολογιστικά σενάρια. Συνεπώς, αντί να έχουμε ένα μονοπάτι υπολογισμού, όπως στην περίπτωση των ντετερμινιστικών TM, έχουμε ένα δέντρο υπολογισμού, που πιθανόν να έχει «κλαδιά» με άπειρο μήκος.

**Παράδειγμα 1.3.6.** Η TM  $N$  του Σχήματος 1.3.3 είναι μία μη-ντετερμινιστική TM. Παρατηρήστε ότι ο υπολογισμός της  $N$  με είσοδο 0010 αποτελείται από δύο υπολογιστικά σενάρια:

1<sup>ο</sup> σενάριο:  $\triangleright q_0 0010 \vdash_N \triangleright 0 q_0 010 \vdash_N \triangleright 00 q_0 10 \vdash_N \triangleright 001 q_{\nu\alpha\iota} 0$

2<sup>ο</sup> σενάριο:  $\triangleright q_0 0010 \vdash_N \triangleright 0 q_0 010 \vdash_N \triangleright 00 q_0 10 \vdash_N \triangleright 001 q_{\omicron\chi\iota} 0$

**Ορισμός 1.3.7.** Έστω NTM  $N = (Q, \Sigma, \Gamma, \delta, q_0, q_{\nu\alpha\iota}, q_{\omicron\chi\iota})$ . Η γλώσσα που αναγνωρίζει (ή αποδέχεται) η  $N$  είναι η:

$$L(N) = \{w \in \Sigma^* \mid \exists w_1, w_2 \in \Gamma^* (\triangleright q_0 w \vdash_N^* \triangleright w_1 q_{\nu\alpha\iota} w_2)\}$$

δηλαδή υπάρχει υπολογιστικό σενάριο στο οποίο εμφανίζεται η  $q_{\nu\alpha\iota}$ <sup>1</sup>.

<sup>1</sup> Δεν έχει σημασία αν στα υπόλοιπα σενάρια η  $N$  κολλάει ή απορρίπτει.

**Ορισμός 1.3.8.** Έστω  $L \subseteq \Sigma^*$  και NTM  $N = (Q, \Sigma, \Gamma, \delta, q_0, q_{\text{ναι}}, q_{\text{όχι}})$ . Η  $N$  ημι-αποφασίζει την  $L$  ανν:

(A)  $w \in L \Leftrightarrow$  Υπάρχει υπολογιστικό σενάριο τέτοιο ώστε  $N(w) \downarrow_{q_{\text{ναι}}}$ .

**Ορισμός 1.3.9.** Έστω  $L \subseteq \Sigma^*$  και NTM  $N = (Q, \Sigma, \Gamma, \delta, q_0, q_{\text{ναι}}, q_{\text{όχι}})$ . Η  $N$  αποφασίζει την  $L$  ανν κάθε υπολογιστικό σενάριο της  $N(w)$  τερματίζει και:

(A)  $w \in L \Leftrightarrow$  Υπάρχει υπολογιστικό σενάριο τέτοιο ώστε  $N(w) \downarrow_{q_{\text{ναι}}}$ .

(B)  $w \notin L \Leftrightarrow$  Σε κάθε υπολογιστικό σενάριο  $N(w) \downarrow_{q_{\text{όχι}}}$ .

**Παρατήρηση 1.3.10.** Από τον παραπάνω ορισμό φαίνεται ότι υπάρχει μία ουσιαστική «ασυμμετρία» όσον αφορά την αποδοχή και την απόρριψη μίας εισόδου.

**Παράδειγμα 1.3.11.** Η NTM του Παραδείγματος 1.3.6 ημι-αποφασίζει τη γλώσσα  $L = \{w \in \{0, 1\}^* \mid \eta \ w \text{ περιέχει τουλάχιστον ένα } 1\}$ <sup>1</sup>.

**Σημείωση 1.3.12.** Όσον αφορά τον υπολογισμό συναρτήσεων, δυστυχώς δεν μπορούμε να εκμεταλλευτούμε τον μη-ντετερμινισμό απόλυτα (τουλάχιστον όχι για τις συναρτήσεις που μας ενδιαφέρουν). Μπορούμε να δώσουμε τον ακόλουθο ορισμό:

Έστω συνάρτηση  $f : \Sigma^* \rightarrow \Sigma^*$  και NTM  $N$ . Η  $N$  υπολογίζει την  $f$  ανν για κάθε  $w \in \Sigma^*$ :

- αν  $w \in \text{dom}(f)$ , τότε κάθε υπολογιστικό σενάριο της  $N(w)$  τερματίζει σε στιγμιότυπο της μορφής  $\triangleright qf(w)$ , όπου  $q \in \{q_{\text{ναι}}, q_{\text{όχι}}\}$ ,
- αν  $w \notin \text{dom}(f)$ , τότε υπάρχει υπολογιστικό σενάριο της  $N(w)$  που δεν τερματίζει.

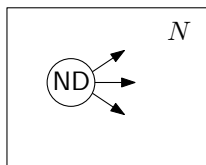
Είναι εμφανές ότι με αυτόν τον τρόπο χρήσης μη-ντετερμινισμού δεν βρίσκουμε την τιμή της συνάρτησης πιο γρήγορα, ίσα-ίσα που καθυστερούμε περισσότερο καθώς πρέπει να υπολογίσουμε την τιμή της συνάρτησης ξανά και ξανά (μία φορά για κάθε υπολογιστικό σενάριο).

Αν θέλαμε όμως να υπολογίσουμε συναρτήσεις της μορφής  $f : \Sigma^* \rightarrow 2^{\Sigma^*}$ , που η τιμή ενός στοιχείου  $w \in \Sigma^*$  είναι ένα σύνολο στοιχείων  $S \subseteq \Sigma^*$ , τότε ο μη-ντετερμινισμός μας «λύνει τα χέρια». Σε αυτήν την περίπτωση επιτρέπουμε σε κάθε κλάδο υπολογισμού να έχει ως έξοδο διαφορετική λέξη και απαιτούμε το σύνολο των εξόδων να ταυτίζεται με το σύνολο  $S$ , δηλαδή την τιμή της συνάρτησης.

**Συμβολισμός 1.3.13 (Κουτάκια, συνέχεια...).**

6. Όταν σχεδιάζουμε μία NTM  $N$  θα σημειώνουμε τα μη-ντετερμινιστικά βήματα ως εξής (παραδείγματος χάρη αν έχουμε τρεις μη-ντετερμινιστικές επιλογές):

<sup>1</sup> Δεν την αποφασίζει γιατί για την  $\epsilon$  τα σενάρια στο υπολογιστικό δέντρο της  $N(\epsilon)$  δεν τερματίζουν.



**Θεώρημα 1.3.14.** Για κάθε NTM υπάρχει ισοδύναμη TM.

*Απόδειξη.* <sup>1</sup> Έστω NTM  $N = (Q, \Sigma, \Gamma, \delta, q_0, q_{\text{vαι}}, q_{\text{όχι}})$ . Θα δείξουμε ότι υπάρχει TM  $M$  (με τρεις ταινίες σε πρώτη φάση) τέτοια ώστε:

$$\forall w \in \Sigma^* (w \in L(N) \leftrightarrow w \in L(M)) \quad ^2$$

Η ιδέα της απόδειξης είναι η ακόλουθη:

*Δοσμένης μίας λέξης  $w \in \Sigma^*$  «ακολουθούμε» όλα τα υπολογιστικά σενάρια στο δέντρο υπολογισμού της  $N(w)$  για πεπερασμένο αριθμό βημάτων, έστω  $k \in \mathbb{N}$ . Ελέγχουμε αν κάποιο από αυτά τερματίζει στην  $q_{\text{vαι}}$ . Αν υπάρχει τέτοιο σενάριο, η  $M(w)$  τερματίζει και επιστρέφει NAI, αλλιώς αυξάνουμε το  $k$  και επαναλαμβάνουμε τον έλεγχο.* <sup>3</sup>

Παρατηρούμε ότι για κάθε  $w \in \Sigma^*$ :

- Αν  $w \in L(N)$  τότε υπάρχει  $k_0 \in \mathbb{N}$  τέτοιο ώστε κάποιο υπολογιστικό σενάριο  $k_0$  βημάτων της  $N(w)$  τερματίζει στην  $q_{\text{vαι}}$ . Συνεπώς, όταν ακολουθούμε τα υπολογιστικά σενάρια της  $N(w)$  για  $k_0$  βήματα, η  $M(w)$  θα τερματίσει στην  $q_{\text{vαι}}$ . Άρα  $w \in L(M)$ .
- Αν  $w \notin L(N)$  τότε για κάθε  $k \in \mathbb{N}$  δεν υπάρχει υπολογιστικό σενάριο  $k$  βημάτων της  $N(w)$  που τερματίζει στην  $q_{\text{vαι}}$ . Συνεπώς, η  $M(w)$  δεν τερματίζει ποτέ. Άρα  $w \notin L(M)$ .

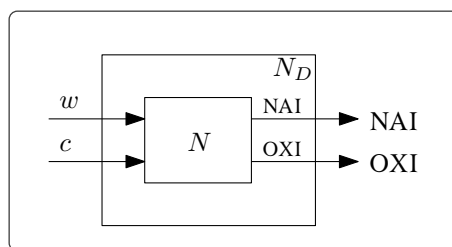
Για να διευκολύνουμε την παρουσίαση θα θεωρήσουμε, χωρίς βλάβη της γενικότητας, ότι κάθε βήμα της  $N(w)$  είναι μη-ντετερμινιστικό. Για ένα ζεύγος  $(q, a)$ , όπου  $q \in Q$  και  $a \in \Gamma$  υπάρχουν το πολύ  $r = |Q| \cdot |\Gamma| \cdot 2$  διαφορετικές δυνατές τιμές για το  $(q, a, p, b, x)$  όπου  $p \in Q$ ,  $b \in \Gamma$  και  $x \in \{A, \Delta\}$ . Συνεπώς σε κάθε βήμα της  $N(w)$  υπάρχουν το πολύ  $r$  μη-ντετερμινιστικές επιλογές. Θεωρώντας μία αρίθμηση των  $r$  αυτών επιλογών παρατηρούμε ότι σε κάθε υπολογιστικό σενάριο το επόμενο στιγμιότυπο προκύπτει από έναν αριθμό στο  $[r]$  (τη μη-ντετερμινιστική επιλογή δηλαδή που θα εκτελέσει η  $N(w)$ ). Συνεπώς ένα υπολογιστικό σενάριο  $k$ -βημάτων,  $k \in \mathbb{N}$ , μπορεί να χαρακτηριστεί από μία λέξη  $c \in \{1, \dots, r\}^*$  με μήκος  $k$  <sup>4</sup>.

<sup>1</sup> Θα δείξουμε μόνο την (πιο εύκολη) περίπτωση όπου η NTM ημι-αποφασίζει μία γλώσσα (η κεντρική ιδέα είναι ίδια και για την περίπτωση όπου η NTM αποφασίζει μία γλώσσα ή υπολογίζει μία συνάρτηση).

<sup>2</sup> Παρατηρήστε ότι εδώ εφαρμόζουμε μία διαφορετική μορφή «προσομοίωσης» από την απόδειξη του Θεωρήματος 1.3.2: Δεν προσομοιώνουμε κάθε βήμα της  $N$ , προσομοιώνουμε συνολικά τη λειτουργία της.

<sup>3</sup> Όταν ενδιαφερόμαστε για τον υπολογισμό συναρτήσεων (ή την απόφαση γλώσσας) ελέγχουμε αν για κάποιο αριθμό βημάτων όλα τα υπολογιστικά σενάρια τερματίζουν «κατάλληλα».

<sup>4</sup> Για παράδειγμα η λέξη  $c_1 \dots c_k$  είναι ένα υπολογιστικό σενάριο  $k$ -βημάτων, που στο πρώτο μη-ντετερμινιστικό βήμα κάνουμε την επιλογή  $c_1$ , στο δεύτερο τη  $c_2$  κ.ο.κ..



Σχήμα 1.3.4: Η TM  $N_D$  στην απόδειξη του Θεωρήματος 1.3.14.

Θεωρούμε την TM  $N_D$  του Σχήματος 1.3.4 η οποία δέχεται σαν είσοδο τη  $w$  και μία λέξη  $c \in \{1, \dots, r\}^*$  και «τρέχει» με ντετερμινιστικό τρόπο την  $N(w)$ , για το πολύ  $|c|$  βήματα, ως εξής: Σε κάθε βήμα της η  $N_D(w, c)$  διαβάζει ένα σύμβολο από τη δεύτερη ταινία (που περιέχει τη  $c$ ), δηλαδή έναν αριθμό στο  $[r]$ , έστω  $c_0$ , και κάνει ότι θα έκανε η  $N(w)$  εφαρμόζοντας τη  $c_0$ -οστή μη-ντετερμινιστική επιλογή<sup>1</sup>.

- Αν η  $N(w)$ , κάνοντας τις επιλογές της  $c$ , φτάσει στην  $q_{\text{ναι}}$  τότε η  $N_D(w, c)$  επιστρέφει NAI.
- Αν η δεύτερη κεφαλή διαβάσει  $\sqcup$  (δηλαδή τελείωσαν οι επιλογές της  $c$ ) η  $N_D(w, c)$  θα πάει σε μία ειδική κατάσταση, έστω την  $q_{\text{next}}$ .
- Αν για κάποιο  $i \in [|c|]$  η  $c_i$ -οστή μη-ντετερμινιστική επιλογή δεν αποτελεί επιλογή για την  $N$ , η  $N_D(w, c)$  θα πάει στην  $q_{\text{next}}$ .

Θεωρούμε επίσης την TM  $M_{\text{next}}$  που δέχεται σαν είσοδο μία λέξη  $w \in \{1, \dots, r\}^*$  και επιστρέφει την επόμενη λέξη  $\text{next}(w)$ , σύμφωνα με τη λεξικογραφική διάταξη του  $\{1, \dots, r\}^*$ .

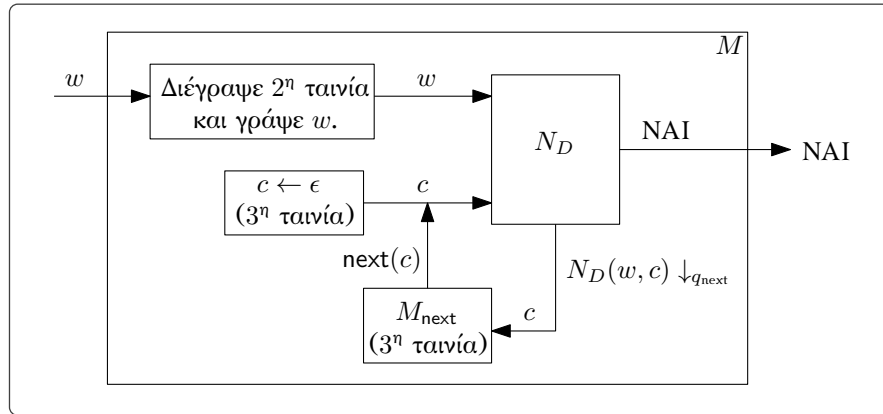
Τέλος, κατασκευάζουμε την TM  $M$  του Σχήματος 1.3.5, της οποίας η πρώτη ταινία περιέχει την  $w$  και δεν αλλάζει ποτέ, και οι άλλες δύο χρησιμοποιούνται από την  $N_D$ .

Από το Θεώρημα 1.3.2 γνωρίζουμε ότι υπάρχει μονοταινιακή TM  $M'$  που είναι ισοδύναμη με την  $M$ . Η  $M'$  είναι η ζητούμενη TM.  $\square$

**Παρατήρηση 1.3.15.** Σύμφωνα με το Θεώρημα 1.3.14 ούτε οι NTM είναι ικανές να επεκτείνουν το σύνολο των υπολογίσιμων συναρτήσεων (ή των αναγνωρίσιμων/αποφάνσιμων γλωσσών).

**Σημείωση 1.3.16.** Μπορούμε να ορίσουμε πολλές ακόμα παραλλαγές TM, όπως για παράδειγμα TM με άπειρη ταινία και από τις δύο μεριές ή TM με άπειρο πίνακα αντί για ταινία, όπως επίσης και συνδυασμούς παραλλαγών TM, για παράδειγμα πολυταινιακές μη-ντετερμινιστικές TM (δες την απόδειξη του Θεωρήματος 4.1.9). Όλες αυτές οι παραλλαγές αποδεικνύεται ότι είναι ισοδύναμες με την απλή TM (δες Ασκήσεις 1.3 και 1.4).

<sup>1</sup> Αυτό γίνεται προσθέτοντας ξεχωριστές καταστάσεις για κάθε μία από της μη-ντετερμινιστικές επιλογές. Αφού μεταβούμε στην κατάλληλη κατάσταση, συνεχίζουμε τον υπολογισμό όπως επιβάλλει η σχέση μεταβάσεων της NTM.



Σχήμα 1.3.5: Η ΤΜ  $M$  στην απόδειξη του Θεωρήματος 1.3.14.

Εκτός από τις επεκτάσεις των ΤΜ, για να διευκολύνουμε την παρουσίαση των αποδείξεων συχνά θα υποθέτουμε ότι μία δοσμένη ΤΜ ικανοποιεί κάποιους περιορισμούς, που δεν θα βλάπτουν όμως τη γενικότητα (για παράδειγμα, δες τις αποδείξεις των Θεωρημάτων 2.5.1 και 4.1.9).

## 1.4 Καθολική Μηχανή Turing

Ο φορμαλισμός που εισήγαγε ο Alan Turing έχει επικρατήσει έναντι των υπόλοιπων φορμαλισμών (ιδιαίτερος μετά την έλευση του H/Y), και πλέον είναι ο βασικός φορμαλισμός που χρησιμοποιείται τόσο σε μαθήματα Υπολογιστικής Πολυπλοκότητας όσο και σε μαθήματα Θεωρίας Υπολογισμού. Ο κύριος λόγος είναι το γεγονός ότι μπορούμε να διακρίνουμε πολλές πτυχές της λειτουργίας των σημερινών υπολογιστών στις ΤΜ (σε πολύ πιο στοιχειώδη μορφή φυσικά). Μία από αυτές τις λειτουργίες – ίσως η πιο ουσιαστική σε έναν H/Y – είναι η δυνατότητά τους να «προγραμματίζονται», δηλαδή να εισάγουμε σε αυτούς κάποιες απλές οδηγίες και αυτοί με τις σειρά τους να τις διεκπεραιώνουν. Σε πρώτη ανάγνωση, ο προγραμματισμός μπορεί να μην μοιάζει και τόσο σημαντικός, σκεφτείτε όμως ότι οι πρώτοι υπολογιστές που κατασκευάστηκαν είχαν μία και μοναδική λειτουργία (ή, έστω, ένα πολύ περιορισμένο σύνολο λειτουργιών<sup>1</sup>), πράγμα που μείωνε δραματικά το εύρος εφαρμογών τους.

Μέχρι τώρα είδαμε ότι η ΤΜ μπορεί να θεωρηθεί το πρόγραμμα που υπολογίζει μία (και μόνο μία) συνάρτηση (ή αποφασίζει/ημι-αποφασίζει μία, και μόνο μία, γλώσσα). Σε αυτήν την παράγραφο θα ορίσουμε μία ΤΜ που δέχεται σαν είσοδο την *κωδικοποίηση* μίας άλλης ΤΜ, μαζί με μία λέξη εισόδου, και φέρει «εις πέρας» τον υπολογισμό της δεύτερης. Έτσι, στην ουσία, οι ΤΜ μπορούν να προγραμματίζονται όπως ακριβώς και ο H/Y μας!

Καθώς θα χρησιμοποιούμε συνεχώς παραλλαγές αυτής της μηχανή θα της δώσουμε ένα

<sup>1</sup> Όπως για παράδειγμα η *Διαφορική Μηχανή* και η *Αναλυτική Μηχανή* (που υποστήριζε αρκετές στοιχειώδεις υπολογιστικές λειτουργίες και χρησιμοποιούσε διάτρητες κάρτες για την επιλογή μεταξύ τους), που σχεδίασε ο Charles Babbage στις αρχές του 19<sup>ου</sup> αιώνα.

ξεχωριστό όνομα, θα την αποκαλούμε *Καθολική Μηχανή Turing*. Πριν περάσουμε όμως στον ορισμό της θα πρέπει να συμφωνήσουμε σε μία κωδικοποίηση των TM.

### Κωδικοποίηση Μηχανών Turing στο αλφάβητο $\{0, 1\}$

**Συμβολισμός 1.4.1.** Έστω αλφάβητο  $\Sigma$ . Θα χρησιμοποιούμε τον συμβολισμό  $\langle * \rangle_\Sigma$  για να δηλώσουμε το γεγονός ότι το  $*$  είναι κωδικοποιημένο στο αλφάβητο  $\Sigma$ <sup>1</sup>.

Έστω TM  $M = (Q, \{0, 1\}, \{\triangleright, \sqcup, 0, 1\}, \delta, q_0, q_{\text{ναι}}, q_{\text{όχι}})$ . Φυσικά μπορούμε να κωδικοποιήσουμε και τις TM που έχουν περισσότερα από τέσσερα σύμβολα στο αλφάβητο ταινίας τους. Θα κρατήσουμε όμως το μέγεθος του  $\Gamma$  στο ελάχιστο δυνατό για να διευκολύνουμε την παρουσίαση.

Αναφέραμε στο παρελθόν ότι η  $\delta$  περιέχει όλη την πληροφορία που χαρακτηρίζει την  $M$ . Θα ήταν πιο σωστό να πούμε ότι περιέχει όλη την «ουσιαστική» πληροφορία της  $M$ . Κάτι που δεν γίνεται με την πρώτη ματιά ορατό είναι ότι αν η  $M$  περιέχει καταστάσεις που είναι μη προσβάσιμες (δηλαδή για οποιαδήποτε λέξη  $w$  η  $M(w)$  δεν μεταβαίνει ποτέ σε αυτές) τότε αυτές προφανώς δεν θα εμφανίζονται στις μεταβάσεις της  $\delta$ . Το ίδιο συμβαίνει επίσης αν το  $\Gamma$  περιέχει σύμβολα που δεν χρησιμοποιούνται ποτέ.

Συνεπώς θα πρέπει, να μην να κωδικοποιήσουμε τη  $\delta$ , αλλά με τρόπο ώστε να αποτυπώνεται και η πληροφορία που ενδεχομένως της διαφεύγει. Για λόγους που θα φανούν στη συνέχεια, θέλουμε η κωδικοποίηση μιας TM να είναι μονοσύμαντη (Πρόταση 1.4.7). Αυτό δεν θα μπορούσε να γίνει εφικτό αν δεν καταγράφαμε στην κωδικοποίηση το πλήθος μη προσβάσιμων καταστάσεων ή μη χρησιμοποιούμενων συμβόλων.

Επιπλέον, παρατηρήστε ότι δεν μας ενδιαφέρουν τα «ονόματα» των στοιχείων των συνόλων  $Q$  και  $\Gamma$  παρά μόνο ο πληθάρειδμός των δύο συνόλων. Ο λόγος είναι ότι στην πραγματικότητα δεν έχει σημασία αν για παράδειγμα  $\Gamma = \{\triangleright, \sqcup, 0, 1, \#\}$  ή  $\Gamma = \{\triangleright, \sqcup, 0, 1, \times\}$ . Αυτό που έχει σημασία είναι η χρήση των συμβόλων  $\#$  και  $\times$ .

Πολύ σωστά κάποιος θα παρατηρήσει όμως ότι αν ορίσουμε δύο TM με τα παραπάνω αλφάβητα ταινίας (και όλα τα άλλα στοιχεία ίδια) τότε αυτές δεν θα ταυτίζονται συνολοθεωρητικά. Εμείς όμως χάριν απλότητας δεν θα διεισδύσουμε σε τέτοιες λεπτομέρειες, θεωρώντας τις δύο μηχανές ταυτόσημες (όπως επίσης θα κάναμε και για δύο προγράμματα με τις ίδιες ακριβώς εντολές, που χρησιμοποιούν όμως π.χ. διαφορετικά ονόματα μεταβλητών)<sup>2</sup>.

Προκειμένου να γίνει η παρουσίαση πιο κατανοητή, θα ξεκινήσουμε σε πρώτη φάση κωδικοποιώντας τη συνάρτηση  $\delta$  σε μία λέξη του αλφαβήτου  $\Sigma = \{0, 1, q, s, d, \#\}$  και έπειτα θα κωδικοποιήσουμε τα στοιχεία του  $\Sigma$  στο αλφάβητο  $\{0, 1\}$ :

- Κάθε κατάσταση του  $Q$  κωδικοποιείται από το  $q$  ακολουθούμενο από μία λέξη του

<sup>1</sup> Όπως θα δούμε λίαν συντόμως, το  $*$  μπορεί να είναι σύμβολο, λέξη, συνάρτηση ακόμα και TM.

<sup>2</sup> Ο σωστός τρόπος να διευθετήσουμε αυτήν τη λεπτομέρεια είναι να απαιτήσουμε τα στοιχεία των συνόλων  $Q, \Gamma$  να ανήκουν σε κάποιο προσυμφωνημένο σύνολο (τους φυσικούς αριθμούς για παράδειγμα) και να δώσουμε ξεχωριστή κωδικοποίηση για κάθε στοιχείο του. Έτσι θα μπορούμε στην κωδικοποίηση των TM να καταγράψουμε και ποια ακριβώς στοιχεία περιέχουν τα σύνολα  $Q, \Gamma$  (δες Άσκηση 1.25).

$\{0, 1\}$  μήκους  $|Q| - 1$ <sup>1</sup>. Η κωδικοποίηση της αρχικής κατάστασης θα περιέχει  $|Q| - 1$  μηδενικά, της  $q_{\text{ναι}}$  ένα μηδενικό ακολουθούμενο από  $|Q| - 2$  άσους και της  $q_{\text{όχι}}$   $|Q| - 1$  άσους:

$$\begin{aligned}\langle q_0 \rangle_{\Sigma} &= \overbrace{q00\cdots 00}^{|Q|-1\text{-φορές}} \\ \langle q_1 \rangle_{\Sigma} &= q00\cdots 01\end{aligned}$$

$$\begin{aligned}\langle q_2 \rangle_{\Sigma} &= q00\cdots 11 \\ &\vdots \\ \langle q_{\text{ναι}} \rangle_{\Sigma} &= q01\cdots 11 \\ \langle q_{\text{όχι}} \rangle_{\Sigma} &= q11\cdots 11\end{aligned}$$

- Κωδικοποιούμε τα σύμβολα του  $\{\triangleright, \sqcup, 0, 1\}$  ως εξής<sup>2</sup>:

$$\begin{aligned}\langle \triangleright \rangle_{\Sigma} &= s000 \\ \langle \sqcup \rangle_{\Sigma} &= s001 \\ \langle 0 \rangle_{\Sigma} &= s011 \\ \langle 1 \rangle_{\Sigma} &= s111\end{aligned}$$

- Κωδικοποιούμε τα  $A, \Delta$  ως εξής:

$$\begin{aligned}\langle A \rangle_{\Sigma} &= d0 \\ \langle \Delta \rangle_{\Sigma} &= d1\end{aligned}$$

- Κωδικοποιούμε κάθε μετάβαση  $(q, a, p, b, x) \in \delta$ , όπου  $a, b \in \{\triangleright, \sqcup, 0, 1\}$ ,  $q, p \in Q$  και  $x \in \{A, \Delta\}$  ως εξής:

$$\langle (q, a, p, b, x) \rangle_{\Sigma} = \langle q \rangle_{\Sigma} \langle a \rangle_{\Sigma} \langle p \rangle_{\Sigma} \langle b \rangle_{\Sigma} \langle x \rangle_{\Sigma}$$

- Τέλος, έστω  $\delta = \{\delta_1, \delta_2, \dots, \delta_k\}$ , κωδικοποιούμε τη  $\delta$  ως εξής:

$$\langle \delta \rangle_{\Sigma} = \langle \delta_1 \rangle_{\Sigma} \# \langle \delta_2 \rangle_{\Sigma} \# \cdots \# \langle \delta_k \rangle_{\Sigma}$$

<sup>1</sup> Ένας λόγος που θέλουμε να έχουμε το ίδιο πλήθος συμβόλων στην κωδικοποίηση όλων των καταστάσεων είναι ότι μας βολεύει κατά τη λειτουργία της καθολικής ΤΜ. Επίσης με αυτόν τον τρόπο μπορούμε να ελέγξουμε αν υπάρχουν μη προσβάσιμες καταστάσεις: Μετράμε το πλήθος ψηφίων που ακολουθούν το σύμβολο  $q$  και προσθέτουμε ένα για να βρούμε το  $|Q|$ . Έπειτα αφαιρούμε από το  $|Q|$  το πλήθος των διαφορετικών καταστάσεων που εμφανίζονται στην κωδικοποίηση της  $\delta$ .

<sup>2</sup> Αν το  $\Gamma$  είχε περισσότερα σύμβολα θα τα κωδικοποιούσαμε κατά τον ίδιο τρόπο. Πάλι, μετρώντας το πλήθος ψηφίων που ακολουθούν το σύμβολο  $s$  μπορούμε να βρούμε το  $|\Gamma|$ .

**Παράδειγμα 1.4.2.** Η συνάρτηση μετάβασης της TM του Παραδείγματος 1.2.26 (δες Σχήμα 1.2.8) κωδικοποιείται στη λέξη του  $\{0, 1, q, s, d, \#\}^*$ :

$$q00s011q00s011d1\#q00s001q01s001d1\#q00s111q11s111d1$$

Η παραπάνω κωδικοποίηση δυστυχώς δεν λαμβάνει υπόψιν κάποιες ιδιαίτερες περιπτώσεις TM. Θα πρέπει λοιπόν να τη βελτιώσουμε.

Η πρώτη περίπτωση είναι οι TM όπου η αρχική κατάσταση ταυτίζεται με την τερματική κατάσταση, όπως αυτή του Παραδείγματος 1.2.27 (Σχήμα 1.2.9). Σε αυτήν την περίπτωση το γεγονός ότι η  $q_0$  και η  $q_{\text{τατ}}$  (παραδείγματος χάρη) έχουν διαφορετική κωδικοποίηση μας απαγορεύει να «ταυτίσουμε» τις δύο καταστάσεις. Για αυτόν τον λόγο θα δηλώνουμε ρητά ποια είναι η αρχική κατάσταση στην αρχή της κωδικοποίησης (πριν από τη κωδικοποίηση της  $\delta$  δηλαδή), διαχωρίζοντάς την από την υπόλοιπη κωδικοποίηση με το σύμβολο  $\#$ .

**Παράδειγμα 1.4.3.** Δηλώνοντας και την αρχική κατάσταση της TM του Παραδείγματος 1.2.26 (δες Σχήμα 1.2.8) αυτή κωδικοποιείται στη λέξη του  $\{0, 1, q, s, d, \#\}^*$ :

$$q00\#q00s011q00s011d1\#q00s001q01s001d1\#q00s111q11s111d1$$

Παρατηρήστε ότι με τον τρόπο που κωδικοποιήσαμε το σύνολο καταστάσεων και το αλφάβητο ταινίας καταφέραμε να αποτυπώσουμε και τον πληθώρα των δύο συνόλων. Αυτό είναι απαραίτητο έτσι ώστε TM με την ίδια συνάρτηση μεταβάσεων αλλά με μη προσβάσιμες καταστάσεις ή μη χρησιμοποιούμενα σύμβολα να έχουν διαφορετική κωδικοποίηση. Μία ακόμα περίπτωση που θα πρέπει να λάβουμε υπόψιν μας είναι η περίπτωση που  $\delta = \emptyset$  (όταν έχουμε δηλαδή TM που υπολογίζει την ταυτοτική συνάρτηση, Παράδειγμα 1.2.2). Σε αυτήν την περίπτωση η κωδικοποίηση που αναφέραμε παραπάνω αποτυγχάνει! Θα διορθώσουμε το πρόβλημα προσθέτοντας πριν από την  $\langle \delta \rangle_\Sigma$  και τη δυαδική αναπαράσταση των αριθμών  $|Q|$  και  $|I|$  (συμβολισμός  $\text{bin}(|Q|)$  και  $\text{bin}(|I|)$  αντίστοιχα). Άρα τελικά:

$$\langle M \rangle_\Sigma = \text{bin}(|Q|)\# \text{bin}(|I|)\#\langle \text{Αρχική κατάσταση} \rangle_\Sigma \# \langle \delta \rangle_\Sigma$$

Με αυτόν τον τρόπο μπορούμε να κωδικοποιήσουμε και TM με κενή συνάρτηση μεταβάσεων.

**Παράδειγμα 1.4.4.** Η TM του Παραδείγματος 1.2.26 (δες Σχήμα 1.2.8) κωδικοποιείται στη λέξη του  $\{0, 1, q, s, d, \#\}^*$ :

$$11\#100\#q00\#q00s011q00s011d1\#q00s001q01s001d1\#q00s111q11s111d1$$

**Παρατήρηση 1.4.5.** Μπορούμε περαιτέρω να κωδικοποιήσουμε τα σύμβολα του  $\{0, 1, q, s, d, \#\}$  στο  $\{0, 1\}$ , όπως για παράδειγμα:

$$\begin{aligned} \langle 0 \rangle_{\{0,1\}} &= 001 \\ \langle 1 \rangle_{\{0,1\}} &= 010 \\ \langle q \rangle_{\{0,1\}} &= 011 \\ \langle s \rangle_{\{0,1\}} &= 100 \\ \langle d \rangle_{\{0,1\}} &= 101 \\ \langle \# \rangle_{\{0,1\}} &= 110 \end{aligned}$$

**Παράδειγμα 1.4.6.** Η ΤΜ του Παραδείγματος 1.2.26 (Σχήμα 1.2.8) κωδικοποιείται στη λέξη του  $\{0, 1\}^*$ :

```
010 010 110
010 001 001 110
011 001 001 110
011 001 001 100 001 001 010 011 001 010 100 001 001 010 101 010 110
011 001 001 100 001 010 010 011 001 001 100 001 010 010 101 010 110
011 001 001 100 010 010 010 011 010 010 100 010 010 010 101 010
```

(Η γραμμή αλλάζει μετά από κάθε #.) Παρατηρήστε ότι οι κωδικοποιήσεις των μεταβάσεων έχουν τοποθετηθεί ακολουθώντας τη λεξικογραφική διάταξη των επιμέρους κωδικοποιήσεων τους. Ο λόγος που αυτό είναι απαραίτητο θα φανεί στην Πρόταση που ακολουθεί (Πρόταση 1.4.7).

Η κωδικοποίηση που παρουσιάσαμε εξαρτάται από τη σειρά που έχουμε επιλέξει για τις πεντάδες της συνάρτησης μετάβασης  $\delta$ . Για να έχουμε μονοσήμαντη κωδικοποίηση θα πρέπει να συμφωνήσουμε λοιπόν σε μία συγκεκριμένη σειρά. Θα μπορούσαμε παραδείγματος χάριν να ακολουθήσουμε τη σειρά που έχει μία πεντάδα στη λεξικογραφική διάταξη όταν κωδικοποιηθεί σε λέξη του  $\{0, 1\}^*$  (όπως κάναμε στο παράδειγμα). Συνεπώς καταλήγουμε στην ακόλουθη Πρόταση.

**Πρόταση 1.4.7.** Κάθε ΤΜ κωδικοποιείται μονοσήμαντα σε μία λέξη του  $\{0, 1\}^*$ .

**Παρατήρηση 1.4.8.** Ακολουθώντας την «αντίστροφη» διαδικασία από αυτήν που ακολουθήσαμε στην κωδικοποίηση των ΤΜ μπορούμε, πρώτον, να ελέγξουμε αν μια λέξη του  $\{0, 1\}^*$  αποτελεί κωδικοποίηση ΤΜ και, δεύτερον, αν όντως αποτελεί κωδικοποίηση, να δούμε τις μεταβάσεις της. Αυτή η διαδικασία καλείται *αποκωδικοποίηση*.

**Σημείωση 1.4.9.** Υπάρχουν πολύ πιο «αποδοτικοί» τρόποι να κωδικοποιήσουμε τις ΤΜ από αυτόν που είδαμε <sup>1</sup>, όμως το επίδετο *αποδοτικός* σε αυτές τις σημειώσεις χρησιμοποιείται μόνο όπου θέλουμε να τονίσουμε ότι δεν ενδιαφερόμαστε στο να κάνουμε τον υπολογισμό πιο αποδοτικό κατ' οποιονδήποτε τρόπο.

**Σύμβαση 1.4.10.** Όταν το αλφάβητο στο οποίο έχουμε κωδικοποιήσει μία ΤΜ εννοείται από τα συμφραζόμενα θα χρησιμοποιούμε τον απλουστευμένο συμβολισμό  $\langle M \rangle$ .

**Ορισμός 1.4.11.** Θεωρούμε το σύνολο  $\mathcal{G} = \{w \in \{0, 1\}^* \mid \text{Υπάρχει ΤΜ } M \text{ τέτοια ώστε } w = \langle M \rangle\}$  <sup>2</sup>. Μπορούμε να διατάξουμε τις λέξεις του  $\mathcal{G}$  σύμφωνα με τη λεξικογραφική διάταξη του  $\{0, 1\}^*$ , ορίζοντας έτσι μία συνάρτηση Gödel :  $\mathcal{G} \rightarrow \mathbb{N}$ , όπου:

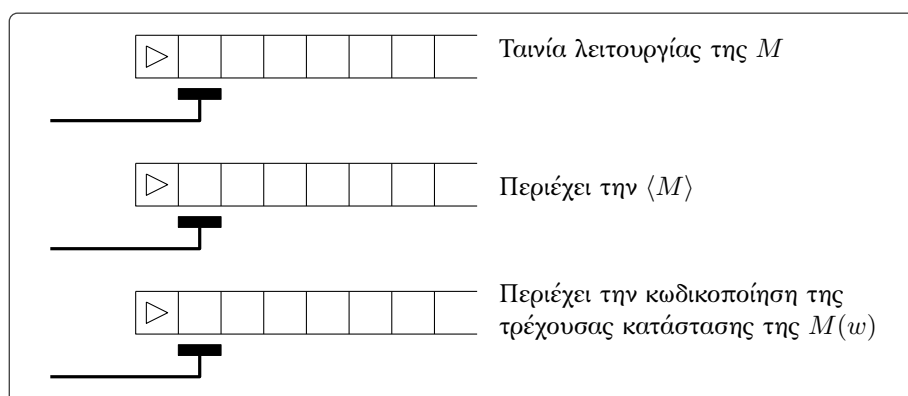
$$\text{Gödel}(M) = \text{«Η σειρά εμφάνισης της } \langle M \rangle \text{ στο } \mathcal{G} \text{ σύμφωνα με τη λεξικογραφική διάταξη του } \{0, 1\}^* \text{»} \quad ^3$$

Το  $\text{Gödel}(M)$  καλείται *αριθμός Gödel* της  $M$ .

<sup>1</sup> Που θα παρήγαγαν για παράδειγμα κωδικοποιήσεις με πολύ μικρότερο μήκος.

<sup>2</sup> Χάριν απλότητας θα γράφαμε  $\mathcal{G} = \{\langle M \rangle \in \{0, 1\}^* \mid \text{Η } M \text{ είναι ΤΜ}\}$ .

<sup>3</sup> Για να απλοποιήσουμε λίγο τον συμβολισμό γράφουμε  $\text{Gödel}(M)$  και όχι  $\text{Gödel}(\langle M \rangle)$ .



Σχήμα 1.4.1: Οι τρεις ταινίες μίας Καθολικής TM (με είσοδο  $\langle M, w \rangle$ ).

**Παρατήρηση 1.4.12.** Ισχύει ότι  $\mathcal{G} \in \text{REC}$  και ότι η συνάρτηση Gödel είναι υπολογίσιμη, 1-1 και επί <sup>1</sup>.

Χρησιμοποιώντας τη συνάρτηση Gödel μπορούμε να δείξουμε (μη-κατασκευαστικά) ότι η απάντηση στο Ερώτημα 2 (σελίδα 29) είναι καταφατική.

**Θεώρημα 1.4.13.** Υπάρχει γλώσσα  $L \in 2^{\{0,1\}^*} \setminus \text{RE}$ .

*Απόδειξη.* Αφού η Gödel είναι μια (ολική) 1-1 και επί συνάρτηση από το  $\mathcal{G}$  στο  $\mathbb{N}$  έπεται ότι  $|\mathcal{G}| = \aleph_0$ . Από την Παρατήρηση 0.2.16 και το Θεώρημα 0.1.17 προκύπτει ότι  $|2^{\{0,1\}^*}| > \aleph_0$ . Ως συνέπεια δεν μπορεί να υπάρχει 1-1 και επί συνάρτηση από το  $2^{\{0,1\}^*}$  στο  $\mathcal{G}$ . Οπότε υπάρχει γλώσσα  $L \in 2^{\{0,1\}^*}$  για την οποία δεν υπάρχει TM  $M$  με  $L(M) = L$  <sup>2</sup>.  $\square$

**Παρατήρηση 1.4.14.** Αφού το σύνολο των συναρτήσεων από το  $\{0,1\}^*$  στο  $\{0,1\}^*$  έχει πληθάρδιο τουλάχιστον τον πληθάρδιο του  $2^{\{0,1\}^*}$  <sup>3</sup>, έπεται επίσης ότι υπάρχουν και μη-υπολογίσιμες συναρτήσεις.

## Ορισμός Καθολικής Μηχανής Turing

**Ορισμός 1.4.15.** Καθολική Μηχανή Turing (συμβολισμός  $\boxed{M}$ ) είναι μία TM τριών ταινιών (Σχήμα 1.4.1) με αλφάβητο εισόδου το  $\{0,1\}^*$ , που δέχεται ως είσοδο την κωδικοποίηση μίας TM  $M = (Q, \Sigma, \Gamma, \delta, q_0, q_{\text{ναι}}, q_{\text{όχι}})$  και μίας λέξης  $w \in \Sigma^*$  (την είσοδο για την  $M$ ) στο  $\{0,1\}^*$ , συμβολισμός  $\langle M, w \rangle$  <sup>4</sup>, και μπορεί να προσομοιώσει την  $M(w)$ . Η 1<sup>η</sup> ταινία της  $\boxed{M}$  περιέχει την είσοδό της. Στην αρχή του υπολογισμού  $\boxed{M}(\langle M, w \rangle)$  η  $\boxed{M}$  κάνει τα ακόλουθα:

1. Αντιγράφει την  $\langle M \rangle$  στην 2<sup>η</sup> ταινία και αφήνει την  $\langle w \rangle$  στην 1<sup>η</sup>.

<sup>1</sup> Οι λεπτομέρειες της απόδειξης αυτής της παρατήρησης αφήνονται ως άσκηση (Άσκηση 1.5).

<sup>2</sup> Για λόγους πληρότητας πρέπει να τονίσουμε, μία ακόμα φορά, ότι κάθε TM κωδικοποιείται μονοσήμαντα στο  $\{0,1\}^*$  και ότι αναγνωρίζει ακριβώς μία γλώσσα.

<sup>3</sup> Το σύνολο αυτό περιέχει για κάθε στοιχείο  $L \in 2^{\{0,1\}^*}$  και μία συνάρτηση, τη  $\chi_L$ .

<sup>4</sup> Γράφουμε  $\langle M, w \rangle$  θάζοντας «κάτω από το χαλί» τις λεπτομέρειες που αποκρύπτει αυτός ο συμβολισμός.

2. Γράφει  $\langle q_0 \rangle$  στην 3<sup>η</sup> ταινία.

Έπειτα, σε κάθε βήμα προσομοίωσης (ενός βήματος της  $M(w)$ ) η  $\mathbb{M}(\langle M, w \rangle)$  κάνει τα ακόλουθα:

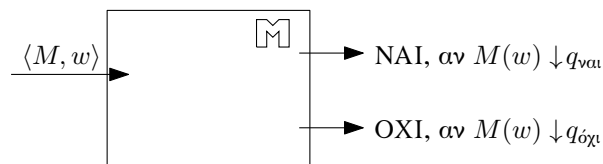
1. Διαβάζει την κατάσταση που γράφει η 3<sup>η</sup> ταινία και το (κωδικοποιημένο) σύμβολο της 1<sup>ης</sup> ταινίας (προσπελάσει δηλαδή όλα τα κελιά της 1<sup>ης</sup> ταινίας που αποτελούν την κωδικοποίηση του συμβόλου που διαβάζει η  $M$ ).
2. Ψάχνει μετάβαση της  $M$  στην 2<sup>η</sup> ταινία που να ξεκινάει με τον συνδυασμό κατάστασης και συμβόλου που διάβασε.
3. - Αν βρει τέτοια μετάβαση:
  - (α') γράφει την κωδικοποίηση της καινούριας κατάστασης στην 3<sup>η</sup> ταινία,
  - (β') γράφει την κωδικοποίηση του καινούριου συμβόλου στη θέση της κωδικοποίησης του παλιού <sup>1</sup> και
  - (γ') κινεί την κεφαλή της 1<sup>ης</sup> ταινίας είτε στο προηγούμενο σύμβολο της 1<sup>ης</sup> ταινίας (όχι κατ' ανάγκη στο προηγούμενο κελί <sup>2</sup>) είτε στο επόμενο, ανάλογα με το αν η μετάβαση είχε  $A$  ή  $\Delta$ .

- Αν δεν βρει τέτοιο συνδυασμό και η κατάσταση της 3<sup>ης</sup> ταινίας είναι τερματική, πάει στην  $q_{\text{ναι}}$  αν η 3<sup>η</sup> ταινία περιέχει την  $\langle q_{\text{ναι}} \rangle$  και στην  $q_{\text{όχι}}$  αν περιέχει την  $\langle q_{\text{όχι}} \rangle$ . Σε αντίθετη περίπτωση κολλάει.

4. Γυρίζει τις κεφαλές της 2<sup>ης</sup> και 3<sup>ης</sup> ταινίας στο  $\triangleright$ .

#### Συμβολισμός 1.4.16 (Κουτάκια, συνέχεια...).

7. Έστω TM  $M$  και  $w \in \Sigma^*$ . Θα γράφουμε:



#### Εφαρμογή Καθολικής Μηχανής Turing

Μπορούμε να χρησιμοποιήσουμε την καθολική TM (ή παραλλαγές αυτής) για να κά-  
νουμε διάφορους ελέγχους όσον αφορά τον υπολογισμό μίας TM  $M$  με κάποια είσοδο  $w$ .

<sup>1</sup> Παρατηρήστε ότι δεν θα χρειαστεί ποτέ να δημιουργήσουμε (ή να μειώσουμε) χώρο στην ταινία για να φέρουμε εις πέρας αυτήν την εργασία, καθώς οι κωδικοποιήσεις όλων των συμβόλων του αλφαβήτου ταινίας έχουν το ίδιο μήκος.

<sup>2</sup> Η κεφαλή πάντα κινείται το ίδιο πλήθος βημάτων, λόγω πάλι του τρόπου που κωδικοποιήσαμε τα σύμβολα του αλφαβήτου ταινίας.

|            | 0               | 1               | 2               | 3               | 4               | ...      |
|------------|-----------------|-----------------|-----------------|-----------------|-----------------|----------|
| $\epsilon$ | $(\epsilon, 0)$ | $(\epsilon, 1)$ | $(\epsilon, 2)$ | $(\epsilon, 3)$ | $(\epsilon, 4)$ | ...      |
| 0          | $(0, 0)$        | $(0, 1)$        | $(0, 2)$        | $(0, 3)$        | $(0, 4)$        | ...      |
| 1          | $(1, 0)$        | $(1, 1)$        | $(1, 2)$        | $(1, 3)$        | $(1, 4)$        | ...      |
| 00         | $(00, 0)$       | $(00, 1)$       | $(00, 2)$       | $(00, 3)$       | $(00, 4)$       | ...      |
| 01         | $(01, 0)$       | $(01, 1)$       | $(01, 2)$       | $(01, 3)$       | $(01, 4)$       | ...      |
| $\vdots$   | $\vdots$        | $\vdots$        | $\vdots$        | $\vdots$        | $\vdots$        | $\ddots$ |

**Σχήμα 1.4.2:** Η σειρά με την οποία επιστρέφει η  $h$  τα ζευγάρια του  $\{0, 1\}^* \times \mathbb{N}$ .

Για παράδειγμα μπορούμε να ελέγξουμε σε πόσα βήματα η  $M(w)$  θα τερματίσει (εφόσον τερματίσει) ή να τρέξουμε την  $M(w)$  για κάποιο συγκεκριμένο αριθμό βημάτων  $t$  και να ελέγξουμε αν θα τερματίσει σε το πολύ  $t$  βήματα. Σε αυτήν την περίπτωση θα αναφέρουμε τον έλεγχο που κάνει η  $\mathbb{M}$  μέσα στο «κουτάκι» της.

**Σύμβαση 1.4.17.** Όπως φαίνεται στον Συμβολισμό 1.4.16, χάριν απλότητας θα γράφουμε ότι η είσοδος της  $\mathbb{M}$  είναι πάντα κωδικοποίηση TM και λέξης. Αν θέλουμε να είμαστε πιο τυπικοί η  $\mathbb{M}$  θα πρέπει πρώτα να ελέγξει ότι η είσοδός της έχει όντως αυτήν τη μορφή.

**Ορισμός 1.4.18.** Θεωρούμε τη συνάρτηση  $h : \{0, 1\}^* \times \mathbb{N} \rightarrow \{0, 1\}^* \times \mathbb{N}$  που επιστρέφει το επόμενο ζευγάρι λέξης και φυσικού αριθμού σύμφωνα με τον πίνακα του Σχήματος 1.4.2.

**Παρατήρηση 1.4.19.** Η  $h$  είναι υπολογίσιμη, έστω από την TM  $M_h$  (Άσκηση 1.6).

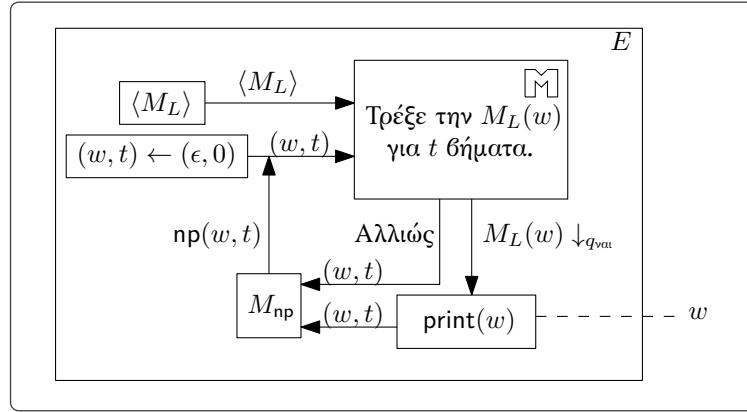
Ένα παράδειγμα εφαρμογής της  $\mathbb{M}$  είναι η απόδειξη της κατεύθυνσης ( $\Rightarrow$ ) του Θεωρήματος 1.2.47.

**Απόδειξη Θεωρήματος 1.2.47.** ( $\Rightarrow$ ) Έστω  $M_L$  η TM που ημι-αποφασίζει την  $L$  και  $M_h$  η TM της Παρατήρησης 1.4.19. Κατασκευάζουμε<sup>1</sup> τον απαριθμητή  $E$  του Σχήματος 1.4.3 και παρατηρούμε ότι:

- Για κάθε λέξη  $x \in L$  υπάρχει  $t_x \in \mathbb{N}$  τέτοιο ώστε  $M_L(x) \downarrow_{q_{\text{ναι}}}^{t_x}$ . Το ζευγάρι  $(w, t)$  κάποια στιγμή θα γίνει  $(x, t_x)$ , άρα ο έλεγχος της  $\mathbb{M}$  θα είναι τελικά επιτυχής για την  $x$  και ο  $E$  θα την τυπώσει.
- Έστω  $x \notin L$ . Αφού ο  $E$  τυπώνει μόνο λέξεις που αποδέχεται η  $M_L$  (και η  $M_L$  αναγνωρίζει την  $L$ ), ο  $E$  δεν θα τυπώσει ποτέ την  $x$ .

Συνεπώς ο  $E$  απαριθμεί την  $L$ . □

<sup>1</sup> Ο όρος «κατασκευάζουμε» εδώ είναι ιδιαίτερα παραπλανητικός. Για να κατασκευάσουμε τον  $E$  πρέπει πρώτα να έχουμε στα χέρια μας την  $M_L$ . Είναι προφανές ότι δοσμένης μιας αναγνωρίσιμης γλώσσας δεν υπάρχει τρόπος να κατασκευάσουμε μία TM που να την ημι-αποφασίζει (ξέρουμε ότι υπάρχει τουλάχιστον μία αλλά δεν είναι δυνατό να την κατασκευάσουμε). Ο κυριότερος όγκος των «μαθηματικών» που περιέχουν αυτές οι σημειώσεις είναι μη-κατασκευαστικά. Θα μπορούσαμε να πούμε ότι μοιάζουν περισσότερο με την *Ανάλυση* και όχι με τα *Διακριτά Μαθηματικά* (όπως θα περίμενε κάποιος σε σημειώσεις που προσπαθούν – υπό μία ερμηνεία – να οριοθετήσουν την υπολογιστική δυνατότητα των H/Y).



**Σχήμα 1.4.3:** Ο απαριθμητής  $E$  που απαριθμεί την  $L$  όταν η ΤΜ  $M_L$  την ημι-αποφασίζει. Γράφουμε  $\text{print}(w)$  αντί για το «Σθήσε τη δεύτερη ταινία γράψε  $w$  και πήγαινε  $q_{\text{out}}$ » που είχαμε γράψει στον απαριθμητή του Σχήματος 1.2.21.

Μια άλλη εφαρμογή της  $\mathbb{M}$  είναι η απόδειξη της ισοδυναμίας μη-ντετερμινιστικών και ντετερμινιστικών ΤΜ. Παρατηρήστε ότι για να κωδικοποιήσουμε μία μη-ντετερμινιστική ΤΜ μπορούμε να ακολουθήσουμε ακριβώς τα βήματα που κάναμε για τις ντετερμινιστικές ΤΜ (το γεγονός ότι έχουμε σχέση αντί για συνάρτηση μετάβασης δεν αλλοιώνει καθόλου τις ιδέες της Παραγράφου 1.4). Έτσι μπορούν και αυτές να αποτελέσουν είσοδο σε μία καθολική μηχανή Turing.

**Απόδειξη Θεωρήματος 1.3.14.** <sup>1</sup> Έστω ΝΤΜ  $N = (Q, \Sigma, \Gamma, \delta, q_0, q_{\text{ναι}}, q_{\text{όχι}})$ . Η ΤΜ  $M$  του Σχήματος 1.4.4 αναγνωρίζει την  $L(N)$ . Στην «προσομοίωση» της  $N$  με την καθολική μηχανή ελέγχονται όλοι οι κλάδοι μη ντετερμινισμού <sup>2</sup>, για ένα πεπερασμένο πλήθος βημάτων (το πολύ  $t$ ) κάθε φορά.  $\square$

## 1.5 Κλειστότητα REC και RE

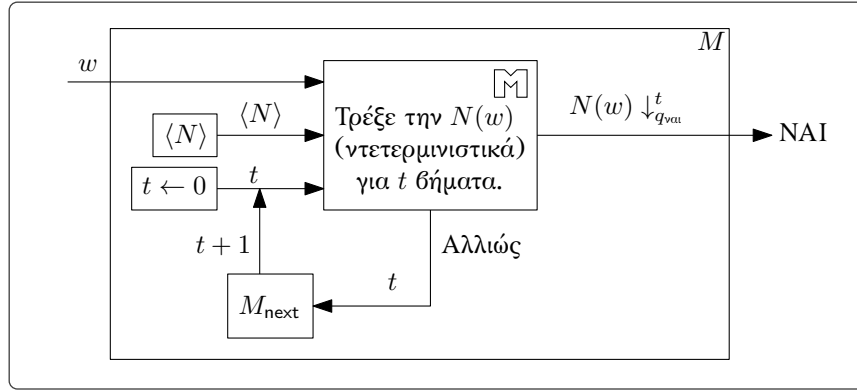
Κλείνουμε αυτό το κεφάλαιο με μερικά θεωρήματα που βρίσκουν μεγάλη εφαρμογή στις προτάσεις και στις ασκήσεις αυτών των σημειώσεων. Πέρα από τις ιδιότητες κλειστότητας που αναφέρονται εδώ, υπάρχουν αρκετές ακόμα στις ασκήσεις του κεφαλαίου.

**Θεώρημα 1.5.1.** Έστω  $L_1, L_2 \subseteq \{0, 1\}^*$ .

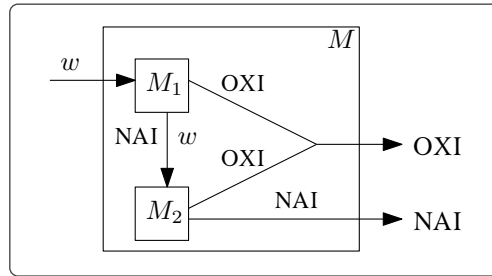
- i. Αν  $L_1, L_2 \in \text{REC}$  τότε  $L_1 \cap L_2 \in \text{REC}$ .
- ii. Αν  $L_1, L_2 \in \text{RE}$  τότε  $L_1 \cap L_2 \in \text{RE}$ .

<sup>1</sup> Πάλι θα δείξουμε την περίπτωση όπου η ΝΤΜ ημι-αποφασίζει μία γλώσσα.

<sup>2</sup> Η σειρά με την οποία ελέγχονται οι μη-ντετερμινιστικοί κλάδοι είναι μια λεπτομέρεια που δεν μας απασχολεί ιδιαίτερα. Θα την βάλουμε και αυτή «κάτω από το χαλί», όπως και τόσες άλλες.



**Σχήμα 1.4.4:** Η ντετερμινιστική ΤΜ που αποφασίζει την  $L(N)$ . Εδώ η  $M_{\text{next}}$  δέχεται ως είσοδο τη δυαδική αναπαράσταση ενός φυσικού αριθμού και επιστρέφει (τη δυαδική αναπαράσταση) του επόμενου φυσικού αριθμού (από εδώ και στο εξής θα γράφουμε πιο απλά:  $t \leftarrow t + 1$ ).



**Σχήμα 1.5.1:** Η ΤΜ  $M$  που αποφασίζει (ημι-αποφασίζει) την  $L_1 \cap L_2$ .

**Απόδειξη.** i. - ii. <sup>1</sup> Έστω  $M_1, M_2$  οι ΤΜ που αποφασίζουν (ημι-αποφασίζουν) τις  $L_1, L_2$  αντίστοιχα. Η ΤΜ  $M$  του Σχήματος 1.5.1 αποφασίζει (ημι-αποφασίζει) την  $L_1 \cap L_2$ .  $\square$

**Θεώρημα 1.5.2.** Έστω  $L_1, L_2 \subseteq \{0, 1\}^*$ .

- i. Αν  $L_1, L_2 \in \text{REC}$  τότε  $L_1 \cup L_2 \in \text{REC}$ .
- ii. Αν  $L_1, L_2 \in \text{RE}$  τότε  $L_1 \cup L_2 \in \text{RE}$ .

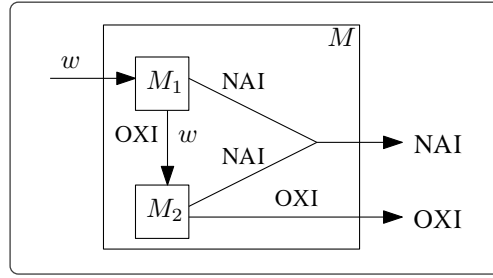
**Απόδειξη.** i. Έστω  $M_1, M_2$  οι ΤΜ που αποφασίζουν τις  $L_1, L_2$  αντίστοιχα. Η ΤΜ  $M$  του Σχήματος 1.5.2 αποφασίζει την  $L_1 \cup L_2$ .

ii. Έστω  $M_1, M_2$  οι ΤΜ που ημι-αποφασίζουν τις  $L_1, L_2$  αντίστοιχα. Η ΤΜ  $M$  του Σχήματος 1.5.3 ημι-αποφασίζει την  $L_1 \cup L_2$ .  $\square$

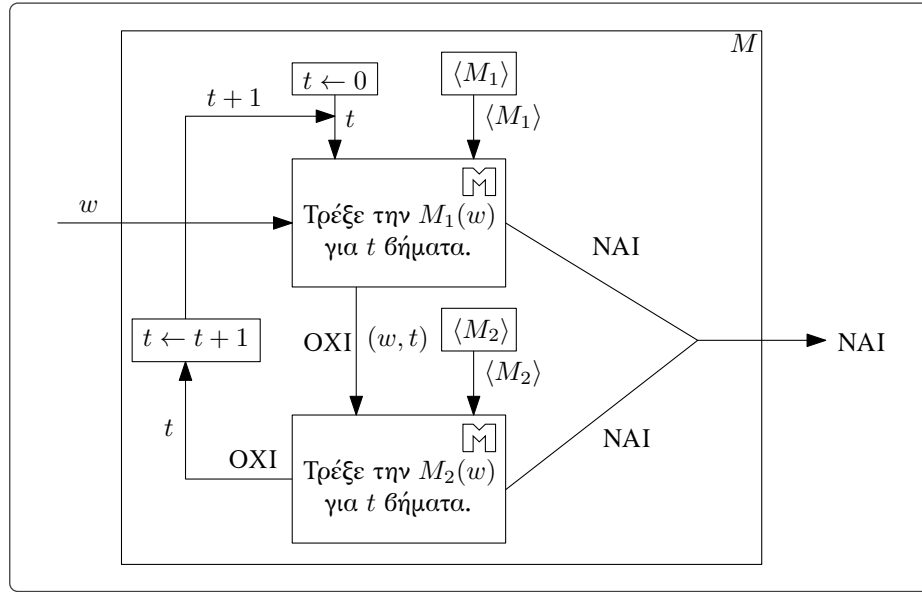
**Θεώρημα 1.5.3.** Έστω  $L \subseteq \{0, 1\}^*$ .  $L \in \text{REC}$  ανν  $\bar{L} \in \text{REC}$ .

**Απόδειξη.** ( $\Leftrightarrow$ ) Έστω  $M_L$  η ΤΜ που αποφασίζει την  $L$ . Η ΤΜ  $M_{\bar{L}}$  του Σχήματος 1.5.4 αποφασίζει την  $\bar{L}$ .  $\square$

<sup>1</sup> Η απόδειξη είναι ίδια και για τους δύο ισχυρισμούς.



Σχήμα 1.5.2: Η ΤΜ  $M$  που αποφασίζει την  $L_1 \cup L_2$ .



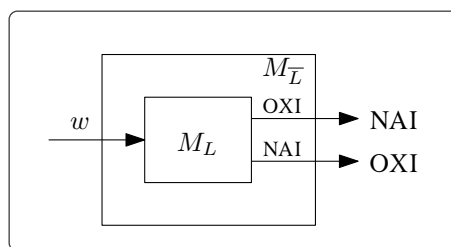
Σχήμα 1.5.3: Η ΤΜ  $M$  που ημι-αποφασίζει την  $L_1 \cup L_2$ .

Ένα ενδιαφέρον ερώτημα είναι το αν ισχύει κάτι αντίστοιχο με το Θεώρημα 1.5.3 και για την κλάση RE. Δηλαδή αν ισχύει ότι  $L \in \text{RE}$  αν  $\bar{L} \in \text{RE}$ . Θα δούμε στη συνέχεια ότι η απάντηση είναι αρνητική, καθώς υπάρχουν γλώσσες που ανήκουν στο RE αλλά το συμπλήρωμά τους δεν ανήκει στο RE. Για την ακρίβεια οι μόνες γλώσσες του RE για τις οποίες ισχύει αυτή η διπλή συνεπαγωγή είναι ακριβώς οι γλώσσες του REC. Το συμπέρασμα αυτό προκύπτει άμεσα από το Θεώρημα που ακολουθεί<sup>1</sup>.

**Θεώρημα 1.5.4.** Έστω  $L \subseteq \{0, 1\}^*$ . Αν  $L \in \text{RE}$  και  $\bar{L} \in \text{RE}$  τότε  $L \in \text{REC}$ .

Η απόδειξη του Θεωρήματος αυτού είναι αντίστοιχη με την απόδειξη του Θεωρήματος 1.5.2 (το ii.) και αφήνεται ως άσκηση (Άσκηση 1.7).

<sup>1</sup> Πως;



Σχήμα 1.5.4: Η ΤΜ  $M_{\bar{L}}$  που αποφασίζει την  $\bar{L}$ .

## Ασκήσεις

1.1 (★☆☆). Με  $\text{bin}(n)$  συμβολίζουμε τη δυαδική αναπαράσταση του αριθμού  $n \in \mathbb{N}$ . Τροποποιήστε το διάγραμμα καταστάσεων της ΤΜ του Παραδείγματος 1.2.8 έτσι ώστε να υπολογίζει τη συνάρτηση  $s : \{0, 1\}^* \rightarrow \{0, 1\}^*$  με

$$s(x) = \begin{cases} \text{bin}(n+1) & , \text{αν υπάρχει } n \in \mathbb{N} \text{ τέτοιο ώστε } x = \text{bin}(n) \\ 00 & , \text{αλλιώς} \end{cases}$$

1.2 (☆☆☆). Αποδείξτε την Πρόταση 1.2.40.

1.3 (★☆☆). Θεωρήστε ΤΜ που πέρα από τις κατεύθυνσης αριστερά και δεξιά η κεφαλή μπορεί να μείνει και στάσιμη σε ένα βήμα υπολογισμού. Δείξτε ότι για κάθε ΤΜ με αυτή την περιγραφή υπάρχει ισοδύναμη μονοταϊακή ΤΜ.

1.4 (★★☆). Θεωρήστε ΤΜ που η ταινία τους είναι άπειρη και από τις δύο πλευρές, δεν υπάρχει το μαξιλαράκι και φυσικά δεν υπάρχει ο περιορισμός ότι δεν μπορούμε να κινηθούμε αριστερότερα από αυτό. Δείξτε ότι για κάθε ΤΜ με αυτή την περιγραφή υπάρχει ισοδύναμη μονοταϊακή ΤΜ.

1.5 (☆☆☆). Αποδείξτε την Πρόταση 1.4.12.

1.6 (☆☆☆). Αποδείξτε την Παρατήρηση 1.4.19.

1.7 (★☆☆). Αποδείξτε το Θεώρημα 1.5.4.

1.8 (★☆☆). τω  $L_1, L_2 \subseteq \{0, 1\}^*$ . Δείξτε ότι:

1. Αν  $L_1, L_2 \in \text{REC}$  τότε  $L_1 L_2 \in \text{REC}$ .
2. Αν  $L_1, L_2 \in \text{RE}$  τότε  $L_1 L_2 \in \text{RE}$ .

1.9 (★☆☆). Έστω  $L \subseteq \{0, 1\}^*$  και  $L^R = \{w \in \{0, 1\}^* \mid w^R \in L\}$ . Δείξτε ότι:

1. Αν  $L \in \text{REC}$  τότε  $L^R \in \text{REC}$ .

2. Αν  $L \in \text{RE}$  τότε  $L^R \in \text{RE}$ .

**1.10 (★☆☆).** Έστω  $L \subseteq \{0, 1\}^*$  και  $L^p = \{w \in L \mid w = w^R\}$ . Δείξτε ότι:

1. Αν  $L \in \text{REC}$  τότε  $L^p \in \text{REC}$ .

2. Αν  $L \in \text{RE}$  τότε  $L^p \in \text{RE}$ .

**1.11 (★★☆).** Έστω  $L \subseteq \{0, 1\}^*$ . Δείξτε ότι:

1. Αν  $L \in \text{REC}$  τότε  $L^* \in \text{REC}$ .

2. Αν  $L \in \text{RE}$  τότε  $L^* \in \text{RE}$ .

**1.12 (★☆☆).** Έστω  $f : \{0, 1\}^* \rightarrow \{0, 1\}^*$  1-1, επί, υπολογίσιμη συνάρτηση. Δείξτε ότι η  $f^{-1}$  είναι υπολογίσιμη.

**1.13 (★☆☆).** Έστω  $f : \{0, 1\}^* \rightarrow \{0, 1\}^*$  υπολογίσιμη συνάρτηση. Κατασκευάστε απαριδιασμένη που απαριδιασεί το σύνολο  $\text{dom}(f)$ .

**1.14 (★☆☆).** Έστω  $L \subseteq \{0, 1\}^*$ . Δείξτε ότι  $L \in \text{RE}$  αν και μόνο αν  $L = \{x \in \{0, 1\}^* \mid \exists y \in \{0, 1\}^* (\langle x, y \rangle \in B)\}$ , όπου  $B \in \text{REC}$ .

**1.15 (★★☆).** Θεωρήστε τη γλώσσα:

$$L = \{\langle M \rangle \in \{0, 1\}^* \mid \text{Υπάρχει λέξη } w \in \{0, 1\}^* \text{ για την οποία η } M(w) \text{ τερματίζει σε το πολύ } |\langle M \rangle| \text{-βήματα}\}$$

Δείξτε ότι  $L \in \text{REC}$ .

**1.16 (★★☆).** Δείξτε ότι:

1. Κάθε άπειρη αναδρομική γλώσσα είναι η ξένη ένωση δύο άπειρων αναδρομικών γλωσσών.

2. Κάθε άπειρη αναδρομικά απαριδιασμένη γλώσσα είναι η ξένη ένωση δύο άπειρων αναδρομικά απαριδιασμένων γλωσσών.

**1.17 (★★☆).** Έστω  $A, B, C \subseteq \{0, 1\}^*$ . Λέμε ότι η  $C$  διαχωρίζει τις  $A$  και  $B$  αν  $A \subseteq C$  και  $B \subseteq \overline{C}$ .

1. Βρείτε  $A, B \in \text{RE}$  με  $A \cap B = \emptyset$  για τις οποίες δεν υπάρχει  $C \in \text{REC}$  που τις διαχωρίζει.

2. Έστω  $A, B \subseteq \{0, 1\}^*$  με  $A \cap B = \emptyset$  και  $\overline{A}, \overline{B} \in \text{RE}$ . Δείξτε ότι υπάρχει  $C \in \text{REC}$  που τις διαχωρίζει.

**1.18 (★☆☆).** Θεωρήστε τη γλώσσα:

$$L = \{ \langle M, w, n \rangle \in \{0, 1\}^* \mid n \geq 1 \text{ και κατά τον υπολογισμό } M(w) \text{ η κεφαλή επισκέπτεται τη } n\text{-οστή δέση της ταινίας} \}$$

Δείξτε ότι  $L \in \text{REC}$ .

**1.19 (★★★).** Δείξτε ότι αν ένα σύνολο  $A \subseteq \mathcal{G}$  δεν περιέχει κωδικοποιήσεις ισοδύναμων TM και είναι αναδρομικά απαριθμήσιμο, τότε υπάρχει  $B \subseteq \mathcal{G}$  τέτοιο ώστε:

- για κάθε  $\langle M \rangle \in A$  υπάρχει μοναδική TM  $M'$  ισοδύναμη της  $M$  με  $\langle M' \rangle \in B$ ,
- η  $B$  είναι αναδρομική γλώσσα.

**1.20 (★★★).** Δείξτε ότι υπάρχουν άπειρες το πλήθος αναδρομικά απαριθμήσιμες γλώσσες  $L \subseteq \Sigma^*$  τέτοιες ώστε η  $\bar{L}$  να είναι άπειρη γλώσσα αλλά κάθε αναδρομικά απαριθμήσιμο υποσύνολο της  $\bar{L}$  να είναι πεπερασμένο.

**1.21 (★★☆).** Θεωρήστε τα σύνολα

$$K = \{ w \in \{0, 1\}^* \mid w \text{ δυαδική αναπαράσταση του αριθμού } n \text{ και } M_n(w) \downarrow \}$$

$$R = \{ w \in \{0, 1\}^* \mid w \text{ δυαδική αναπαράσταση του αριθμού } n \text{ και } \text{dom}(\phi_{M_n}) \in \text{REC} \}$$

όπου με  $M_n$  συμβολίζουμε την TM με αριθμό Gödel  $n$  και με  $\phi_{M_n}$  τη συνάρτηση που υπολογίζει η  $M_n$  (δες Ορισμό 1.2.13). Εξετάστε αν ισχύουν τα ακόλουθα:

1.  $R \subseteq K$ .
2.  $R \cap K = \emptyset$ .
3. Υπάρχει 1-1 και επί συνάρτηση  $f : K \rightarrow \bar{K}$ .

**1.22 (★☆☆).** Δείξτε ότι η συνάρτηση  $f : \{0, 1\}^* \rightarrow \{0, 1\}^*$  με:

$$f(x) = \begin{cases} 1, & \text{αν } x \text{ δυαδική αναπαράσταση του αριθμού } n \text{ και υπάρχει } w \in \{0, 1\}^* \\ & \text{τέτοιο ώστε } M_n(w) \downarrow \\ \perp, & \text{αλλιώς} \end{cases}$$

όπου  $M_n$  είναι η TM με αριθμό Gödel  $n$ , είναι υπολογίσιμη.

**1.23 (★☆☆).** Δείξτε ότι η συνάρτηση  $f : \{0, 1\}^* \rightarrow \{0, 1\}^*$  με:

$$f(x) = \begin{cases} x, & \text{αν } x \text{ δυαδική αναπαράσταση του αριθμού } n \text{ και } |L(M_n)| \geq n \\ \perp, & \text{αλλιώς} \end{cases}$$

όπου  $M_n$  είναι η TM με αριθμό Gödel  $n$ , είναι υπολογίσιμη.

**1.24 (★☆☆).** Έστω  $f : \{0, 1\}^* \rightarrow \{0, 1\}^*$  η οποία είναι υπολογίσιμη και φθίνουσα (ως προς τη λεξικογραφική διάταξη του  $\{0, 1\}$ ) στο  $\text{dom}(f)$ . Δείξτε ότι  $\text{im}(f) \in \text{REC}$ . Επιπλέον δείξτε ότι για κάθε γλώσσα  $L \subseteq \{0, 1\}^*$ , ισχύει ότι  $f(L) \in \text{REC}$ .

**1.25 (★☆☆).** Έστω TM  $M = (Q, \Sigma, \Gamma, \delta, q_0, q_{\text{ναι}}, q_{\text{όχι}})$ . Υποθέτουμε ότι  $\Gamma, Q \subseteq \mathbb{N}$  και κωδικοποιούμε την  $M$  με μια λέξη του αλφαβήτου  $K = \{0, 1, [, ], \langle \rangle, ;\}$  ως εξής:

- Την κατάσταση  $n \in Q$  την κωδικοποιούμε στη λέξη  $\text{bin}(n)$  (με  $\text{bin}(n)$  συμβολίζουμε τη δυαδική αναπαράσταση του αριθμού  $n \in \mathbb{N}$ ).
- Το σύνολο  $Q = \{q_0, q_1, \dots, q_k\} \subseteq \mathbb{N}$  (υποθέτουμε ότι  $q_0 < q_1 < \dots < q_k$ ), στη λέξη

$$\llbracket \langle q_0 \rangle_K; \langle q_1 \rangle_K; \dots; \langle q_k \rangle_K \rrbracket.$$

- Το σύμβολο  $n \in \Gamma$  το κωδικοποιούμε στη λέξη  $\text{bin}(n)$ .
- Το σύνολο  $\Sigma = \{a_0, a_1, \dots, a_l\} \subseteq \mathbb{N}$  (υποθέτουμε ότι  $a_0 < a_1 < \dots < a_l$ ), στη λέξη

$$\llbracket \langle a_0 \rangle_K; \langle a_1 \rangle_K; \dots; \langle a_l \rangle_K \rrbracket.$$

- Το σύνολο  $\Gamma = \{b_0, b_1, \dots, b_m\} \subseteq \mathbb{N}$  (υποθέτουμε ότι  $b_0 < b_1 < \dots < b_l$ ), στη λέξη

$$\llbracket \langle b_0 \rangle_K; \langle b_1 \rangle_K; \dots; \langle b_m \rangle_K \rrbracket.$$

- Τις κατευθύνσεις  $A$  και  $\Delta$  στα σύμβολα  $0$  και  $1$  αντίστοιχα.
- Τη μετάβαση  $(q, a, p, b, x) \in \delta$ , όπου  $a, b \in \Gamma$ ,  $q, p \in Q$  και  $x \in \{A, \Delta\}$  στη λέξη

$$[\langle q \rangle_K; \langle a \rangle_K; \langle p \rangle_K; \langle b \rangle_K; \langle x \rangle_K].$$

- Τη  $\delta = \{\delta_1, \delta_2, \dots, \delta_r\}$  (υποθέτουμε ότι  $\langle \delta_1 \rangle_K < \langle \delta_2 \rangle_K < \dots < \langle \delta_r \rangle_K$  στη λεξικογραφική διάταξη του  $K$ ) στη λέξη

$$\llbracket \langle \delta_1 \rangle_K; \langle \delta_2 \rangle_K; \dots; \langle \delta_r \rangle_K \rrbracket.$$

- Την  $M$  στη λέξη  $[\langle Q \rangle_K; \langle \Sigma \rangle_K; \langle \Gamma \rangle_K; \langle \delta \rangle_K; \langle q_0 \rangle_K; \langle q_{\text{ναι}} \rangle_K; \langle q_{\text{όχι}} \rangle_K]$ .

(Με απλά λόγια, αντικαθιστούμε στην «έκφραση»  $(Q, \Sigma, \Gamma, \delta, q_0, q_{\text{ναι}}, q_{\text{όχι}})$  τους αριθμούς με τη δυαδική τους αναπαράσταση, τα  $A, \Delta$  με 0, 1 αντίστοιχα, τις παρενθέσεις με τα σύμβολα  $[, ]$ , τις αγκύλες με τα σύμβολα  $\llbracket, \rrbracket$  και το κόμμα με το σύμβολο  $;$ ). Τέλος, κωδικοποιούμε τα σύμβολα του  $K$  στο  $\{0, 1\}$  ως εξής:

|                                        |   |     |
|----------------------------------------|---|-----|
| $\langle 0 \rangle_{\{0,1\}}$          | = | 000 |
| $\langle 1 \rangle_{\{0,1\}}$          | = | 001 |
| $\langle [ \rangle_{\{0,1\}}$          | = | 010 |
| $\langle ] \rangle_{\{0,1\}}$          | = | 011 |
| $\langle \llbracket \rangle_{\{0,1\}}$ | = | 100 |
| $\langle \rrbracket \rangle_{\{0,1\}}$ | = | 101 |
| $\langle ; \rangle_{\{0,1\}}$          | = | 110 |

Κωδικοποιήστε με τον παραπάνω τρόπο την ΤΜ του Παραδείγματος 1.2.26, υποθέτοντας ότι τα σύμβολα 0, 1,  $\triangleright$ ,  $\sqcup$  αντιστοιχούν στους αριθμούς 0, 1, 2, 3 αντίστοιχα, και οι καταστάσεις  $q_0, q_{\text{ναι}}, q_{\text{όχι}}$  στους αριθμούς 0, 1, 2 αντίστοιχα.



## ΚΕΦΑΛΑΙΟ 2

### ΑΝΑΔΡΟΜΙΚΕΣ ΣΥΝΑΡΤΗΣΕΙΣ

Σε αυτό το κεφάλαιο θα ασχοληθούμε αποκλειστικά με συναρτήσεις φυσικών αριθμών. Σύμφωνα με την Παρατήρηση 1.2.16 μπορούμε να θεωρήσουμε ότι τα «αντικείμενα» του υπολογισμού είναι οι λέξεις του  $\{0, 1\}^*$ . Μπορούμε περαιτέρω να αντιστοιχίσουμε κάθε λέξη  $w \in \{0, 1\}^*$  σε έναν φυσικό αριθμό (για παράδειγμα στον αριθμό που αντιστοιχεί στη «σειρά» εμφάνισης της  $w$  στη λεξικογραφική διάταξη) και έτσι να υποθέσουμε ότι τα «αντικείμενα» υπολογισμού είναι οι φυσικοί αριθμοί, οπότε οι γλώσσες του  $2^{\{0, 1\}^*}$  θα αποτελούν στην ουσία σύνολα φυσικών αριθμών και οι συναρτήσεις από το  $\{0, 1\}^*$  στο  $\{0, 1\}^*$  αριθμητικές συναρτήσεις από το  $\mathbb{N}$  στο  $\mathbb{N}$ . Πηγαίνοντας τον συλλογισμό ένα βήμα παραπέρα (και χρησιμοποιώντας τον Ορισμό 1.2.13) μπορούμε να αφοσιωθούμε μόνο στον υπολογισμός συναρτήσεων φυσικών αριθμών.

Στόχος μας είναι να κατατάξουμε (μερικές από) τις αριθμητικές συναρτήσεις σε δύο κλάσεις, σύμφωνα με τον «τρόπο που ορίζονται»: τις πρωτογενώς αναδρομικές συναρτήσεις και τις ελαχιστικά αναδρομικές συναρτήσεις. Θα αποδείξουμε ότι η δεύτερη και γενικότερη κλάση ταυτίζεται με την κλάση των υπολογίσιμων (κατά Turing) συναρτήσεων που είδαμε στο προηγούμενο κεφάλαιο.

Θα δούμε λοιπόν έναν δεύτερο – και εντελώς ανεξάρτητο από τον πρώτο – ορισμό των υπολογίσιμων συναρτήσεων. Αυτό όπως είναι φυσικό μας οδηγεί σε μια δεύτερη προσέγγιση της έννοιας του αλγορίθμου, που σε αντίθεση με τις ΤΜ δεν έχει μηχανιστική υφή: *Ο αλγόριθμος που υπολογίζει μία πρωτογενώς ή ελαχιστικά αναδρομική συνάρτηση είναι ο ίδιος ο τρόπος ορισμού της*<sup>1</sup>!

Πέρα από την παρουσίαση ενός διαφορετικού φορμαλισμού της Θεωρίας Αναδρομής, θέλουμε να καλλιεργήσουμε στον αναγνώστη την προδιάθεση ότι η Θέση Church-Turing (σελίδα 121) αποτελεί μία εύλογη παραδοχή. Μόνον εφόσον πεισθούμε ότι η Θέση Church-Turing μας δίνει μία επαρκή προσέγγιση της έννοιας του Αλγορίθμου, θα μπορέσουμε να

<sup>1</sup> Αυτό δεν θα έπρεπε να σας φανεί περίεργο καθώς αυτό ακριβώς κάνουν οι συναρτησιακές γλώσσες προγραμματισμού.

προχωρήσουμε στη θεωρία μας και τελικά να διαπιστώσουμε τα όρια της Αλγοριθμικής Υπολογισιμότητας.

## 2.1 Πρωτογενώς αναδρομικές συναρτήσεις

**Ορισμός 2.1.1.** Μία συνάρτηση  $f : \mathbb{N}^m \rightarrow \mathbb{N}$ ,  $m \geq 1$  είναι πρωτογενώς αναδρομική ανν είναι μία εκ των

- (a)  $s(x) = x + 1$  (η συνάρτηση του επόμενου) <sup>1</sup>
- (b)  $z^m(x_1, \dots, x_m) = 0$  (η σταθερή συνάρτηση ίση με μηδέν,  $m$  μεταβλητών)
- (c)  $p_i^m(x_1, \dots, x_m) = x_i$ , όπου  $i \in [m]$  (η προβολή στην  $i$ -οστή μεταβλητή) <sup>2</sup>

ή προκύπτει από τις πρωτογενώς αναδρομικές συναρτήσεις

- (1)  $g : \mathbb{N}^n \rightarrow \mathbb{N}$  και  $h_i : \mathbb{N}^m \rightarrow \mathbb{N}$ ,  $i \in [n]$  ως εξής:

$$f(x_1, \dots, x_m) = g(h_1(x_1, \dots, x_m), \dots, h_n(x_1, \dots, x_m))$$

(σύνθεση της  $g$  με τις  $h_i$ ,  $i \in [n]$ )

- (2)  $g : \mathbb{N}^{m-1} \rightarrow \mathbb{N}$  και  $h : \mathbb{N}^{m+1} \rightarrow \mathbb{N}$  όντας λύση των εξισώσεων <sup>3</sup>:

$$\begin{cases} f(0, x_1, \dots, x_{m-1}) = g(x_1, \dots, x_{m-1}) \\ f(y + 1, x_1, \dots, x_{m-1}) = h(f(y, x_1, \dots, x_{m-1}), y, x_1, \dots, x_{m-1}) \end{cases}$$

(πρωτογενής αναδρομή <sup>4</sup>)

Ο Ορισμός 2.1.1 θα γίνει περισσότερο κατανοητός μέσα από τα παραδείγματα που ακολουθούν.

**Παράδειγμα 2.1.2.** Οι σταθερές συναρτήσεις  $c_q^m : \mathbb{N}^m \rightarrow \mathbb{N}$ , με  $c_q^m(x_1, \dots, x_m) = q$ , όπου  $q \in \mathbb{N}$ , είναι πρωτογενώς αναδρομικές καθώς:

$$c_q^m(x_1, \dots, x_m) = \underbrace{s(s(\dots s(z^m(x_1, \dots, x_m))\dots))}_{q\text{-φορές}}$$

Εδώ θα πρέπει να τονίσουμε κάτι που ίσως έχει ήδη αρχίσει να διαφαίνεται: Σε αυτό το κεφάλαιο θα θεωρούμε ότι όλα είναι συναρτήσεις, ακόμα και οι φυσικοί αριθμοί!

<sup>1</sup> Φυσικά  $f = s$  μόνο αν  $m = 1$ .

<sup>2</sup> Τα (b) και (c) (μαζί με ένα πεπερασμένο πλήθος «εφαρμογών» του (a), δες Παράδειγμα 2.1.2) αντιστοιχούν στις εντολές ανάθεσης μίας γλώσσας προγραμματισμού.

<sup>3</sup> Προφανώς ο ορισμός αυτός ισχύει μόνο για  $m > 1$ . Για  $m = 1$  δες την Πρόταση 2.1.7.

<sup>4</sup> Η πρωτογενής αναδρομή αντιστοιχεί στο *for-loop* μίας γλώσσας προγραμματισμού.

**Παράδειγμα 2.1.3.** Οι συναρτήσεις  $h : \mathbb{N}^3 \rightarrow \mathbb{N}$ , με  $h(x, y, z) = x + 1$ , και  $\text{plus} : \mathbb{N}^2 \rightarrow \mathbb{N}$ , με  $\text{plus}(x, y) = x + y$ , είναι πρωτογενώς αναδρομικές καθώς:

$$h(x, y, z) = s(p_1^3(x, y, z))$$

και η  $\text{plus}$  αποτελεί λύση των εξισώσεων:

$$\begin{cases} f(0, y) = p_1^1(y) & [= y] \\ f(x + 1, y) = h(f(x, y), x, y) & [= f(x, y) + 1] \end{cases}$$

Για να το αποδείξουμε αυτό θα δείξουμε ότι για κάθε  $(x, y) \in \mathbb{N}^2$  ισχύει ότι  $f(x, y) = \text{plus}(x, y)$  κάνοντας επαγωγή ως προς την πρώτη μεταβλητή<sup>1</sup>. Παρατηρούμε ότι για κάθε  $y \in \mathbb{N}$ :

**Επαγωγική Βάση:** Για  $x = 0$  ισχύει ότι  $f(0, y) = p_1^1(y) = y = \text{plus}(0, y)$ .

**Επαγωγική Υπόθεση:** Υποθέτουμε ότι  $f(x, y) = \text{plus}(x, y)$ .

**Επαγωγικό Βήμα:** Θα δείξουμε ότι  $f(x + 1, y) = \text{plus}(x + 1, y)$ . Παρατηρούμε ότι:

$$\begin{aligned} f(x + 1, y) &= h(f(x, y), x, y) \\ &= f(x, y) + 1 \\ &= \text{plus}(x, y) + 1 \quad (\text{Λόγω της Επαγωγικής Υπόθεσης}) \\ &= x + y + 1 \\ &= \text{plus}(x + 1, y) \end{aligned}$$

**Παράδειγμα 2.1.4.** Η συνάρτηση  $\text{mult} : \mathbb{N}^2 \rightarrow \mathbb{N}$ , με  $\text{mult}(x, y) = x \cdot y$ , είναι πρωτογενώς αναδρομική καθώς αποτελεί λύση των εξισώσεων:

$$\begin{cases} f(0, y) = z^1(y) & [= 0] \\ f(x + 1, y) = \text{plus}(p_1^3(f(x, y), x, y), p_3^3(f(x, y), x, y)) & [= f(x, y) + y] \end{cases}$$

όπου  $\text{plus}$  η συνάρτηση του Παραδείγματος 2.1.3.

Είναι η κατάλληλη ώρα να αποδείξουμε μερικές προτάσεις που θα μας διευκολύνουν στον ορισμό πρωτογενών αναδρομικών συναρτήσεων.

**Πρόταση 2.1.5.** Έστω πρωτογενώς αναδρομικές συναρτήσεις  $g : \mathbb{N}^n \rightarrow \mathbb{N}$ ,  $n \geq 1$ , και  $h_i : \mathbb{N}^m \rightarrow \mathbb{N}$ ,  $m \geq 1$ , όπου  $i \in [n - 1]$ . Η συνάρτηση  $f : \mathbb{N}^m \rightarrow \mathbb{N}$ , με:

$$f(x_1, \dots, x_m) = g(h_1(x_1, \dots, x_m), \dots, h_{n-1}(x_1, \dots, x_m), y)$$

όπου  $y \in \{x_1, \dots, x_m\}$ , είναι πρωτογενώς αναδρομική.

<sup>1</sup> Στα παραδείγματα που ακολουθούν θα αποφύγουμε τις αποδείξεις με επαγωγή καθώς δεν παρουσιάζουν μεγάλο ενδιαφέρον.

*Απόδειξη.* Έστω  $y = x_i$ . Παρατηρούμε ότι:

$$f(x_1, \dots, x_m) = g(h_1(x_1, \dots, x_m), \dots, h_{n-1}(x_1, \dots, x_m), p_i^m(x_1, \dots, x_m))$$

Άρα η  $f$  είναι πρωτογενώς αναδρομική.  $\square$

Η Πρόταση 2.1.5 μπορεί να γενικευτεί άμεσα (και ποικιλοτρόπως) δίνοντάς μας το δικαίωμα να ορίζουμε πρωτογενώς αναδρομικές συναρτήσεις εφαρμόζοντας σύνδεση μόνο σε μερικές (ή και καμία) από τις μεταβλητές. Λόγω της Πρότασης 2.1.5, στο Παράδειγμα 2.1.4 θα μπορούσαμε να αντικαταστήσουμε το (άκομφο)  $\text{plus}(p_1^3(f(x, y), x, y), p_3^3(f(x, y), x, y))$  με το (κατά πολύ κομψότερο)  $\text{plus}(f(x, y), y)$  στην αναδρομική εξίσωση.

**Πρόταση 2.1.6.** Έστω πρωτογενώς αναδρομική συνάρτηση  $g : \mathbb{N}^n \rightarrow \mathbb{N}$ ,  $n \geq 1$ . Η συνάρτηση  $f : \mathbb{N}^m \rightarrow \mathbb{N}$ ,  $m \geq 1$ , με  $f(x_1, \dots, x_m) = g(y_1, \dots, y_n)$ , όπου  $y_i \in \{x_1, \dots, x_m\}$ ,  $i \in [n]$ , είναι πρωτογενώς αναδρομική.

*Απόδειξη.* Έστω  $y_j = x_{i_j}$ ,  $j \in [n]$ . Παρατηρούμε ότι:

$$f(x_1, \dots, x_m) = g(p_{i_1}^m(x_1, \dots, x_m), \dots, p_{i_n}^m(x_1, \dots, x_m))$$

Άρα η  $f$  είναι πρωτογενώς αναδρομική.  $\square$

Σύμφωνα με την Πρόταση 2.1.6 μπορούμε να αντιμετωπίσουμε, να αφαιρέσουμε, ή να επαναλάβουμε μεταβλητές όταν κατασκευάζουμε πρωτογενώς αναδρομικές συναρτήσεις <sup>1</sup>. Για παράδειγμα, στο Παράδειγμα 2.1.3 ορίσαμε τη συνάρτηση  $h : \mathbb{N}^3 \rightarrow \mathbb{N}$  που ταυτίζεται με τη συνάρτηση του επομένου στην πρώτη μεταβλητή, θα μπορούσαμε χάριν συντομίας να γράψουμε  $h(x, y, z) = s(x)$ .

**Πρόταση 2.1.7.** Έστω  $h : \mathbb{N}^2 \rightarrow \mathbb{N}$  πρωτογενώς αναδρομική συνάρτηση και  $q \in \mathbb{N}$ . Η συνάρτηση  $f : \mathbb{N} \rightarrow \mathbb{N}$  που αποτελεί λύση των εξισώσεων:

$$\begin{cases} f(0) = q \\ f(y+1) = h(f(y), y) \end{cases} \quad (\text{πρωτογενής αναδρομή χωρίς παραμέτρους})$$

είναι πρωτογενώς αναδρομική.

*Απόδειξη.* Η συνάρτηση  $g : \mathbb{N}^2 \rightarrow \mathbb{N}$  που αποτελεί λύση των εξισώσεων:

$$\begin{cases} g(0, x) = c_q^1(x) & [= q] \\ g(y+1, x) = p_1^3(h(g(y, x), y), y, x) & [= h(g(y, x), y)] \end{cases}$$

όπου  $c_q^1$  η συνάρτηση του Παραδείγματος 2.1.2, είναι πρωτογενώς αναδρομική. Παρατηρούμε ότι  $f(y) = g(y, y)$  <sup>2</sup>, οπότε, σύμφωνα με την Πρόταση 2.1.6, η  $f$  είναι πρωτογενώς αναδρομική.  $\square$

<sup>1</sup> Παρατηρήστε ότι για τα  $n$  και  $m$  στην Πρόταση 2.1.6 μπορεί να ισχύει  $n \leq m$  ή  $m < n$ .

<sup>2</sup> Αν θέλουμε να το δείξουμε αυτό με επαγωγή μπορούμε να δείξουμε ότι  $f(y) = g(y, x)$  για κάθε  $x \in \mathbb{N}$ , άρα και για  $x = y$ .

Η Πρόταση 2.1.7 συμπληρώνει τον ορισμό της πρωτογενής αναδρομής και μας δίνει το δικαίωμα να την εφαρμόζουμε για να ορίζουμε ακόμα και συναρτήσεις μίας μεταβλητής.

**Παράδειγμα 2.1.8.** Η συνάρτηση  $\text{fact} : \mathbb{N} \rightarrow \mathbb{N}$ , με  $\text{fact}(x) = x!$ , είναι πρωτογενώς αναδρομική, σύμφωνα με την Πρόταση 2.1.7, καθώς αποτελεί λύση των εξισώσεων:

$$\begin{cases} f(0) = 1 \\ f(x+1) = \text{mult}(f(x), s(x)) \end{cases} \quad [ = f(x) \cdot (x+1) ]$$

όπου  $\text{mult}$  η συνάρτηση του Παραδείγματος 2.1.4.

**Παράδειγμα 2.1.9.** Η συνάρτηση  $\text{pd} : \mathbb{N} \rightarrow \mathbb{N}$ , με:

$$\text{pd}(x) = \begin{cases} 0 & , \text{ αν } x = 0 \\ x - 1 & , \text{ αλλιώς} \end{cases}$$

είναι πρωτογενώς αναδρομική, σύμφωνα με την Πρόταση 2.1.7, καθώς αποτελεί λύση των εξισώσεων:

$$\begin{cases} f(0) = 0 \\ f(x+1) = p_2^2(f(x), x) \end{cases} \quad [ = x ]$$

**Παράδειγμα 2.1.10.** Η συνάρτηση  $\div : \mathbb{N}^2 \rightarrow \mathbb{N}$ , με:

$$\div(x, y) = \begin{cases} 0 & , \text{ αν } x < y \\ x - y & , \text{ αλλιώς} \end{cases}$$

είναι πρωτογενώς αναδρομική καθώς αποτελεί λύση των εξισώσεων:

$$\begin{cases} f(x, 0) = p_1^1(x) \\ f(x, y+1) = \text{pd}(f(x, y)) \end{cases} \quad \begin{matrix} [ = x ] \\ [ = f(x, y) - 1 ] \end{matrix}$$

όπου  $\text{pd}$  η συνάρτηση του Παραδείγματος 2.1.9. Εδώ κάναμε την πρώτη μας «παρατυπία» (για αυτό το κεφάλαιο): Σύμφωνα με τον Ορισμό 2.1.1 η πρωτογενής αναδρομή γίνεται στην πρώτη μεταβλητή ενώ εδώ την εφαρμόσαμε στη δεύτερη. Αυτό μπορεί να επιτευχθεί λόγω της Πρότασης 2.1.6, ορίζοντας την  $f : \mathbb{N}^2 \rightarrow \mathbb{N}$  που αποτελεί λύση των εξισώσεων:

$$\begin{cases} f(0, y) = p_1^1(y) \\ f(x+1, y) = \text{pd}(f(x, y)) \end{cases}$$

και έπειτα ορίζοντας  $\div(x, y) = f(y, x)$ <sup>1</sup>. Για λόγους «αισθητικής» θα γράφουμε  $x \div y$  αντί για  $\div(x, y)$ .

<sup>1</sup> Με άλλα λόγια ορίσαμε μία συνάρτηση έστω  $\div'(x, y) = \begin{cases} 0 & , \text{ αν } y < x \\ y - x & , \text{ αλλιώς} \end{cases}$  και απλά αντιστρέψαμε τη σειρά των ορισμάτων της.

**Παράδειγμα 2.1.11.** Η συνάρτηση  $\min : \mathbb{N}^2 \rightarrow \mathbb{N}$ , με  $\min(x, y) = \min\{x, y\}$ , είναι πρωτογενώς αναδρομική καθώς:

$$\min(x, y) = x \div (x \div y)$$

όπου  $\div$  η συνάρτηση του Παραδείγματος 2.1.10.

**Παράδειγμα 2.1.12.** Η συνάρτηση  $\max : \mathbb{N}^2 \rightarrow \mathbb{N}$ , με  $\max(x, y) = \max\{x, y\}$ , είναι πρωτογενώς αναδρομική καθώς:

$$\max(x, y) = \text{plus}(x, y) \div \min(x, y)$$

όπου  $\text{plus}$ ,  $\div$  και  $\min$  οι συναρτήσεις των Παραδειγμάτων 2.1.3, 2.1.10 και 2.1.11.

**Παρατήρηση 2.1.13.** Οι συναρτήσεις  $\min$  και  $\max$  γενικεύονται άμεσα σε συναρτήσεις  $m$  μεταβλητών, για κάθε  $m \in \mathbb{N}$  (δες Άσκηση 2.3).

**Παράδειγμα 2.1.14.** Η συνάρτηση  $\exp : \mathbb{N}^2 \rightarrow \mathbb{N}$ , με  $\exp(x, y) = x^y$ , είναι πρωτογενώς αναδρομική καθώς αποτελεί λύση των εξισώσεων:

$$\begin{cases} f(x, 0) = c_1^1(x) & [= 1] \\ f(x, y + 1) = \text{mult}(f(x, y), x) & [= f(x, y) \cdot x] \end{cases}$$

όπου  $c_1^1$  και  $\text{mult}$  οι συναρτήσεις των Παραδειγμάτων 2.1.2 και 2.1.4.

Μπορούμε να μεταφέρουμε τον Ορισμό 2.1.1 και σε υποσύνολα του  $\mathbb{N}^m$ , για  $m \geq 1$ , ορίζοντας έτσι πρωτογενώς αναδρομικές σχέσεις φυσικών αριθμών.

**Ορισμός 2.1.15.** Μία σχέση  $P \subseteq \mathbb{N}^m$ ,  $m \geq 1$ , είναι πρωτογενώς αναδρομική αν η χαρακτηριστική της συνάρτηση  $\chi_P : \mathbb{N}^m \rightarrow \{0, 1\}$  είναι πρωτογενώς αναδρομική<sup>1</sup>.

**Παράδειγμα 2.1.16.** Η σχέση  $\{(x, y) \in \mathbb{N}^2 \mid x = y\}$  είναι πρωτογενώς αναδρομική καθώς η χαρακτηριστική της συνάρτηση είναι πρωτογενώς αναδρομική<sup>2</sup>:

$$\chi_{=}(x, y) = c_1^2(x, y) \div \text{plus}(x \div y, y \div x)$$

όπου  $c_1^2$ ,  $\text{plus}$  και  $\div$  οι συναρτήσεις των Παραδειγμάτων 2.1.2, 2.1.3 και 2.1.10.

Παρατηρήστε ότι και η σχέση  $\{(x, y) \in \mathbb{N}^2 \mid x \neq y\}$  είναι πρωτογενώς αναδρομική καθώς η χαρακτηριστική της συνάρτηση είναι η:

$$\chi_{\neq}(x, y) = c_1^2(x, y) \div \chi_{=}(x, y)$$

**Παράδειγμα 2.1.17.** Η σχέση  $\{(x, y) \in \mathbb{N}^2 \mid x \leq y\}$  είναι πρωτογενώς αναδρομική καθώς η χαρακτηριστική της συνάρτηση είναι πρωτογενώς αναδρομική:

$$\chi_{\leq}(x, y) = c_1^2(x, y) \div (x \div y)$$

όπου  $c_1^2$  και  $\div$  οι συναρτήσεις των Παραδειγμάτων 2.1.2 και 2.1.10.

<sup>1</sup> Θα μπορούσαμε να πούμε ότι αντιπροσωπεύουμε κάθε σύνολο (ή γενικότερα μία  $m$ -μελή σχέση) με τη χαρακτηριστική του συνάρτηση. Συνεπώς και τα σύνολα «είναι» συναρτήσεις!

<sup>2</sup> Μπορείτε να εντοπίσετε που εφαρμόζουμε την Πρόταση 2.1.6;

**Παράδειγμα 2.1.18.** Η σχέση  $\{(x, y) \in \mathbb{N}^2 \mid x < y\}$  είναι πρωτογενώς αναδρομική καθώς η χαρακτηριστική της συνάρτηση είναι πρωτογενώς αναδρομική:

$$\chi_{<}(x, y) = \chi_{\leq}(s(x), y)$$

όπου η  $\chi_{\leq}$  ορίζεται στο Παράδειγμα 2.1.17.

Οι αποδείξεις των παρακάτω προτάσεων αφήνονται ως άσκηση (Άσκηση 2.5).

**Πρόταση 2.1.19.** Έστω πρωτογενώς αναδρομικές σχέσεις  $P, Q \subseteq \mathbb{N}^m$ . Οι σχέσεις  $\bar{P}$ ,  $P \cup Q$ ,  $P \cap Q$  και  $P \setminus Q$  είναι πρωτογενώς αναδρομικές.

**Πρόταση 2.1.20.** Έστω πρωτογενώς αναδρομική σχέση  $P \subseteq \mathbb{N}^m$  και πρωτογενώς αναδρομικές συναρτήσεις  $f_i : \mathbb{N}^n \rightarrow \mathbb{N}$ ,  $i \in [m]$ . Η σχέση:

$$Q = \{(x_1, \dots, x_n) \in \mathbb{N}^n \mid (f_1(x_1, \dots, x_n), \dots, f_m(x_1, \dots, x_n)) \in P\}$$

είναι πρωτογενώς αναδρομική.

**Σύμβαση 2.1.21.** Από εδώ και στο εξής θα χρησιμοποιούμε τους φυσικούς αριθμούς και τα σύμβολα  $+$ ,  $\cdot$  αντί για τις πρωτογενώς αναδρομικές συναρτήσεις που τα ορίζουν. Επίσης, θα γράφουμε την ύψωση σε δύναμη κατά τον συνήθη τρόπο και όχι χρησιμοποιώντας τη συνάρτηση  $\exp$  του Παραδείγματος 2.1.14.

**Πρόταση 2.1.22.** Έστω ξένες ανά δύο πρωτογενώς αναδρομικές σχέσεις  $P_i \subseteq \mathbb{N}^m$ ,  $i \in [n]$ , και πρωτογενώς αναδρομικές συναρτήσεις  $g_j : \mathbb{N}^m \rightarrow \mathbb{N}$ ,  $j \in [n+1]$ , όπου  $n, m \geq 1$ . Η  $f : \mathbb{N}^m \rightarrow \mathbb{N}$  με:

$$f(x_1, \dots, x_m) = \begin{cases} g_1(x_1, \dots, x_m) & , \text{αν } (x_1, \dots, x_m) \in P_1 \\ g_2(x_1, \dots, x_m) & , \text{αν } (x_1, \dots, x_m) \in P_2 \\ \vdots & \\ g_n(x_1, \dots, x_m) & , \text{αν } (x_1, \dots, x_m) \in P_n \\ g_{n+1}(x_1, \dots, x_m) & , \text{αλλιώς} \end{cases}$$

είναι πρωτογενώς αναδρομική<sup>1</sup>.

**Απόδειξη.** Θα αποδείξουμε την πρόταση για  $n = 1$ <sup>2</sup>. Παρατηρούμε ότι:

$$f(x_1, \dots, x_m) = \chi_{P_1}(x_1, \dots, x_m) \cdot g_1(x_1, \dots, x_m) + (1 \div \chi_{P_1}(x_1, \dots, x_m)) \cdot g_2(x_1, \dots, x_m),$$

από τα Παραδείγματα 2.1.3 και 2.1.4 η πρόσθεση και ο πολλαπλασιασμός είναι πρωτογενώς αναδρομικές συναρτήσεις και το 1 ορίζεται ως  $c_1^m(x_1, \dots, x_m)$  (δες Παράδειγμα 2.1.2).  $\square$

<sup>1</sup> Η συνάρτηση  $f$  αντιστοιχεί στο *if-then-else* μίας γλώσσας προγραμματισμού.

<sup>2</sup> Η γενική περίπτωση αφήνεται ως άσκηση (Άσκηση 2.5).

**Παράδειγμα 2.1.23.** Η συνάρτηση  $\text{rm} : \mathbb{N}^2 \rightarrow \mathbb{N}$ , με:

$$\text{rm}(x, y) = \begin{cases} x \bmod y & , \text{αν } y \neq 0 \\ x + 1 & , \text{αν } y = 0 \end{cases}$$

(το υπόλοιπο της διαίρεσης του  $x$  με το  $y$ <sup>1</sup>) είναι πρωτογενώς αναδρομική καθώς αποτελεί λύση των εξισώσεων:

$$\begin{cases} f(0, y) = \begin{cases} 0 & , \text{αν } y \neq 0 \\ 1 & , \text{αλλιώς } (y = 0) \end{cases} \\ f(x + 1, y) = \begin{cases} x + 2 & , \text{αν } y = 0 \\ 0 & , \text{αν } f(x, y) + 1 = y \\ f(x, y) + 1 & , \text{αλλιώς} \end{cases} \end{cases}$$

και οι σχέσεις  $=$  και  $\neq$  είναι πρωτογενώς αναδρομικές (δες Παράδειγμα 2.1.16).

**Παράδειγμα 2.1.24.** Η σχέση  $\{(x, y) \in \mathbb{N}^2 \mid x \mid y\}$  είναι πρωτογενώς αναδρομική καθώς η χαρακτηριστική της συνάρτηση είναι πρωτογενώς αναδρομική :

$$\chi_{\mid}(x, y) = 1 \div \text{rm}(y, x)$$

όπου  $\div$  και  $\text{rm}$  οι συναρτήσεις των Παραδειγμάτων 2.1.10 και 2.1.23.

**Παράδειγμα 2.1.25.** Η συνάρτηση  $\text{qt} : \mathbb{N}^2 \rightarrow \mathbb{N}$ , με:

$$\text{qt}(x, y) = \begin{cases} \frac{x-x \bmod y}{y} & , \text{αν } y \neq 0 \\ x + 1 & , \text{αν } y = 0 \end{cases}$$

(το πηλίκο της διαίρεσης του  $x$  με το  $y$ ) είναι πρωτογενώς αναδρομική καθώς αποτελεί λύση των εξισώσεων:

$$\begin{cases} f(0, y) = \begin{cases} 0 & , \text{αν } y \neq 0 \\ 1 & , \text{αλλιώς } (y = 0) \end{cases} \\ f(x + 1, y) = \begin{cases} x + 2 & , \text{αν } y = 0 \\ f(x, y) + 1 & , \text{αν } \text{rm}(x, y) + 1 = y \\ f(x, y) & , \text{αλλιώς} \end{cases} \end{cases}$$

όπου  $\text{rm}$  η συνάρτηση του Παραδείγματος 2.1.23.

<sup>1</sup> Θα αναρωτιέστε γιατί δώσαμε τιμή ακόμα και όταν έχουμε διαίρεση με το μηδέν! Ο λόγος είναι ότι σε αντίθετη περίπτωση θα ορίζαμε μερική συνάρτηση και θέλουμε οι πρωτογενώς αναδρομικές συναρτήσεις να είναι ολικές (δες Άσκηση 2.2). Θέλουμε να κρατήσουμε τη μη ύπαρξη τιμής για κάποιο όρισμα της συνάρτησης για κάτι πιο ουσιαστικό: *Να σηματοδοτεί τον μη τερματισμό κατά τον υπολογισμό της*. Επιπλέον, η σύμβαση αυτή μας επιτρέπει να «ελέγχουμε» αν έχουμε διαίρεση με το μηδέν.

**Παράδειγμα 2.1.26.** Η συνάρτηση  $\text{dn} : \mathbb{N}^2 \rightarrow \mathbb{N}$ , με:

$$\text{dn}(x, y) = |\{d \in \mathbb{N} \mid (d \mid x) \wedge (d \leq y)\}|$$

(το πλήθος των διαιρετών του  $x$  που είναι μικρότεροι του  $y$ ) είναι πρωτογενώς αναδρομική καθώς αποτελεί λύση των εξισώσεων:

$$\begin{cases} f(x, 0) = 0 \\ f(x, y + 1) = f(x, y) + \chi_{\mid}(y + 1, x) \end{cases}$$

όπου η  $\chi_{\mid}$  ορίζεται στο Παράδειγμα 2.1.24.

Τα παραδείγματα που είδαμε δεν επιλέχθηκαν τυχαία. Όλες οι συναρτήσεις και σχέσεις που ορίστηκαν σε αυτήν την παράγραφο μας είναι απαραίτητες για να φτάσουμε στον ακόλουθο ορισμό.

**Παράδειγμα 2.1.27.** Η σχέση  $\text{Prime} = \{x \in \mathbb{N} \mid x \text{ πρώτος αριθμός}\}$  είναι πρωτογενώς αναδρομική καθώς η χαρακτηριστική της συνάρτηση είναι πρωτογενώς αναδρομική:

$$\chi_{\text{Prime}}(x) = \begin{cases} 1 & , \text{ αν } \text{dn}(x, x) = 2 \\ 0 & , \text{ αλλιώς} \end{cases}$$

όπου  $\text{dn}$  η συνάρτηση του Παραδείγματος 2.1.26.

Κλείνοντας αυτόν τον πρώτο κύκλο παραδειγμάτων θα πρέπει να τονίσουμε ότι ο τρόπος ορισμού των συναρτήσεων που είδαμε δεν είναι ο μοναδικός (όπως επίσης δεν αντιστοιχεί και στον μοναδικό τρόπο να υπολογισθούν).

## 2.2 Φραγμένη ελαχιστοποίηση

**Ορισμός 2.2.1.** Έστω ολική συνάρτηση  $g : \mathbb{N}^{m+1} \rightarrow \mathbb{N}$ ,  $m \geq 1$  και  $y \in \mathbb{N}$ . Ο τελεστής φραγμένης ελαχιστοποίησης της  $g$ <sup>1</sup> ορίζεται ως εξής:

$$(\mu i \leq y)[g(i, x_1, \dots, x_m) = 0] = \begin{cases} \min\{i \leq y \mid g(i, x_1, \dots, x_m) = 0\} & , \text{ αν υπάρχει} \\ y + 1 & , \text{ αλλιώς} \end{cases}$$

Σκοπεύουμε να εφαρμόσουμε τον τελεστή της φραγμένης ελαχιστοποίησης σε πρωτογενώς αναδρομικές συναρτήσεις ούτως ώστε να παραγάγουμε καινούργιες συναρτήσεις. Για να μπορέσουμε όμως να το κάνουμε αυτό χρειαζόμαστε την ακόλουθη πρόταση (η απόδειξη αφήνεται ως Άσκηση 2.2).

**Πρόταση 2.2.2.** Κάθε πρωτογενώς αναδρομική συνάρτηση είναι ολική συνάρτηση.

<sup>1</sup> Η φραγμένη ελαχιστοποίηση αντιστοιχεί στο φραγμένο *while* μίας γλώσσας προγραμματισμού.

**Πρόταση 2.2.3.** Έστω  $g : \mathbb{N}^{m+1} \rightarrow \mathbb{N}$ ,  $m \geq 1$ , πρωτογενώς αναδρομική συνάρτηση. Η συνάρτηση  $f : \mathbb{N}^{m+1} \rightarrow \mathbb{N}$  με:

$$f(y, x_1, \dots, x_m) = (\mu i \leq y)[g(i, x_1, \dots, x_m) = 0]$$

είναι πρωτογενώς αναδρομική.

*Απόδειξη.*<sup>1</sup> Ορίζουμε τις πρωτογενώς αναδρομικές συναρτήσεις:

$$h(j, x_1, \dots, x_m) = \begin{cases} 1 & , \text{αν } g(j, x_1, \dots, x_m) \neq 0 \\ 0 & , \text{αν } g(j, x_1, \dots, x_m) = 0 \end{cases}$$

$$s(i, x_1, \dots, x_m) = \text{prod}_h(i, x_1, \dots, x_m) \quad [ = \prod_{j=0}^i h(j, x_1, \dots, x_m) ]$$

και

$$f(y, x_1, \dots, x_m) = \text{sum}_s(y, x_1, \dots, x_m) \quad [ = \sum_{i=0}^y s(i, x_1, \dots, x_m) ]$$

Παρατηρήστε ότι αν υπάρχει  $i \leq y$  τέτοιο ώστε  $g(i, x_1, \dots, x_m) = 0$ , οι τιμές του  $\text{prod}_h(j, x_1, \dots, x_m)$  για κάθε  $i \leq j \leq y$  θα είναι 0, οπότε το  $\text{sum}_s(y, x_1, \dots, x_m)$  θα ισούται με  $i$ <sup>2</sup>.  $\square$

Αντίστοιχα μπορούμε να αποδείξουμε και την ακόλουθη πρόταση.

**Πρόταση 2.2.4.** Έστω  $h : \mathbb{N}^m \rightarrow \mathbb{N}$  και  $g : \mathbb{N}^{m+1} \rightarrow \mathbb{N}$ ,  $m \geq 1$ , πρωτογενώς αναδρομικές συναρτήσεις. Η συνάρτηση  $f : \mathbb{N}^m \rightarrow \mathbb{N}$  με:

$$f(x_1, \dots, x_m) = (\mu i \leq h(x_1, \dots, x_m))[g(i, x_1, \dots, x_m) = 0]$$

είναι πρωτογενώς αναδρομική.

Οι Προτάσεις 2.2.3 και 2.2.4 αποδεικνύουν ότι η φραγμένη ελαχιστοποίηση δεν «διευρύνει» την κλάση των πρωτογενώς αναδρομικών συναρτήσεων. Παρ' όλα αυτά ο τελεστής της φραγμένης ελαχιστοποίησης είναι πολύ χρήσιμος για τον ορισμό συναρτήσεων όπου δεν είναι γνωστό εκ των προτέρων το πλήθος των «επαναλήψεων» που πρέπει να γίνουν για τον υπολογισμό κάποιας τιμής (είναι γνωστό μόνο ένα άνω φράγμα αυτού του πλήθους). Ας δούμε ένα παράδειγμα εφαρμογής του.

<sup>1</sup> Στην απόδειξη θα χρησιμοποιήσουμε το γεγονός ότι οι συναρτήσεις:

$$\begin{aligned} \text{sum}_g(y, x_1, \dots, x_m) &= \sum_{i=0}^y g(i, x_1, \dots, x_m) \\ \text{prod}_g(y, x_1, \dots, x_m) &= \prod_{i=0}^y g(i, x_1, \dots, x_m) \end{aligned}$$

όπου  $g : \mathbb{N}^{m+1} \rightarrow \mathbb{N}$  πρωτογενώς αναδρομική συνάρτηση, είναι πρωτογενώς αναδρομικές (δες Άσκηση 2.4).

<sup>2</sup> Ενώ αν για κάθε  $i \in [y]$  έχουμε  $g(i, x_1, \dots, x_m) \neq 0$ , τότε  $\text{sum}_s(y, x_1, \dots, x_m) = y + 1$ . Τέλος, αν η τιμή της  $g$  δεν ορίζεται για κάποιο  $i$  τότε και η τιμή της ελαχιστοποίησης δεν θα ορίζεται (φυσικά αν η  $g$  είναι πρωτογενώς αναδρομική αυτό δεν πρόκειται να συμβεί).

**Παράδειγμα 2.2.5.** Η συνάρτηση  $\text{pn} : \mathbb{N} \rightarrow \mathbb{N}$  όπου ο  $\text{pn}(x)$  είναι ο  $x$ -οστός πρώτος αριθμός, δηλαδή:

$$\text{pn}(x) = \begin{cases} 1 & , \text{ αν } x = 0 \\ \min\{p \in \mathbb{N} \mid p \text{ πρώτος και υπάρχουν } \geq x \text{ πρώτοι μικρότεροι του}\} & , \text{ αλλιώς} \end{cases}$$

μπορεί να οριστεί ως λύση των εξισώσεων:

$$\begin{cases} f(0) = 1 \\ f(x+1) = \begin{cases} 2 & , \text{ αν } x = 0 \\ (\mu i \leq \text{fact}(f(x)) + 1)[g(i, f(x)) = 0] & , \text{ αλλιώς} \end{cases} \end{cases}$$

όπου  $g(i, x) = 1 \div \chi_P(i, x)$ ,  $P = \{(i, x) \in \mathbb{N}^2 \mid x < i \text{ και } i \in \text{Prime}\}$  και  $\text{fact}$  η συνάρτηση του Παραδείγματος 2.1.8. Για να αποδείξουμε ότι η  $\text{pn}$  είναι πρωτογενώς αναδρομική πρέπει να δείξουμε ότι:

α) Η  $g$  είναι πρωτογενώς αναδρομική συνάρτηση.

και για να αποδείξουμε ότι όντως επιστρέφει τον  $x$ -οστός πρώτο ότι:

β) Για κάθε  $n \in \mathbb{N}$  υπάρχει πρώτος αριθμός  $p$  τέτοιος ώστε  $n < p \leq n! + 1$ <sup>1</sup>.

Για το α) παρατηρήστε ότι  $\chi_P(i, x) = \chi_{<}(x, i) + \chi_{\text{Prime}}(i) \div 1$ , όπου οι  $\chi_{<}$  και  $\chi_{\text{Prime}}$  ορίζονται στα Παραδείγματα 2.1.18 και 2.1.27, άρα τόσο η  $\chi_P$  όσο και η  $g$  είναι πρωτογενώς αναδρομικές.

Για το β) υποθέτουμε ότι ο  $n! + 1$  δεν είναι πρώτος, τότε θα υπάρχει πρώτος αριθμός  $p < n! + 1$  τέτοιος ώστε  $p \mid n! + 1$ . Ο  $p$  δεν μπορεί να διαιρεί το  $n!$  γιατί τότε θα έπρεπε να διαιρεί το 1, άρα ο  $p$  δεν διαιρεί κανέναν από τους αριθμούς  $1, 2, \dots, n$ . Συνεπώς ο  $p$  είναι ο ζητούμενος πρώτος αριθμός καθώς  $n < p \leq n! + 1$ .

Στο Παράδειγμα 2.2.5 δεν μπορούμε να εφαρμόσουμε άμεσα πρωτογενή αναδρομή καθώς δεν είναι γνωστό το πλήθος «επαναλήψεων» που θα χρειαστεί να κάνουμε μέχρι να βρούμε τον επόμενο πρώτο αριθμό.

**Σύμβαση 2.2.6.** Έστω σχέση  $P \subseteq \mathbb{N}^{m+1}$ ,  $m \geq 1$  και  $y \in \mathbb{N}$ . Είναι βολικό πολλές φορές να χρησιμοποιούμε τον τελεστή φραγμένης ελαχιστοποίησης ως εξής:

$$(\mu i \leq y)[(i, x_1, \dots, x_m) \in P] = \begin{cases} \min\{i \leq y \mid (i, x_1, \dots, x_m) \in P\} & , \text{ αν υπάρχει} \\ y + 1 & , \text{ αλλιώς} \end{cases}$$

καθώς ελαφρύνει λίγο τον συμβολισμό<sup>2</sup>.

<sup>1</sup> Παρατηρήστε ότι αν αντικαταστήσω το  $n$  με  $\text{pn}(x)$ , από τον ισχυρισμό έπεται ότι υπάρχει πρώτος αριθμός στο διάστημα  $(\text{pn}(x), \text{pn}(x)! + 1]$ .

<sup>2</sup> Σύμφωνα με τον Ορισμό 2.2.1 τυπικά θα έπρεπε να γράψουμε  $(\mu i \leq y)[1 \div \chi_P(i, x_1, \dots, x_m) = 0]$  (προφανώς η  $\chi_P$  είναι ολική συνάρτηση).

## 2.3 Πλήρης πρωτογενής αναδρομή

Προτού ορίσουμε την πλήρη πρωτογενή αναδρομή, σύμφωνα με την οποία ορίζουμε αναδρομικά μία συνάρτηση χρησιμοποιώντας όλες τις ήδη υπολογισμένες τιμές της, θα χρειαστεί να κωδικοποιήσουμε ακολουθίες φυσικών αριθμών. Όπως αποδεικνύει η Πρόταση 2.3.5 ούτε η πλήρης πρωτογενής αναδρομή επεκτείνει την κλάση των πρωτογενώς αναδρομικών συναρτήσεων.

### Κωδικοποίηση ακολουθιών φυσικών αριθμών

Μπορούμε να κωδικοποιήσουμε μονοσήμαντα μία ακολουθία φυσικών αριθμών  $x_1, x_2, \dots, x_n$  ως το γινόμενο των  $n$ -πρώτων πρώτων αριθμών, όπου ο  $i$ -οστός πρώτος έχει υψωθεί στη  $(x_i + 1)$ -οστή δύναμη<sup>1</sup>. Για παράδειγμα κωδικοποιούμε την ακολουθία 0,1,2,3 στον αριθμό  $2^1 \cdot 3^2 \cdot 5^3 \cdot 7^4 = 5402250$ <sup>2</sup>.

Αν κάποιος μας δώσει έναν φυσικό αριθμό  $n$  που αποτελεί κωδικοποίηση κάποιας ακολουθίας μπορούμε εύκολα να βρούμε τον  $i$ -οστό όρο της βρίσκοντας τη μέγιστη δύναμη του  $i$ -οστού πρώτου αριθμού που διαιρεί τον  $n$  και αφαιρώντας ένα από αυτή. Στο παράδειγμα που δώσαμε παραπάνω, αναζητώντας τον τρίτο όρο της ακολουθίας παρατηρούμε ότι οι  $5, 5^2, 5^3$  διαιρούν τον 5402250 ενώ ο  $5^4$  όχι. Συνεπώς ο ζητούμενος όρος ισούται με  $3 - 1 = 2$ . Ας κάνουμε αυτήν την περιγραφή τυπικό ορισμό.

**Ορισμός 2.3.1.** Ορίζουμε για κάθε  $n \in \mathbb{N}$  τις συναρτήσεις  $\text{enc}_n : \mathbb{N}^n \rightarrow \mathbb{N}$ :

$$\begin{aligned} \text{enc}_0 &= 1^3 \\ \text{enc}_n(x_1, \dots, x_n) &= 2^{x_1+1} \cdot 3^{x_2+1} \cdot \dots \cdot p_n^{x_n+1}, \quad \text{για } n \geq 1 \end{aligned}$$

όπου  $p_n$  ο  $n$ -οστός πρώτος αριθμός. Ορίζουμε επίσης τη σχέση:

$$\text{seq} = \{x \in \mathbb{N} \mid x = 1 \text{ ή υπάρχουν } n, x_1, \dots, x_n \in \mathbb{N} \text{ τέτοια ώστε } x = \text{enc}_n(x_1, \dots, x_n)\}$$

και τη συνάρτηση  $\text{dec} : \mathbb{N}^2 \rightarrow \mathbb{N}$  με:

$$\text{dec}(i, x) = \begin{cases} x_i & , \text{ αν } x \in \text{seq}, \text{ έστω } x = \text{enc}_n(x_1, \dots, x_n), \text{ και } i \in [n] \\ x + 1 & , \text{ αλλιώς} \end{cases}$$

**Πρόταση 2.3.2.** Οι συναρτήσεις  $\text{enc}_n$ ,  $\text{dec}$  και η σχέση  $\text{seq}$  είναι πρωτογενώς αναδρομικές.

*Απόδειξη.* Ορίζουμε:

$$\begin{aligned} \text{enc}_0 &= 1 \\ \text{enc}_n(x_1, \dots, x_n) &= \text{pn}(1)^{x_1+1} \cdot \dots \cdot \text{pn}(n)^{x_n+1} \end{aligned}$$

<sup>1</sup> Το +1 χρειάζεται γιατί μπορεί κάποιος από τους όρους της ακολουθίας να είναι 0.

<sup>2</sup> Προφανώς η κωδικοποίηση αυτή δεν είναι καθόλου αποδοτική όσον αφορά τον χρόνο που χρειαζόμαστε να κωδικοποιήσουμε και να αποκωδικοποιήσουμε μία ακολουθία.

<sup>3</sup> Στην περίπτωση αυτή έχουμε την κενή ακολουθία φυσικών αριθμών.

όπου  $\text{pn}$  η συνάρτηση του Παραδείγματος 2.2.5.

Παρατηρήστε ότι ένας φυσικός αριθμός (μεγαλύτερος της μονάδας) αποτελεί κωδικοποίηση ακολουθίας  $n$  φυσικών αριθμών αν είναι το γινόμενο δυνάμεων των  $n$ -πρώτων πρώτων αριθμών. Με άλλα λόγια, θα πρέπει οι  $n$ -πρώτοι αριθμοί να τον διαιρούν (και μόνο αυτοί). Επομένως, μπορούμε να ορίσουμε τη χαρακτηριστική συνάρτηση της  $\text{seq}$  ως εξής:

$$\chi_{\text{seq}}(x) = \begin{cases} 1 & , \text{ αν } x = 1 \\ 1 \div ((x+1) \div (\mu j \leq x)[(j > (\mu i \leq x)[\text{pn}(i) \vdash x]) \wedge \text{pn}(j) \mid x]) & , \text{ αλλιώς }^1 \end{cases}$$

όπου γράφουμε  $\text{pn}(i) \vdash x$  αντί για  $(\text{pn}(i), x) \in \overline{\{(x, y) \in \mathbb{N}^2 \mid x \mid y\}}$ <sup>2</sup>.

Τέλος, ορίζουμε:

$$\text{dec}(i, x) = \begin{cases} (\mu j \leq x)[\text{pn}(i)^{j+1} \vdash x] \div 1 & , \text{ αν } x \in \text{seq} \text{ και } \text{pn}(i) \mid x \\ x + 1 & , \text{ αλλιώς} \end{cases}$$

□

**Σύμβαση 2.3.3.** Για να ελαφρύνουμε λίγο τον συμβολισμό θα γράφουμε  $\langle \rangle$  αντί για  $\text{enc}_0$  και  $\langle x_1, \dots, x_n \rangle$  αντί για  $\text{enc}_n(x_1, \dots, x_n)$ <sup>3</sup>.

Η απόδειξη της παρακάτω πρότασης αφήνεται ως άσκηση (Άσκηση 2.9).

**Πρόταση 2.3.4.** Οι συναρτήσεις  $\text{length} : \mathbb{N} \rightarrow \mathbb{N}$ ,  $\text{add} : \mathbb{N}^2 \rightarrow \mathbb{N}$ ,  $\text{replace} : \mathbb{N}^3 \rightarrow \mathbb{N}$  και  $\text{remove} : \mathbb{N}^2 \rightarrow \mathbb{N}$  με:

$$\text{length}(x) = \begin{cases} n & , \text{ αν } x \in \text{seq}, \text{ έστω } x = \langle x_1, \dots, x_n \rangle \\ x + 1 & , \text{ αλλιώς} \end{cases}$$

$$\text{add}(x, y) = \begin{cases} \langle x_1, \dots, x_n, y \rangle & , \text{ αν } x \in \text{seq}, \text{ έστω } x = \langle x_1, \dots, x_n \rangle \\ 0 & , \text{ αλλιώς} \end{cases}$$

$$\text{replace}(x, i, y) = \begin{cases} \langle x_1, \dots, x_{i-1}, y, x_{i+1}, \dots, x_n \rangle & , \text{ αν } x \in \text{seq} \setminus \{1\}, \text{ έστω } x = \langle x_1, \dots, x_n \rangle, \\ & \text{ και } i \in [n] \\ 0 & , \text{ αλλιώς} \end{cases}$$

και

$$\text{remove}(x) = \begin{cases} \langle x_1, \dots, x_{n-1} \rangle & , \text{ αν } x \in \text{seq}, \text{ έστω } x = \langle x_1, \dots, x_n \rangle, \text{ και } n \geq 2 \\ 1 & , \text{ αν } x \in \text{seq} \text{ και } x = \langle x_1 \rangle \\ 0 & , \text{ αλλιώς} \end{cases}$$

είναι πρωτογενώς αναδρομικές.

<sup>2</sup> Λίγη βοήθεια ενδεχομένως να χρειάζεται εδώ: Για να πάρει η  $\chi_{\text{seq}}(x)$  τιμή 1 θα πρέπει  $(x = 1 \text{ ή })$  η ελαχιστοποίηση να πάρει τιμή  $x + 1$ . Έστω  $\text{pn}(i)$  ο πρώτος πρώτος αριθμός που δεν διαιρεί τον  $x$ . Παρατηρήστε ότι αν δεν υπάρχει άλλος πρώτος μεγαλύτερος του  $\text{pn}(i)$  που να διαιρεί τον  $x$  (δηλαδή ο  $x$  διαιρείται από όλους τους πρώτους πριν από τον  $i$ -οστό, και μόνο από αυτούς) τότε η ελαχιστοποίηση (θα «αποτύχει» και) θα επιστρέψει  $x + 1$ .

<sup>3</sup> Χρησιμοποιούμε επίσης την Παρατήρηση 2.2.6.

<sup>3</sup> Για να δούμε ποια απ' όλες τις συναρτήσεις κωδικοποίησης  $\text{enc}_n$  χρησιμοποιούμε κάθε φορά αρκεί να μετρήσουμε το πλήθος των όρων μέσα στις αγκύλες.

**Πρόταση 2.3.5** (Πλήρης πρωτογενής αναδρομή). Έστω  $g : \mathbb{N}^{m-1} \rightarrow \mathbb{N}$  και  $h : \mathbb{N}^{m+1} \rightarrow \mathbb{N}$  πρωτογενώς αναδρομικές συναρτήσεις, όπου  $m > 1$ . Η συνάρτηση  $f : \mathbb{N}^m \rightarrow \mathbb{N}$  που αποτελεί λύση των εξισώσεων:

$$\begin{cases} f(0, x_1, \dots, x_{m-1}) = g(x_1, \dots, x_{m-1}) \\ f(y+1, x_1, \dots, x_{m-1}) = h(\langle f(0, x_1, \dots, x_{m-1}), \dots, f(y, x_1, \dots, x_{m-1}) \rangle, y, x_1, \dots, x_{m-1}) \end{cases}$$

είναι πρωτογενώς αναδρομική.

*Απόδειξη.* Πρώτα θεωρούμε την πρωτογενώς αναδρομική συνάρτηση  $k : \mathbb{N}^m \rightarrow \mathbb{N}$  που αποτελεί λύση των εξισώσεων:

$$\begin{cases} k(0, x_1, \dots, x_{m-1}) = \langle g(x_1, \dots, x_{m-1}) \rangle \\ k(y+1, x_1, \dots, x_{m-1}) = \text{add}(k(y, x_1, \dots, x_{m-1}), h(k(y, x_1, \dots, x_{m-1}), y, x_1, \dots, x_{m-1})) \end{cases}$$

και ορίζουμε την  $f$  ως εξής:

$$f(y, x_1, \dots, x_{m-1}) = \text{dec}(y+1, k(y, x_1, \dots, x_{m-1}))$$

□

**Παρατήρηση 2.3.6.** Αντίστοιχα με την Πρόταση 2.1.7 μπορούμε να ορίσουμε την πλήρη πρωτογενή αναδρομή και χωρίς παραμέτρους.

**Παράδειγμα 2.3.7** (Αριθμοί Fibonacci). Η συνάρτηση  $\text{fib} : \mathbb{N} \rightarrow \mathbb{N}$  με:

$$\text{fib}(n) = \begin{cases} 0 & , \text{ αν } n = 0 \\ 1 & , \text{ αν } n = 1 \\ \text{fib}(n-1) + \text{fib}(n-2) & , \text{ αν } n \geq 2 \end{cases}$$

είναι πρωτογενώς αναδρομική, καθώς αποτελεί λύση των εξισώσεων:

$$\begin{cases} f(0) = 0 \\ f(n+1) = \begin{cases} 1 & , \text{ αν } n = 0 \\ \text{dec}(n+1, \langle f(0), \dots, f(n) \rangle) + \text{dec}(n, \langle f(0), \dots, f(n) \rangle) & , \text{ αλλιώς} \end{cases} \end{cases}$$

**Παράδειγμα 2.3.8** (Ο αλγόριθμος του Ευκλείδη). Θα δείξουμε ότι η συνάρτηση  $\text{gcd} : \mathbb{N}^2 \rightarrow \mathbb{N}$ , με  $\text{gcd}(x, y) = \max\{d \in \mathbb{N} \mid d = 0 \vee (d \mid x \wedge d \mid y)\}$  (ο μέγιστος κοινός διαιρέτης των  $x$  και  $y$  δηλαδή), είναι πρωτογενώς αναδρομική.

Ας θυμηθούμε πρώτα τον αλγόριθμο του Ευκλείδη <sup>1</sup>:

$$\text{MK}\Delta(x, y) = \begin{cases} 0 & , \text{ αν } x = 0 \text{ ή } y = 0 \\ x & , \text{ αν } x, y \geq 1 \text{ και } x \mid y \\ \text{MK}\Delta(y \bmod x, y) & , \text{ αν } 1 \leq x \leq y \text{ και } x \nmid y \\ \text{MK}\Delta(x \bmod y, y) & , \text{ αν } 1 \leq y < x \end{cases}$$

<sup>1</sup> Η εκδοχή αυτή δεν είναι η αποδοτικότερη δυνατή (όσον αφορά το πλήθος επαναλήψεων).

Παρατηρούμε ότι η συνάρτηση gcd αποτελεί λύση των εξισώσεων:

$$f(0, y) = 0$$

$$f(x+1, y) = \begin{cases} 0 & , \text{αν } y = 0 \\ x+1 & , \text{αν } y \geq 1 \text{ και } x+1 \mid y \\ \text{dec}(\text{rm}(y, x+1) + 1, \langle f(0, y), \dots, f(x, y) \rangle) & , \text{αν } x+1 \leq y \text{ και } x+1 \nmid y^1 \\ \text{dec}(\text{rm}(x+1, y) + 1, \langle f(0, y), \dots, f(x, y) \rangle) & , \text{αλλιώς } (1 \leq y < x+1) \end{cases}$$

όπου rm η συνάρτηση του Παραδείγματος 2.1.23, άρα όντως είναι πρωτογενώς αναδρομική.

Στις ασκήσεις θα δούμε ότι υπάρχουν και άλλες μορφές αναδρομής, όπως για παράδειγμα η *αμοιβαία αναδρομή* (Άσκηση 2.10) και η *εμφωλευμένη αναδρομή* (Άσκηση 2.11), που πάλι όμως δεν επεκτείνουν την κλάση των πρωτογενώς αναδρομικών συναρτήσεων. Για τη *διπλή αναδρομή* (Άσκηση 2.13) δεν ισχύει το ίδιο. Συνεπώς ακόμα και βασικές παραλλαγές τις αναδρομής μπορούν να ορίσουν συναρτήσεις που δεν είναι πρωτογενώς αναδρομικές. Αυτό μας οδηγεί άμεσα στη διαπίστωση ότι η κλάση των πρωτογενώς αναδρομικών συναρτήσεων είναι πολύ «στενή<sup>2</sup>» για τους σκοπούς μας.

## 2.4 Ελαχιστικά αναδρομικές συναρτήσεις

Οι πρωτογενώς αναδρομικές συναρτήσεις είναι ολικές συναρτήσεις. Όμως στο Κεφάλαιο 1, που ορίσαμε τις υπολογίσιμες (κατά Turing) συναρτήσεις, είδαμε παραδείγματα συναρτήσεων που είναι υπολογίσιμες αλλά όχι ολικές. Για να φτάσουμε συνεπώς σε έναν δεύτερο ορισμό των υπολογίσιμων συναρτήσεων θα πρέπει να ορίσουμε μία γενικότερη κλάση από αυτήν των πρωτογενώς αναδρομικών. Στην κλάση αυτή θα μας οδηγήσει ένας τελεστής που μπορεί να παράγει και μερικές συναρτήσεις, ο τελεστής της *μη-φραγμένης ελαχιστοποίησης*<sup>3</sup>.

**Ορισμός 2.4.1.** Έστω συνάρτηση  $g : \mathbb{N}^{m+1} \rightarrow \mathbb{N}$ ,  $m \geq 1$ , και  $y \in \mathbb{N}$ . Ο *τελεστής ελαχιστοποίησης της g* (ή *μ-ελαχιστοποίησης*)<sup>4</sup> ορίζεται ως εξής:

$$(\mu_{i \geq y})[g(i, x_1, \dots, x_m) = 0] = \begin{cases} \min\{i \geq y \mid g(i, x_1, \dots, x_m) = 0\}, & \text{αν υπάρχει τέτοιο } i \text{ και} \\ & \text{για κάθε } j \text{ με } y \leq j < i \\ & \text{ισχύει } g(j, x_1, \dots, x_m) > 0 \\ \perp & , \text{αλλιώς} \end{cases}$$

<sup>1</sup> Παρατηρήστε ότι η τιμή  $f(\text{rm}(y, x+1), y)$  υπάρχει στην ακολουθία  $\langle f(0, y), \dots, f(x, y) \rangle$ , καθώς ισχύει ότι  $y \bmod (x+1) \leq x$ . Μάλιστα είναι ο  $(y \bmod (x+1) + 1)$ -οστός όρος της ακολουθίας.

<sup>2</sup> Στενή είναι η αρετή, δεν μπορώ ν' αναπνέψω· μικρός, στενός είναι ο Παράδεισος, δε με χωράει· σαν άνθρωπος μου φαίνεται ο Θεός σας, δεν τον δέλω! [19].

<sup>3</sup> Συνεχίζοντας την παραβολή της προηγούμενης υποοσημείωσης θα μπορούσαμε να πούμε ότι για να ορίσουμε τις υπολογίσιμες συναρτήσεις θα πρέπει να ξεφύγουμε από το ανθρώπινο-πεπερασμένο και να φτάσουμε στο άπειρο, εισάγωντας τον υπολογισμό που διαρκεί για πάντα (αυτό που στο Κεφάλαιο 1 αναφέραμε ως «κόλλημα»).

<sup>4</sup> Η ελαχιστοποίηση αντιστοιχεί στο (μη-φραγμένο) while μίας γλώσσας προγραμματισμού.

**Παρατήρηση 2.4.2.** Ας τονίσουμε μία σημαντική λεπτομέρεια του Ορισμού 2.4.1: Αν για κάποιο  $j \geq y$  ισχύει ότι  $g(j, x_1, \dots, x_m) = \perp$  και για κάθε  $i$  με  $y \leq i < j$  ισχύει ότι  $g(i, x_1, \dots, x_m) > 0$ , ακόμα και αν υπάρχει  $k$  με  $j < k$  για το οποίο  $g(k, x_1, \dots, x_m) = 0$ , έχουμε ότι  $(\mu i \geq y)[g(i, x_1, \dots, x_m) = 0] = \perp$ .

**Ορισμός 2.4.3.** Μία συνάρτηση  $f : \mathbb{N}^m \rightarrow \mathbb{N}$ ,  $m \geq 1$  είναι *ελαχιστικά αναδρομική* (ή *μ-αναδρομική* ή και σκέτο αναδρομική) ανν είναι μία εκ των (a), (b) και (c) του Ορισμού 2.1.1 ή προκύπτει με εφαρμογή των (1), (2) του Ορισμού 2.1.1 και του τελεστή ελαχιστοποίησης, σε ελαχιστικά αναδρομικές συναρτήσεις.

**Ορισμός 2.4.4.** Μία σχέση  $P \subseteq \mathbb{N}^m$ ,  $m \geq 1$ , είναι *ελαχιστικά αναδρομική* (ή *μ-αναδρομική*, ή και σκέτο αναδρομική) ανν η χαρακτηριστική της συνάρτηση  $\chi_P : \mathbb{N}^m \rightarrow \{0, 1\}$  είναι ελαχιστικά αναδρομική.

**Παράδειγμα 2.4.5.** Ο αριθμός  $p \in \mathbb{N}$  καλείται *δίδυμος πρώτος* ανν οι  $p$  και  $p + 2$  είναι πρώτοι αριθμοί. Η συνάρτηση  $\text{trn} : \mathbb{N} \rightarrow \mathbb{N}$  όπου ο  $\text{trn}(x)$  είναι ο  $x$ -οστός δίδυμος πρώτος αριθμός, δηλαδή:

$$\text{trn}(x) = \begin{cases} 1 & , \text{ αν } x = 0 \\ \min\{p \in \mathbb{N} \mid p \text{ δίδυμος πρώτος και υπάρχουν } \geq x \\ \text{δίδυμοι πρώτοι αριθμοί μικρότεροι του } p\} & , \text{ αλλιώς} \end{cases}$$

είναι ελαχιστικά αναδρομική καθώς αποτελεί λύση των εξισώσεων:

$$\begin{cases} f(0) = 1 \\ f(x+1) = \begin{cases} 3 & , \text{ αν } x = 0 \\ (\mu i \geq f(x) + 1)[2 \div (\chi_{\text{Prime}}(i) + \chi_{\text{Prime}}(i+2)) = 0] & , \text{ αλλιώς} \end{cases} \end{cases}$$

όπου η  $\chi_{\text{Prime}}$  ορίζεται στο Παράδειγμα 2.1.27.

**Σημείωση 2.4.6.** Αν υπήρχε ένα άνω φράγμα μέχρι το οποίο θα έπρεπε να ψάξουμε για να βρούμε τον επόμενο δίδυμο πρώτο αριθμό, θα μπορούσαμε να ορίσουμε την  $\text{trn}$  του Παραδείγματος 2.4.5 χρησιμοποιώντας τον τελεστή της φραγμένης ελαχιστοποίησης. Όμως δεν έχει βρεθεί ακόμα τέτοιο άνω φράγμα, όπως δεν έχει ακόμα δοθεί απάντηση στο ερώτημα αν υπάρχουν άπειροι το πλήθος δίδυμοι πρώτοι <sup>1</sup>.

Σύμφωνα με την παραπάνω σημείωση η  $\text{trn}$  είναι μία ελαχιστικά αναδρομική συνάρτηση για την οποία δεν μπορούμε να αποφασίσουμε «ακόμα» <sup>2</sup> αν επιπλέον είναι και πρωτογενώς αναδρομική. Ενδεχομένως το πιο γνωστό παράδειγμα ελαχιστικά αναδρομικής συνάρτησης

<sup>1</sup> Στη δεύτερη περίπτωση ο ορισμός της  $\text{trn}$  θα ήταν προβληματικός...

<sup>2</sup> Σύμφωνα με το πρώτο Θεώρημα Μη-πληρότητας του Gödel υπάρχει πάντα το ενδεχόμενο να μην πάρουμε ποτέ θετική ή αρνητική απάντηση σε αυτό το ερώτημα!

που (αποδεδειγμένα) δεν είναι πρωτογενώς αναδρομική είναι η συνάρτηση του Ackermann που αποτελεί λύση των εξισώσεων <sup>1</sup>:

$$\begin{cases} A(0, y) = y + 1 \\ A(x + 1, 0) = A(x, 1) \\ A(x + 1, y + 1) = A(x, A(x + 1, y)) \end{cases}$$

Συνεπώς ισχύει το ακόλουθο θεώρημα (το οποίο προκύπτει από την Άσκηση 2.16).

**Θεώρημα 2.4.7.** Η κλάση των πρωτογενώς αναδρομικών συναρτήσεων αποτελεί γνήσιο υποσύνολο της κλάσης των ελαχιστικά αναδρομικών συναρτήσεων.

## 2.5 Δεύτερος ορισμός υπολογίσιμων συναρτήσεων

Ο δεύτερος ορισμός των υπολογίσιμων συναρτήσεων είναι ο Ορισμός 2.4.3 και η εξήγηση δίνεται στο ακόλουθο θεώρημα.

**Θεώρημα 2.5.1.** Μία συνάρτηση  $f : \mathbb{N}^m \rightarrow \mathbb{N}$  είναι ελαχιστικά αναδρομική αν είναι (Turing) υπολογίσιμη.

### Η απόδειξη του Θεωρήματος 2.5.1

Για το ευθύ θα περιγράψουμε μόνο την κεντρική ιδέα και θα αφήσουμε τις περισσότερες λεπτομέρειες ως άσκηση για τον αναγνώστη.

Το αντίστροφο παρουσιάζει μεγαλύτερο ενδιαφέρον και θα το δούμε πολύ προσεκτικά. Έστω υπολογίσιμη συνάρτηση  $f$  και έστω  $M$  μία ΤΜ που την υπολογίζει. Το σχεδιάγραμμα της απόδειξης είναι το εξής:

**Στάδιο 1:** Κωδικοποιούμε τα στιγμιότυπα λειτουργίας της  $M$ , για κάποια είσοδο  $n \in \mathbb{N}$ , με αριθμούς από το seq (δες Ορισμό 2.3.1). Έτσι ο υπολογισμός  $M(n)$  θα αντιστοιχεί σε μια ακολουθία από αριθμούς.

**Στάδιο 2:** Ορίζουμε πρωτογενώς αναδρομική συνάρτηση που «ακολουθεί» τον υπολογισμό  $M(n)$ : Δεδομένου του αριθμού ενός στιγμιότυπου μας επιστρέφει τον αριθμό του επόμενου στιγμιότυπου.

**Στάδιο 3:** Ορίζουμε τη συνθήκη που μας δείχνει ότι η  $M(n)$  τερμάτισε <sup>2</sup>.

**Στάδιο 4:** Υπολογίζουμε την τιμή της  $f(n)$ .

<sup>1</sup> Η απόδειξη ότι η Ackermann είναι ελαχιστικά αλλά όχι πρωτογενώς αναδρομική αφήνεται ως άσκηση (Άσκηση 2.16). Με λίγα λόγια θα μπορούσαμε να πούμε ότι η Ackermann «αυξάνει» πιο γρήγορα από οποιαδήποτε πρωτογενώς αναδρομική συνάρτηση.

<sup>2</sup> Μέχρι αυτό το σημείο δεν θα χρειαστεί να χρησιμοποιήσουμε την ελαχιστοποίηση. Εδώ όμως είμαστε αναγκασμένοι να τη χρησιμοποιήσουμε καθώς θα αναζητήσουμε το ελάχιστο «βήμα» για το οποίο ο υπολογισμός της  $M(n)$  δεν έκανε «πρόοδο» (δηλαδή η κεφαλή της  $M$  δεν κινήθηκε).

Απόδειξη Θεωρήματος 2.5.1. ( $\Rightarrow$ ) Αρκεί να δείξουμε ότι οι συναρτήσεις (a), (b) και (c) του Ορισμού 2.1.1 είναι υπολογίσιμες συναρτήσεις και ότι τα (1), (2) του Ορισμού 2.1.1 και η ελαχιστοποίηση, αν εφαρμοστούν σε υπολογίσιμες συναρτήσεις, δίνουν υπολογίσιμη συνάρτηση (δες Άσκηση 2.21).

( $\Leftarrow$ ) Έστω υπολογίσιμη συνάρτηση  $f : \mathbb{N} \rightarrow \mathbb{N}$  και έστω ότι η ΤΜ  $M = (Q, \Sigma, \Gamma, \delta, q_0, q_{\text{τέλος}})$  την υπολογίζει. Χωρίς βλάβη της γενικότητας, θα κάνουμε τις κάτωθι παραδοχές για την  $M$ :

1.  $Q = \{q_0, q_1, \dots, q_n\}$  και η  $q_n$  είναι η τερματική κατάσταση.
2.  $\Sigma = \{1\}$ , δηλαδή ο φυσικός αριθμός της εισόδου (και η τιμή της εξόδου) δίνεται στο μοναδιαίο σύστημα αρίθμησης<sup>1</sup>.
3.  $\Gamma = \{a_0, a_1, \dots, a_k\}$  όπου  $a_0 = \sqcup$ ,  $a_1 = \triangleright$  και  $a_2 = 1$ .
4. Η  $M$  είναι μονοτανιακή και ντετερμινιστική.
5. Τέλος, θα πρέπει η  $M$  να μην κολλάει εξαιτίας μη ύπαρξης επόμενου στιγμιότυπου σύμφωνα με τη  $\delta$  (δες Υποσημείωση 2 Σελίδα 18, και Υποσημείωση 1 Σελίδα 83 για τον λόγο που αυτό είναι απαραίτητο).

**Στάδιο 1.1 Κωδικοποίηση:** Σύμφωνα με τον Ορισμό 1.1.9 ένα στιγμιότυπο χαρακτηρίζεται από τρεις πληροφορίες: την κατάσταση που βρίσκεται η  $M$ , τη λέξη που περιέχει η ταινία της και τη θέση της κεφαλής. Αρχίζουμε *αριθμητικοποιώντας* (ο όρος αυτός αναλύεται στην Παράγραφο Α.5.1) τις τρεις αυτές πληροφορίες, όπου με  $\langle * \rangle_{\mathbb{N}}$  συμβολίζουμε τον αριθμό που αντιστοιχίσαμε στο  $*$ :

- Για κάθε κατάσταση  $q_i \in Q$  ορίζουμε  $\langle q_i \rangle_{\mathbb{N}} = i$ .
- Για κάθε σύμβολο  $a_i \in \Gamma$  ορίζουμε  $\langle a_i \rangle_{\mathbb{N}} = i$ .
- Κάθε λέξη  $s_1 \dots s_l \in \Gamma^*$  ορίζουμε  $\langle s_1 \dots s_l \rangle_{\mathbb{N}} = \text{enc}_l(\langle s_1 \rangle_{\mathbb{N}}, \dots, \langle s_l \rangle_{\mathbb{N}})$ .
- Αντιστοιχούμε τη θέση της κεφαλής στον αριθμό του κελιού που βρίσκεται η κεφαλή.
- Αριθμητικοποιήσουμε τα  $A, \Delta$  ως εξής:  $\langle A \rangle_{\mathbb{N}} = 0$  και  $\langle \Delta \rangle_{\mathbb{N}} = 2$ .

Συνεπώς, μπορούμε να θεωρήσουμε το στιγμιότυπο  $\triangleright w_1 q_i w_2$  ως μία ακολουθία τριών αριθμών, των:  $i$  (κατάσταση),  $|w_1| + 2$  (θέση κεφαλής) και  $\langle \triangleright w_1 w_2 \rangle_{\mathbb{N}}$  (λέξη ταινίας), και να το αριθμητικοποιήσουμε περαιτέρω ως εξής:

$$\langle \triangleright w_1 q_i w_2 \rangle_{\mathbb{N}} = \text{enc}_3(i, |w_1| + 2, \langle \triangleright w_1 w_2 \rangle_{\mathbb{N}})$$

Για παράδειγμα το αρχικό στιγμιότυπο αριθμητικοποιείται ως:

$$\langle \triangleright q_0 \underbrace{1 \dots 1}_{n+1 \text{ φορές}} \rangle_{\mathbb{N}} = \text{enc}_3(0, 2, \langle \triangleright \underbrace{1 \dots 1}_{n+1 \text{ φορές}} \rangle_{\mathbb{N}}) = 2^1 \cdot 3^3 \cdot 5^{2^2 \cdot 3^3 \cdot 5^3 \dots p_{n+2}^3 + 1}$$

<sup>1</sup> Σε αυτό το σύστημα το 0 γράφεται ως 1 και ο αριθμός  $n$  ως  $\underbrace{1 \dots 1}_{n+1 \text{ φορές}}$ .

Στάδιο 1.2 Αποκωδικοποίηση: Έστω  $x \in \text{seq}$  η κωδικοποίηση ενός στιγμιότυπου της  $M(n)$ . Θα συμβολίσουμε τις συναρτήσεις που αποκωδικοποιούν το  $x$  ως εξής <sup>1</sup>:

- $\text{cs}(x) = \text{dec}(1, x)$  (επιστρέφει τον αριθμό της κατάστασης)
- $\text{ctp}(x) = \text{dec}(2, x)$  (επιστρέφει τη θέση της κεφαλής)
- $\text{ctn}(x) = \text{dec}(3, x)$  (επιστρέφει τον αριθμό που αντιστοιχεί στη λέξη που περιέχει η ταινία)
- $\text{cts}(x) = \text{dec}(\text{ctp}(x), \text{ctn}(x))$  (επιστρέφει το σύμβολο που διαβάζει η κεφαλή)

Στάδιο 2: Θα ορίσουμε τη συνάρτηση  $\text{tr}_M : \mathbb{N}^2 \rightarrow \mathbb{N}$  με το  $\text{tr}_M(x, t)$  να ισούται με τον αριθμό που αντιστοιχεί στο στιγμιότυπο της  $M(x)$  μετά από  $t$  βήματα υπολογισμού <sup>2</sup>. Πρώτα θα ορίσουμε συναρτήσεις που μας επιστρέφουν τον αριθμό που αντιστοιχεί στην επόμενη κατάσταση, στην επόμενη θέση της κεφαλής και στην επόμενη λέξη στην ταινία, και μετά θα τα κωδικοποιήσουμε όλα μαζί σε έναν αριθμό που θα αντιστοιχεί στο επόμενο στιγμιότυπο.

Ας υποθέσουμε ότι η συνάρτηση  $\delta$  περιέχει τις μεταβάσεις:

$$\begin{aligned} \delta(q_{i_0}, b_0) &= (q_{j_0}, c_0, d_0) \\ \delta(q_{i_1}, b_1) &= (q_{j_1}, c_1, d_1) \\ &\vdots \\ \delta(q_{i_m}, b_m) &= (q_{j_m}, c_m, d_m) \\ \delta(q_n, b) &= \perp, \forall b \in \Gamma^3 \end{aligned}$$

όπου  $q_{i_r} \in Q \setminus \{q_n\}$ ,  $q_{j_r} \in Q$ ,  $b_r, c_r \in \Gamma$  και  $d_r \in \{A, \Delta\}$  για  $r \in [m]$ . Ορίζουμε τη συνάρτηση  $\text{ns} : \mathbb{N} \rightarrow \mathbb{N}$  με:

$$\text{ns}(x) = \begin{cases} j_0 & , \text{ αν } \text{cs}(x) = i_0 \text{ και } \text{cts}(x) = \langle b_0 \rangle_{\mathbb{N}} \\ j_1 & , \text{ αν } \text{cs}(x) = i_1 \text{ και } \text{cts}(x) = \langle b_1 \rangle_{\mathbb{N}} \\ \vdots & \\ j_m & , \text{ αν } \text{cs}(x) = i_m \text{ και } \text{cts}(x) = \langle b_m \rangle_{\mathbb{N}} \\ \text{cs}(x) & , \text{ αλλιώς} \end{cases}$$

που επιστρέφει την αριθμητικοποίηση της επόμενης κατάστασης, τη συνάρτηση  $\text{ntp} : \mathbb{N} \rightarrow \mathbb{N}$

<sup>1</sup> Για να κρατήσουμε την απόδειξη όσο πιο απλή γίνεται δεν θα ορίσουμε τις ακόλουθες συναρτήσεις για τα  $x \notin \text{seq}$ . Για αυτά θα επιστρέφουν κάποια «παράλογη» τιμή.

<sup>2</sup> Για παράδειγμα:  $\text{tr}_M(x, 0) = \langle \triangleright q_0 \underbrace{1 \cdots 1}_{x+1 \text{ φορές}} \rangle_{\mathbb{N}}$ .

<sup>3</sup> Σύμφωνα με τις παροχές που έχουμε κάνει για την  $M$ , αυτά είναι τα μόνα ορίσματα για τα οποία η τιμή της  $\delta$  δεν ορίζεται.

με:

$$\text{ntp}(x) = \begin{cases} \text{ctp}(x) + \langle d_0 \rangle_{\mathbb{N}} \div 1 & , \text{ αν } \text{cs}(x) = i_0 \text{ και } \text{cts}(x) = \langle b_0 \rangle_{\mathbb{N}} \\ \text{ctp}(x) + \langle d_1 \rangle_{\mathbb{N}} \div 1 & , \text{ αν } \text{cs}(x) = i_1 \text{ και } \text{cts}(x) = \langle b_1 \rangle_{\mathbb{N}} \\ \vdots & \\ \text{ctp}(x) + \langle d_m \rangle_{\mathbb{N}} \div 1 & , \text{ αν } \text{cs}(x) = i_m \text{ και } \text{cts}(x) = \langle b_m \rangle_{\mathbb{N}} \\ \text{ctp}(x) & , \text{ αλλιώς} \end{cases}^1$$

που επιστρέφει την αριθμητικοποίηση της επόμενης δέσης στην ταινία και, τέλος, τη συνάρτηση  $\text{nts} : \mathbb{N} \rightarrow \mathbb{N}$  με:

$$\text{nts}(x) = \begin{cases} \langle c_0 \rangle_{\mathbb{N}} & , \text{ αν } \text{cs}(x) = i_0 \text{ και } \text{cts}(x) = \langle b_0 \rangle_{\mathbb{N}} \\ \langle c_1 \rangle_{\mathbb{N}} & , \text{ αν } \text{cs}(x) = i_1 \text{ και } \text{cts}(x) = \langle b_1 \rangle_{\mathbb{N}} \\ \vdots & \\ \langle c_m \rangle_{\mathbb{N}} & , \text{ αν } \text{cs}(x) = i_m \text{ και } \text{cts}(x) = \langle b_m \rangle_{\mathbb{N}} \\ \text{cts}(x) & , \text{ αλλιώς} \end{cases}$$

που επιστρέφει την αριθμητικοποίηση του συμβόλου που πρέπει να γράψουμε στην ταινία.

Παρατηρήστε ότι μετά από μία μετάβαση της  $M$  αλλάζει μόνο το σύμβολο που διαβάζει η κεφαλή. Συνεπώς, αν  $x \in \mathbb{N}$  είναι ο αριθμός που αντιστοιχεί σε ένα στιγμιότυπο, για να βρούμε τον αριθμό που αντιστοιχεί στην επόμενη λέξη πρέπει να αλλάξουμε στην ακολουθία που κωδικοποιεί ο αριθμός  $\text{ctn}(x)$  τον  $\text{ctp}(x)$ -οστό όρο σε  $\text{nts}(x)$ . Αυτό μπορούμε να το κάνουμε εφαρμόζοντας τη συνάρτηση  $\text{replace}$  από την Πρόταση 2.3.4. Αν η λέξη στην ταινία αυξάνει σε μέγεθος <sup>2</sup> τότε απλά προσθέτουμε τον αριθμό  $\text{nts}(x)$  στην ακολουθία (χρησιμοποιώντας την  $\text{add}$  της Πρότασης 2.3.4). Ορίζουμε λοιπόν τη συνάρτηση  $\text{ntn} : \mathbb{N} \rightarrow \mathbb{N}$  με:

$$\text{ntn}(x) = \begin{cases} \text{replace}(\text{ctn}(x), \text{ctp}(x), \text{nts}(x)) & , \text{ αν } \text{pn}(\text{ctp}(x)) \mid \text{ctn}(x) \\ \text{add}(\text{ctn}(x), \text{nts}(x)) & , \text{ αλλιώς} \end{cases}$$

που επιστρέφει την αριθμητικοποίηση της επόμενης λέξης στην ταινία.

Τώρα είμαστε σε θέση να ορίσουμε τη συνάρτηση  $\text{tr}_M$ . Η  $\text{tr}_M$  είναι η λύση των εξισώσεων:

$$\begin{cases} f(x, 0) = \langle \triangleright q_0 \underbrace{1 \cdots 1}_{x+1 \text{ φορές}} \rangle_{\mathbb{N}} \\ f(x, t+1) = \text{enc}_3(\text{ns}(f(x, t)), \text{ntp}(f(x, t)), \text{ntn}(f(x, t))) \end{cases}$$

Οι συναρτήσεις  $\text{cs}$ ,  $\text{ctp}$ ,  $\text{ctn}$ ,  $\text{cts}$  και  $\text{ns}$ ,  $\text{ntp}$ ,  $\text{nts}$ ,  $\text{ntn}$  είναι όλες πρωτογενώς αναδρομικές, άρα και η  $\text{tr}_M$  είναι πρωτογενώς αναδρομική.

**Στάδιο 3:** Παρατηρήστε ότι αν η  $M$  με είσοδο  $x \in \mathbb{N}$  τερματίσει σε  $t$ -θήματα τότε  $\text{tr}_M(x, t') = \text{tr}_M(x, t)$  για κάθε  $t' \geq t$ . Επιπλέον, αν η  $M(x)$  δεν τερματίσει στο θήμα  $t$  τότε  $\text{tr}_M(x, t+1) \neq$

<sup>1</sup> Εδώ γίνεται εμφανής ο λόγος που αντιστοιχήσαμε το  $A$  στο 0 και το  $\Delta$  στο 2.

<sup>2</sup> Δηλαδή επισκεπτόμαστε κελί της ταινίας που δεν έχουμε προσεγγίσει στο παρελθόν.

$\text{tr}_M(x, t)$ <sup>1</sup>. Συνεπώς η συνθήκη που μας δείχνει ότι η  $M(x)$  τερματίζει είναι η ακόλουθη:

Υπάρχει  $t_0 \in \mathbb{N}$  τέτοιο ώστε το  $\text{tr}_M(x, t)$  να έχει την ίδια τιμή για κάθε  $t \geq t_0$ .

Από τον τρόπο που ορίσαμε την  $\text{tr}_M$ , αυτό συμβαίνει άπαξ και δύο συνεχόμενες τιμές της είναι ίσες. Επομένως για να βρούμε το βήμα κατά το οποίο η  $M(x)$  τερματίζει (αν φυσικά τερματίζει) πρέπει να βρούμε το ελάχιστο  $t \in \mathbb{N}$  για το οποίο  $\text{tr}_M(x, t+1) = \text{tr}_M(x, t)$  (αν φυσικά υπάρχει). Ορίζουμε λοιπόν την ελαχιστικά αναδρομική συνάρτηση  $\text{term} : \mathbb{N} \rightarrow \mathbb{N}$  με:

$$\text{term}(x) = (\mu t \geq 0)[1 \div \chi_{=}(\text{tr}_M(x, t+1), \text{tr}_M(x, t)) = 0]$$

που επιστρέφει το (ελάχιστο) πλήθος βημάτων που χρειάζεται η  $M(x)$  για να τερματίσει (η  $\chi_{=}$  ορίζεται στο Παράδειγμα 2.1.16).

Στάδιο 4: Τέλος, ορίζουμε:

$$f(x) = \text{length}(\text{ctn}(\text{tr}_M(x, \text{term}(x)))) \div 2$$

όπου  $\text{length}$  η συνάρτηση της Πρότασης 2.3.4. □

Μέσα από την απόδειξη του Θεωρήματος 2.5.1 προκύπτει άμεσα το ακόλουθο Πόρισμα.

**Πόρισμα 2.5.2** (Κανονική Μορφή Kleene). Για κάθε ελαχιστικά αναδρομική συνάρτηση  $f : \mathbb{N}^m \rightarrow \mathbb{N}$ ,  $m \geq 1$ , υπάρχουν πρωτογενώς αναδρομικές συναρτήσεις  $g : \mathbb{N}^{m+1} \rightarrow \mathbb{N}$  και  $h : \mathbb{N}^{m+1} \rightarrow \mathbb{N}$  τέτοιες ώστε:

$$f(x_1, \dots, x_m) = h((\mu i \geq 0)[g(i, x_1, \dots, x_m) = 0], x_1, \dots, x_m)$$

Η ακόλουθη πρόταση θα μας φανεί χρήσιμη στη συνέχεια.

**Παρατήρηση 2.5.3.** Υπάρχει TM  $M_{TM \rightarrow \mu}$  που δέχεται σαν είσοδο την κωδικοποίηση μίας TM  $M$  και επιστρέφει την κωδικοποίηση<sup>2</sup> της ελαχιστικά αναδρομικής συνάρτησης που υπολογίζει η  $M$ .

## Ασκήσεις

**2.1** (☆☆☆). Δώστε εναλλακτικούς ορισμούς των συναρτήσεων  $\text{plus}$ ,  $\text{mult}$ ,  $\text{fact}$ ,  $\div$ ,  $\min$ ,  $\max$  και  $\text{exp}$ .

<sup>1</sup> Για παράδειγμα η κεφαλή κινείται, συνεπώς  $\text{ntp}(\text{tr}_M(x, t)) \neq \text{ctp}(\text{tr}_M(x, t))$  και κατ' επέκταση  $\text{tr}_M(x, t+1) \neq \text{tr}_M(x, t)$ . Αυτός είναι ο λόγος που στην αρχή θεωρήσαμε ότι η  $M$  δεν κολλάει εξαιτίας μη ύπαρξης επόμενου στιγμιότυπου σύμφωνα με τη συνάρτηση μεταβάσεών της.

<sup>2</sup> Ένα παράδειγμα κωδικοποίησης ελαχιστικά αναδρομικών συναρτήσεων δίνεται από το Θεώρημα 3.3.8 στο οποίο θα «αντιστοιχίσουμε» σε κάθε αναδρομική συνάρτηση έναν λ-όρο, μία λέξη δηλαδή στο αλφάβητο  $\{x, 0, 1, 2, 3, 4, 5, 6, 7, 8, 9, (, ), \lambda, \cdot\}$ .

**2.2 (☆☆☆).** Δείξτε ότι όλες οι πρωτογενώς αναδρομικές συναρτήσεις είναι ολικές συναρτήσεις και ότι η κλάση των πρωτογενώς αναδρομικών συναρτήσεων είναι αριθμήσιμη.

**2.3 (☆☆☆).** Δείξτε ότι για κάθε  $m \in \mathbb{N}$  οι συναρτήσεις  $\min, \max : \mathbb{N}^m \rightarrow \mathbb{N}$ , με

$$\min_m = \min\{x_1, \dots, x_m\} \text{ και } \max_m = \max\{x_1, \dots, x_m\}$$

είναι πρωτογενώς αναδρομικές.

**2.4 (★☆☆).** Έστω  $g : \mathbb{N}^2 \rightarrow \mathbb{N}$  πρωτογενώς αναδρομική συνάρτηση. Δείξτε ότι οι συναρτήσεις  $\text{sum}_g, \text{prod}_g : \mathbb{N}^2 \rightarrow \mathbb{N}$ , με

$$\text{sum}_g(z, x) = \sum_{i=0}^z g(i, x) \text{ και } \text{prod}_g(z, x) = \prod_{i=0}^z g(i, x)$$

είναι πρωτογενώς αναδρομικές.

**2.5 (☆☆☆).** Αποδείξτε τις Προτάσεις 2.1.22, 2.1.19 και 2.1.20.

**2.6 (☆☆☆).** Έστω  $R \subseteq \mathbb{N}^2$  πρωτογενώς αναδρομική σχέση. Δείξτε ότι οι σχέσεις:

$$\begin{aligned} (\forall y < z)[R] &= \{x \in \mathbb{N} \mid \text{Για κάθε } y < z \text{ ισχύει ότι } (x, y) \in R\} \\ (\exists y < z)[R] &= \{x \in \mathbb{N} \mid \text{Υπάρχει } y < z \text{ για το οποίο ισχύει ότι } (x, y) \in R\} \end{aligned}$$

είναι πρωτογενώς αναδρομικές.

**2.7 (★☆☆).** Έστω  $R \subseteq \mathbb{N}^2$  πρωτογενώς αναδρομική σχέση. Δείξτε ότι η συνάρτηση  $f : \mathbb{N}^2 \rightarrow \mathbb{N}$ , με  $f(z, x) = (\mu i \leq z)[(i, x) \in R]$  είναι πρωτογενώς αναδρομική.

**2.8 (★☆☆).** Δείξτε ότι για κάθε  $b \in \mathbb{N} \setminus \{0, 1\}$  η συνάρτηση  $\log_b : \mathbb{N} \rightarrow \mathbb{N}$  με:

$$\log_b(x) = \begin{cases} \max\{n \in \mathbb{N} \mid b^n \mid x\} & , \text{ αν } x > 0 \\ 0 & , \text{ αλλιώς} \end{cases}$$

είναι πρωτογενώς αναδρομική.

**2.9 (★☆☆).** Αποδείξτε την Πρόταση 2.3.4.

**2.10 (★☆☆).** (Αμοιβαία πρωτογενής αναδρομή) Έστω  $g_1, g_2 : \mathbb{N} \rightarrow \mathbb{N}$  και  $h_1, h_2 : \mathbb{N}^4 \rightarrow \mathbb{N}$  πρωτογενώς αναδρομικές συναρτήσεις. Δείξτε ότι οι  $f_1, f_2 : \mathbb{N}^2 \rightarrow \mathbb{N}$  που ικανοποιούν τις εξισώσεις:

$$\begin{cases} f_1(0, x) = g_1(x) \\ f_1(y+1, x) = h_1(f_1(y, x), f_2(y, x), y, x) \\ f_2(0, x) = g_2(x) \\ f_2(y+1, x) = h_2(f_1(y, x), f_2(y, x), y, x) \end{cases}$$

είναι πρωτογενώς αναδρομικές συναρτήσεις.

**2.11 (★★★).** (Εμφωλευμένη πρωτογενής αναδρομή) Έστω συναρτήσεις  $g : \mathbb{N} \rightarrow \mathbb{N}$ ,  $h : \mathbb{N}^3 \rightarrow \mathbb{N}$  και  $\tau : \mathbb{N}^2 \rightarrow \mathbb{N}$ . Δείξτε ότι υπάρχει συνάρτηση που είναι λύση των εξισώσεων:

$$\begin{cases} f(0, y) = g(y) \\ f(x+1, y) = h(f(x, \tau(x, y)), x, y) \end{cases}$$

και ότι αν οι  $g, h$  και  $\tau$  είναι πρωτογενώς αναδρομικές, τότε και η  $f$  είναι πρωτογενώς αναδρομική.

**2.12 (★★☆).** Έστω συναρτήσεις  $h : \mathbb{N}^3 \rightarrow \mathbb{N}$  και  $g_1, g_2 : \mathbb{N} \rightarrow \mathbb{N}$ . Δείξτε ότι υπάρχει συνάρτηση που είναι λύση των εξισώσεων:

$$\begin{cases} f(0, y) = g_1(y) \\ f(1, y) = g_2(y) \\ f(x+2, y) = h(f(x+1), f(x), y) \end{cases}$$

και ότι αν οι  $h, g_1, g_2$  είναι πρωτογενώς αναδρομικές, τότε και η  $f$  είναι πρωτογενώς αναδρομική.

**2.13 (★★★).** (Διπλή αναδρομή) Έστω συναρτήσεις  $g : \mathbb{N} \rightarrow \mathbb{N}$ ,  $h : \mathbb{N}^2 \rightarrow \mathbb{N}$ ,  $\tau : \mathbb{N}^4 \rightarrow \mathbb{N}$  και  $z \in \mathbb{N}$ . Δείξτε ότι υπάρχει συνάρτηση που είναι λύση των εξισώσεων:

$$\begin{cases} f(0, y) = g(y) \\ f(x+1, 0) = h(f(x, z), x) \\ f(x+1, y+1) = \tau(f(x+1, y), f(x, z), x, y) \end{cases}$$

και ότι αν οι  $g, h$  και  $\tau$  είναι ελαχιστικά αναδρομικές, τότε και η  $f$  είναι ελαχιστικά αναδρομική.

**2.14 (☆☆☆).** Έστω  $h : \mathbb{N}^m \rightarrow \mathbb{N}$  και  $g : \mathbb{N}^{m+1} \rightarrow \mathbb{N}$ ,  $m \geq 1$ , πρωτογενώς αναδρομικές συναρτήσεις. Ορίστε τη συνάρτηση  $f : \mathbb{N}^m \rightarrow \mathbb{N}$  με:

$$f(x_1, \dots, x_m) = (\mu i \leq h(x_1, \dots, x_m)) [g(i, x_1, \dots, x_m) = 0]$$

χρησιμοποιώντας τον τελεστή της (μη-φραγμένης) ελαχιστοποίησης.

**2.15 (★☆☆).** Δείξτε ότι η συνάρτηση  $- : \mathbb{N}^2 \rightarrow \mathbb{N}$  με:

$$-(x, y) = \begin{cases} x - y & , \text{ αν } x \geq y \\ \perp & , \text{ αλλιώς} \end{cases}$$

είναι ελαχιστικά αναδρομική.

**2.16 (★★☆).** Δείξτε ότι η συνάρτηση του Ackermann (Σελίδα 79) είναι ελαχιστικά αλλά όχι πρωτογενώς αναδρομική.

**2.17 (☆☆☆).** Δώστε παράδειγμα ολικής, ελαχιστικά αναδρομικής συνάρτησης, που δεν είναι πρωτογενώς αναδρομική και παίρνει τιμές 0 και 1.

**2.18 (★★★).** Δώστε παράδειγμα ολικής, ελαχιστικά αναδρομικής συνάρτησης, που δεν είναι πρωτογενώς αναδρομική και παίρνει τιμές 0 και 1, χωρίς να χρησιμοποιήσετε τη συνάρτηση του Ackermann.

**2.19 (☆☆☆).** Ο Αρχιμήδης σε επιστολή του προς τον Βασιλιά Γέλωντα τον Συρακούσιο, προκειμένου να τον πείσει ότι υπάρχουν φυσικοί αριθμοί μεγαλύτεροι σε μέγεθος από το πλήθος κόκκων άμμου που χρειάζεται για να γεμίσει το σύμπαν (σύμφωνα φυσικά με την τότε αντίληψη για το σύμπαν), εκτίμησε ότι το πλήθος κόκκων που θα χρειαστεί είναι μικρότερο από  $10^{63}$  χρησιμοποιώντας την ακόλουθη συνάρτηση (που ορίζεται με διπλή αναδρομή):

$$\begin{cases} f(0, y) = 1 \\ f(x + 1, 0) = f(x, a) \\ f(x + 1, y + 1) = a \cdot f(x + 1, y) \end{cases}$$

για  $a = 10^8$  που ισοδυναμεί με μία μυριάδα μυριάδες (αυτός θεωρείται ο μεγαλύτερος αριθμός για τον οποίο οι αρχαίοι Έλληνες είχαν όνομα). Δείξτε ότι η συνάρτηση αυτή είναι ελαχιστικά αναδρομική.

**2.20 (☆☆☆).** Δείξτε ότι υπάρχει συνάρτηση  $f : \mathbb{N} \rightarrow \mathbb{N}$  που δεν είναι ελαχιστικά αναδρομική (δες και Άσκηση 2.2).

**2.21 (★☆☆).** Συμπληρώστε τις λεπτομέρειες του ευθέως της απόδειξης του Θεωρήματος 2.5.1.

### 3.1 Εισαγωγή

Συνεχίζοντας την παρουσίαση των διαφόρων μοντέλων υπολογισμού θα μελετήσουμε τον λ-λογισμό, το πρώτο χρονικά μοντέλο που αναπτύχθηκε σε τόσο μεγάλο βαθμό ώστε να δώσει απάντηση στα καίρια ερωτήματα που απασχολούσαν την κοινότητα των λογικών στις αρχές του εικοστού αιώνα. Ο λ-λογισμός εισήχθη στις αρχές του 1930 από τον Alonzo Church ως ένα σύστημα που θα μπορούσε να δεμελιώσει τα μαθηματικά με κεντρικό όργανο την συνάρτηση. Όταν αποδείχθηκε όμως ότι αυτός ο στόχος δεν είναι επιτεύξιμος, ο Church έστρεψε την προσοχή του στον ορισμό της «Υπολογισιμότητας», με απώτερο σκοπό την απάντηση του Entscheidungsproblem που είχε θέσει ο David Hilbert.

Στον μετέπειτα «αγώνα» για την επικράτηση ενός μοντέλου υπολογισμού, δηλαδή τυπικής προσέγγισης της έννοιας του αλγορίθμου, παρόλο που σε κάθε βασικό σταθμό ο λ-λογισμός έφτασε πρώτος μπροστά από της μηχανές Turing, τελικά τερμάτισε πίσω από αυτές. Ο λόγος φυσικά είναι ότι η μηχανές Turing αποτελούσαν μια καλή αποτύπωση στο χαρτί ενός υποτυπώδους ηλεκτρονικού υπολογιστή και ως εκ τούτου, όταν τελικά η Θεωρία Υπολογισμού αυτονομήθηκε από τη Λογική, κρίθηκαν διαισθητικότερες των λ-όρων. Όμως στο πεδίο στο οποίο ο λ-λογισμός αναμφισβήτητα επικρατεί είναι ο λεγόμενος *Συναρτησιακός Προγραμματισμός*, δηλαδή η αποκλειστική χρήση συναρτήσεων για τον υπολογισμό.

Σκοπός του κεφαλαίου αυτού είναι να αποκαλύψουμε μέσω του λ-λογισμού την πραγματική διάσταση της έννοιας της συνάρτησης. Ας ξεκινήσουμε λοιπόν με μια «φιλοσοφική» συζήτηση περί συναρτήσεων.

#### 3.1.1 Περί συναρτήσεων

Στο Κεφάλαιο 0 δώσαμε τον συνολοθεωρητικό ορισμό της συνάρτησης. Στα υπόλοιπα κεφάλαια προσπαθήσαμε να δώσουμε ισοδύναμους αλλά εντελώς διαφορετικούς ορισμούς της κλάσης των υπολογίσιμων συναρτήσεων. Αυτό που δεν κάναμε σαφές τότε είναι ότι έχει

εξίσου μεγάλη σημασία ο τρόπος με τον οποίο υπολογίζεται μία συνάρτηση, ο αλγόριθμος δηλαδή που την υπολογίζει (είτε αυτός είναι μία ΤΜ είτε ο ορισμός της ως αναδρομική συνάρτηση). Για παράδειγμα οι συναρτήσεις  $f : \mathbb{N} \rightarrow \mathbb{N}$  με  $f(x) = 2x$  και  $g : \mathbb{N} \rightarrow \mathbb{N}$  με  $g(x) = x + x$  σύμφωνα με τον Ορισμό 0.1.9 αποτελούν την «ίδια» συνάρτηση, καθώς σαν σύνολα είναι ίσα, όμως ακολουθώντας τον Ορισμό 2.1.1 την πρώτη θα την ορίζαμε ως  $f(x) = \text{mult}(c_2^1(x), x)$  ενώ τη δεύτερη ως  $g(x) = \text{plus}(x, x)$ . Ο λόγος που αυτές οι δύο συναρτήσεις διαφέρουν υπό το πρίσμα της Θεωρίας Αναδρομής είναι ότι διαφέρει ο αλγόριθμος που τις υπολογίζει. Αυτή η διάκριση για το μεγαλύτερο κομμάτι των Θεωρητικών Μαθηματικών δεν έχει καμία απολύτως σημασία, στο κομμάτι όμως των Υπολογιστικών Μαθηματικών έχει κεντρικό ρόλο, κυρίως όταν βάλουμε στην εξίσωση και την «αποδοτικότητα» του υπολογισμού μίας συνάρτησης. Μία ενδεικτική περίπτωση είναι η συνάρτηση  $\text{fib}$  που είδαμε στο Παράδειγμα 2.3.7, όπου ο αναδρομικός αλγόριθμος που εφαρμόζει τυφλά τον τύπο  $f(n) = f(n-1) + f(n-2)$  χρειάζεται πολύ παραπάνω «χρόνο» από τον αλγόριθμο που υπολογίζει τις τιμές  $f(0), f(1), \dots, f(n)$  χρησιμοποιώντας τις ήδη υπολογισμένες τιμές (ο αλγόριθμος του Παραδείγματος 2.3.7 δηλαδή).

Ένα ακόμα σημείο όπου ο συνολοθεωρητικός ορισμός δεν επαρκεί για τους σκοπούς μας είναι το γεγονός ότι δεν μας επιτρέπει να έχουμε συναρτήσεις που έχουν ως είσοδο άλλες συναρτήσεις. Φυσικά κάποιος θα προβάλλει τον ορισμό της σύνδεσης συναρτήσεων (Ορισμός 0.1.14) και θα ισχυριστεί ότι μπορεί υπό περιπτώσεις να λύσει αυτό το πρόβλημα. Η σύνδεση όμως δεν μπορεί να μας επιτρέψει να έχουμε συναρτήσεις που έχουν σαν είσοδο τον ίδιο τους τον εαυτό! Στην Πληροφορική το φαινόμενο της αυτοεφαρμογής είναι αρκετά σύνηδες και ο λόγος που είναι εφικτό είναι ότι οι συναρτήσεις αντιμετωπίζονταν σαν κανόνες υπολογισμού (ή αλγόριθμοι αν προτιμάτε). Συνεπώς όταν μια συνάρτηση δέχεται σαν είσοδο τον εαυτό της στην ουσία έχουμε μία επαναληπτική εκτέλεση των κανόνων υπολογισμού της.

Το γεγονός ότι στον λ-λογισμό μπορούμε να έχουμε συναρτήσεις που δέχονται ως είσοδο άλλες συναρτήσεις μας δίνει το δικαίωμα να επικεντρωθούμε αποκλειστικά σε συναρτήσεις μίας μεταβλητής. Ο τρόπος που το κάνουμε αυτό είναι ο εξής: Όταν θέλουμε να ορίσουμε μια συνάρτηση  $n$  μεταβλητών ορίζουμε μία συνάρτηση μίας μεταβλητής στην οποία έπειτα θα δώσουμε ως είσοδο μία συνάρτηση με  $n-1$  μεταβλητές. Θα επανέλθουμε σε αυτό το θέμα με μεγαλύτερη λεπτομέρεια όταν θα έχουμε δει το συντακτικό του λ-λογισμού<sup>1</sup>.

### 3.1.2 Περί συμβολισμού

Στον λ-λογισμό ο συμβολισμός έχει κυρίαρχο ρόλο. Παρόλο που οι λ-όροι ενδεχομένως δείχνουν αρκετά περίπλοκοι, ο ορισμός τους βασίζεται σε τρεις πολύ απλές ιδέες:

1. Εφαρμογή
2. Αφαίρεση
3. Συστολή

Ας θεωρήσουμε μία συνάρτηση φυσικών αριθμών, παραδείγματος χάρη την  $f(x) = x^2$ . Μας ενδιαφέρει η τιμή που έχει η  $f$  για κάποιον συγκεκριμένο αριθμό, ας υποθέσουμε

<sup>1</sup> Η ιδέα αυτή στη βιβλιογραφία συναντάται ως *Currying*, προς τιμήν του *Haskell Curry* που την έκανε δημοφιλή.

τον αριθμό 3. Η συνήθης γραφή αυτής της εφαρμογής της  $f$  πάνω στον αριθμό 3 είναι  $f(3)$ . Στους λ-όρους για να συμβολίσουμε την εφαρμογή αυτή απλά θα μεταφέρουμε τις παρενθέσεις γράφοντας  $(f3)$ . Εδώ θα πρέπει να τονίσουμε ότι η εφαρμογή γίνεται μόνο μεταξύ δύο λ-όρων<sup>1</sup>, ως εκ τούτου θα πρέπει να ορίσουμε τους φυσικούς αριθμούς ως λ-όρους (ως συναρτήσεις δηλαδή, Ορισμός 3.3.2).

Ας υποθέσουμε τώρα ότι θέλουμε να εκφράσουμε τις συναρτήσεις  $f(x) = x + y$  και  $g(y) = x + y$ , όπου η  $x$  για την  $f$  και η  $y$  για την  $g$  αποτελούν *ελεύθερες μεταβλητές*. Ο Church εισήγαγε έναν τρόπο που μας επιτρέπει να συμβολίσουμε τις δύο συναρτήσεις χωρίς να χρειαζόμαστε δύο διαφορετικά ονόματα για να τις ξεχωρίσουμε: Την πρώτη τη συμβόλισε ως  $\lambda x.(x+y)$  και τη δεύτερη ως  $\lambda y.(x+y)$ . Η λ-αφαίρεση χρησιμοποιείται για να υποδηλώσει αυτό που συνήθως αποκαλούμε «μεταβλητή» της συνάρτησης. Η πιο σημαντική χρήση όμως της λ-αφαίρεσης είναι ότι μας δείχνει τη θέση μέσα στον λ-όρο που θα γίνει η εφαρμογή κατά τον υπολογισμό της τιμής της συνάρτησης. Ο υπολογισμός αυτός γίνεται σε συμβολικό επίπεδο μέσω μιας ακολουθίας αντικαταστάσεων μεταβλητών με λ-όρους. Αυτές οι αντικαταστάσεις αποκαλούνται β-συστολές.

Ας δούμε ένα παράδειγμα. Θεωρήστε τον όρο  $\lambda x.M$  και υποθέστε ότι θέλουμε να τον εφαρμόσουμε στον όρο  $N$ . Η εφαρμογή γίνεται μέσω της β-συστολής ως εξής<sup>2</sup>:

$$(\lambda x.M)N \rightarrow_{\beta} M[x/N]$$

όπου με  $M[x/N]$  συμβολίσουμε τον όρο που προκύπτει μετά από την αντικατάσταση κάθε «ελεύθερης» εμφάνισης της  $x$  με τον όρο  $N$ .

Η συστολή λοιπόν είναι ο συνδυαστικός κρίκος μεταξύ της αφαίρεσης και της εφαρμογής και βάση αυτής υλοποιείται ο υπολογισμός, ή πιο σωστά η *αποτίμηση*. Όταν πλέον δεν είναι δυνατόν να εφαρμοστούν β-συστολές (έχουμε φτάσει σε μία *κανονική μορφή*) ο υπολογισμός-αποτίμηση έχει ολοκληρωθεί και έτσι έχουμε πάρει τη ζητούμενη τιμή.

Θα πρέπει να αναφέρουμε ξανά για να γίνει σαφές ότι η αποτίμηση γίνεται σε καθαρά συμβολικό επίπεδο (κάνουμε απλή *συντακτική αντικατάσταση*) και δεν έχουμε δικαίωμα να απλοποιούμε τους όρους καθ' οιονδήποτε τρόπο. Για παράδειγμα ο όρος  $\lambda x.(x+x)$  δεν θα είναι δυνατό να «απλοποιηθεί» στον όρο  $\lambda x.2x$ . Ο λόγος είναι ότι ο αλγόριθμος υπολογισμού των δύο εκφράσεων ( $x+x$  και  $2x$ ) διαφέρει, συνεπώς οι δύο όροι δεν θα πρέπει να ταυτίζονται.

## 3.2 Συντακτικό λ-λογισμού

Ας περάσουμε στον ορισμό του συστήματος του *Καθαρού λ-λογισμού* (η λ-λογισμού χωρίς τύπους<sup>3</sup>). Θα χρησιμοποιήσουμε ένα αριθμήσιμο πλήθος μεταβλητών:  $x_0, x_1, \dots$

<sup>1</sup> Ακόμα και του ίδιου λ-όρου, π.χ.  $(ff)$ .

<sup>2</sup> Παραλείπουμε τις εξωτερικές παρενθέσεις της εφαρμογής χάριν απλότητας.

<sup>3</sup> Στον λ-λογισμό με τύπους οι μεταβλητές (και κατ' επέκταση οι όροι) ανήκουν σε κάποιον τύπο ούτως ώστε να «απαγορεύονται» εφαρμογές όπου οι τύποι δεν «ταιριάζουν». Αυτό μας γλιτώνει από πολλές «δυσάρεστες καταστάσεις» που μπορεί να προκύψουν με την αυτοεφαρμογή ενός όρου. Θα πρέπει να διευκρινίσουμε όμως εδώ ότι η αυτοεφαρμογή δίνει στον λ-λογισμό (ως υπολογιστικό μοντέλο) την ισχύ που έχουν π.χ. οι TM ή οι αναδρομικές συναρτήσεις.

**Ορισμός 3.2.1.** Το σύνολο των λ-ορών ορίζεται αναδρομικά ως εξής:

1. Οι μεταβλητές είναι λ-όροι.
2. Αν οι  $M, N$  είναι λ-όροι τότε και το  $(MN)$  είναι λ-όρος που αποκαλείται *όρος της εφαρμογής (του  $M$  στον  $N$ )*.
3. Αν ο  $M$  είναι λ-όρος και η  $x$  μεταβλητή τότε και το  $(\lambda x.M)$  είναι όρος που αποκαλείται *όρος της λ-αφαίρεσης*.

**Παράδειγμα 3.2.2.** Αν τα  $x, y$  είναι μεταβλητές τότε οι ακόλουθες εκφράσεις είναι λ-όροι:

- $(\lambda x.x)$  (ταυτοτική συνάρτηση)
- $(\lambda y.x)$  (σταθερή συνάρτηση)
- $(\lambda x.(xx))$  (συνδυαστής  $\omega$ )
- $((\lambda x.(xx))(\lambda x.(xx)))$  (συνδυαστής  $\Omega$ )

Παρατηρήστε ότι στον τελευταίο όρο έχουμε αυτοεφαρμογή.

Θα χρησιμοποιούμε τα μικρά γράμματα  $x, y, z$  κ.λπ. για τις μεταβλητές και τα κεφαλαία  $F, M, N$  κ.λπ. για τους όρους. Όπως είναι κατανοητό για να απλοποιήσουμε λίγο τους όρους θα χρειαστεί να καταργήσουμε κάποιες παρενθέσεις.

**Συμβολισμός 3.2.3.** Αν έχουμε όρο της μορφής  $(\dots((FM_1)M_2)\dots M_n)$  θα τον συμπτύξουμε στην έκφραση  $FM_1M_2\dots M_n$ . Αν έχουμε όρο της μορφής  $(\lambda x_1.(\lambda x_2.(\dots(\lambda x_n.M)\dots)))$  θα τον συμπτύξουμε στην έκφραση  $\lambda x_1x_2\dots x_n.M$ . Τέλος η εφαρμογή θα έχει προτεραιότητα έναντι της λ-αφαίρεσης, έτσι θα μπορούμε να γράφουμε τον όρο  $\lambda x.(MN)$  ως  $\lambda x.MN$ .

**Παράδειγμα 3.2.4.** Οι όροι του Παραδείγματος 3.2.2 μπορούν να απλοποιηθούν ως ακολούθως:  $\lambda x.x, \lambda y.x, \lambda x.xx, (\lambda x.xx)\lambda x.xx$ .

Αναφέρθηκε πριν επιγραμματικά ότι κατά τη διαδικασία της συστολής γίνεται συντακτική αντικατάσταση των ελεύθερων μεταβλητών με κάποιους όρους. Το σύνολο των ελεύθερων μεταβλητών καθορίζεται στον ακόλουθο ορισμό.

**Ορισμός 3.2.5.** Για έναν όρο  $M$  ορίζουμε το σύνολο των *ελεύθερων μεταβλητών* του, συμβολισμός  $FV(M)$ , και το σύνολο των *δεσμευμένων μεταβλητών* του, συμβολισμός  $BV(M)$ , αναδρομικά ως εξής:

1. Αν  $M = x$ <sup>1</sup>, όπου  $x$  μεταβλητή, τότε  $FV(M) = \{x\}$  και  $BV(M) = \emptyset$ .
2. Αν  $M = (PQ)$ , όπου  $P, Q$  όροι, τότε  $FV(M) = FV(P) \cup FV(Q)$  και  $BV(M) = BV(P) \cup BV(Q)$ .
3. Αν  $M = (\lambda x.N)$ , όπου  $x$  μεταβλητή και  $N$  όρος, τότε  $FV(M) = FV(N) \setminus \{x\}$  και  $BV(M) = BV(N) \cup \{x\}$ .

<sup>1</sup> Να τονίσουμε ότι το σύμβολο  $=$  υποδουλώνει συντακτική ισότητα.

**Παράδειγμα 3.2.6.** Για τον όρο  $M = (\lambda x.xy)xy$  έχουμε  $FV(M) = \{x, y\}$  και  $BV(M) = \{x\}$ .

Το φαινόμενο που παρατηρήσαμε στο προηγούμενο παράδειγμα, τα σύνολα δηλαδή των ελεύθερων και δεσμευμένων μεταβλητών να έχουν μη κενή τομή, καλό θα ήταν να αποφευχθεί για λόγους σαφήνειας. Γι' αυτό θα θεωρούμε πάντα ότι τα ονόματα των δεσμευμένων μεταβλητών διαφέρουν από τα ονόματα των ελεύθερων. Αυτό μπορεί να φαίνεται κάπως αυθαίρετο, όμως όπως θα δούμε ευδύς αμέσως σημασία δεν έχει το όνομα μίας δεσμευμένης μεταβλητής αλλά η θέση της μέσα στον όρο. Για παράδειγμα οι όροι  $\lambda x.xy$  και  $\lambda z.zy$  πρέπει να θεωρούνται ισοδύναμοι καθώς η εφαρμογή τους στον ίδιο όρο θα μας οδηγήσει μέσω της  $\beta$ -συστολής ακριβώς στον ίδιο όρο (υποδηλώνουν ακριβώς τον ίδιο αλγόριθμο). Θα μπορούσαμε να αντιμετωπίσουμε αυτό το «πρόβλημα» και τυπικότερα <sup>1</sup> αλλά αυτό ξεφεύγει των σκοπών μας.

**Ορισμός 3.2.7.** Ένας όρος  $M$  με  $FV(M) = \emptyset$  καλείται *κλειστός όρος* ή *συνδυαστής*.

Στο Παράδειγμα 3.2.2 είδαμε τους συνδυαστές  $\omega$  και  $\Omega$ . Αργότερα θα συναντήσουμε και άλλους γνωστούς συνδυαστές.

**Ορισμός 3.2.8.** Για κάθε όρους  $M, N$  και μεταβλητή  $x$  με  $M[x/N]$  συμβολίζουμε τον όρο που προκύπτει με *αντικατάσταση* της  $x$  (στις ελεύθερες εμφανίσεις της) από τον  $N$ . Τυπικά ο όρος  $M[x/N]$  ορίζεται αναδρομικά ως εξής:

1. Αν  $M = x$  τότε  $M[x/N] = N$ .
2. Αν  $M = y$ , όπου  $y$  μεταβλητή διαφορετική της  $x$ , τότε  $M[x/N] = y$ .
3. Αν  $M = (PQ)$ , όπου  $P, Q$  όροι, τότε  $M[x/N] = (P[x/N]Q[x/N])$ .
4. Αν  $M = (\lambda x.P)$ , όπου  $P$  όρος, τότε  $M[x/N] = (\lambda x.P)$ .
5. Αν  $M = (\lambda y.P)$ , όπου  $y$  μεταβλητή διαφορετική της  $x$  και  $P$  όρος, τότε  $M[x/N] = (\lambda y.P[x/N])$ .

Για οικονομία χώρου, καθώς η αντικατάσταση είναι μία στοιχειώδης διαδικασία, θα μελετήσουμε ένα μόνο παράδειγμα. Η επιλογή όμως του παραδείγματος δεν είναι τυχαία γιατί όπως θα δούμε σε αυτήν την περίπτωση η αντικατάσταση είναι «προβληματική».

**Παράδειγμα 3.2.9.** Παρατηρήστε ότι αν  $x, y, z$  μεταβλητές τότε  $(\lambda x.y)[y/z] = \lambda x.z$  (η σταθερή συνάρτηση) ενώ  $(\lambda z.y)[y/z] = \lambda z.z$  (η ταυτοτική συνάρτηση). Συνεπώς κάνοντας την ίδια αντικατάσταση σε δύο όρους όπου σύμφωνα με όσα αναφέραμε πριν θα πρέπει να θεωρούνται ταυτόσημοι προκύπτουν δύο διαφορετικοί όροι. Ο τρόπος να το αποφύγουμε αυτό είναι ξανά η μετονομασία των δεσμευμένων μεταβλητών <sup>2</sup>: Προτού εφαρμόσουμε την αντικατάσταση θα αλλάξουμε στον δεύτερο όρο το όνομα της δεσμευμένης μεταβλητής  $z$  π.χ. σε  $x$ . Έτσι η αντικατάσταση θα μας οδηγήσει στον ίδιο όρο <sup>3</sup>.

<sup>1</sup> Ο φιλομαθής αναγνώστης μπορεί να ψάξει τους όρους  $\alpha$ -conversion ή  $\alpha$ -equivalence στη βιβλιογραφία.

<sup>2</sup> Ούτε εδώ θα προβούμε σε τυπικότερη ανάλυση. Δείτε σχετική προηγούμενη υποσημείωση.

<sup>3</sup> Δεν είναι απαραίτητο να μετονομάσουμε τη  $z$  σε  $x$ . Θα μπορούσαμε να χρησιμοποιήσουμε οποιαδήποτε άλλη μεταβλητή που δεν εμφανίζεται ελεύθερη στον όρο  $z$ .

Ο λόγος που στο προηγούμενο παράδειγμα χρειάστηκε να προσθέσουμε παρενθέςεις στον όρο  $\lambda x.y$  είναι ότι η αντικατάσταση έχει προτεραιότητα έναντι της αφαίρεσης και της εφαρμογής. Για παράδειγμα ο όρος  $\lambda x.x[x/y]$  είναι ο όρος  $\lambda x.y$  και όχι ο όρος  $\lambda x.x$ .

Ας έλθουμε τώρα στην ουσία του συμβολισμού και πώς αυτός φέρει εις πέρας τον υπολογισμό της συνάρτησης. Μπορούμε να φανταστούμε έναν όρο της μορφής  $(\lambda x.M)N$  ως εφαρμογή της συνάρτησης που αναπαριστά ο όρος  $\lambda x.M$  (όπου μεταβλητή είναι η  $x$ ) πάνω στον όρο  $N$ . Η εφαρμογή αυτή στον λ-λογισμό υλοποιείται μέσω της αντικατάστασης  $M[x/N]$ .

**Ορισμός 3.2.10.** Κάθε όρος της μορφής  $(\lambda x.M)N$  καλείται  $\beta$ -redex, ενώ ο όρος  $M[x/N]$  καλείται *contractum*<sup>1</sup>. Ορίζουμε τη σχέση της  $\beta$ -συστολής μεταξύ δύο όρων  $M, N$ , συμβολισμός  $M \rightarrow_\beta N$ , αναδρομικά ως εξής:

1. Αν  $M = x$ , όπου  $x$  μεταβλητή, τότε δεν υπάρχει όρος  $N$  τέτοιος ώστε  $M \rightarrow_\beta N$ .
2. Αν  $M = (PQ)$ , όπου  $P, Q$  όροι, τότε  $M \rightarrow_\beta N$  ανν
  - $N = (P'Q)$  και  $P \rightarrow_\beta P'$  ή
  - $N = (PQ')$  και  $Q \rightarrow_\beta Q'$  ή
  - $P = (\lambda x.R)$ , όπου  $x$  μεταβλητή και  $R$  όρος, και  $N = R[x/Q]$ .
3. Αν  $M = (\lambda x.P)$ , όπου  $x$  μεταβλητή και  $P$  όρος, τότε  $M \rightarrow_\beta N$  ανν  $N = (\lambda x.P')$  και  $P \rightarrow_\beta P'$ .

Τέλος, η μεταβατική και ανακλαστική κλειστότητα της σχέσης  $\rightarrow_\beta$  καλείται  $\beta$ -αναγωγή και συμβολίζεται με  $\rightarrow_\beta^*$ .

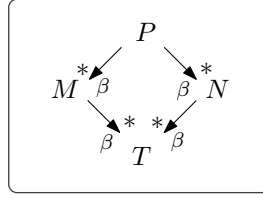
Αν θέλαμε να απλοποιήσουμε λίγο τον παραπάνω ορισμό θα λέγαμε επιγραμματικά ότι  $M \rightarrow_\beta N$  ανν μέσα στον  $M$  υπάρχει κάποιο  $\beta$ -redex που το αντικαθιστούμε με το *contractum* του και καταλήγουμε στον όρο  $N$ . Επίσης  $M \rightarrow_\beta^* N$  ανν υπάρχει μία ακολουθία όρων  $P_1, P_2, \dots, P_n$  τέτοια ώστε  $M = P_1 \rightarrow_\beta P_2 \rightarrow_\beta \dots \rightarrow_\beta P_n = N$  ή απλά αν  $N = M$ .

**Παράδειγμα 3.2.11.** Έστω  $M$  όρος. Τότε:

- $(\lambda x.x)M \rightarrow_\beta x[x/M] = M$
- $(\lambda x.y)M \rightarrow_\beta y[x/M] = y$
- $(\lambda x.xx)\lambda x.xx \rightarrow_\beta (xx)[x/\lambda x.xx] = (\lambda x.xx)\lambda x.xx$

Παρατηρήστε ότι ο συνδυαστής  $\Omega$  μέσω της  $\beta$ -συστολής μας δίνει τον ίδιο του τον εαυτό. Αυτό αποτελεί μία ένδειξη ότι μπορούν να υπάρξουν άπειρες  $\beta$ -αναγωγές. Ας δούμε ένα ακόμα ενδεικτικό παράδειγμα:

<sup>1</sup> Θα μπορούσαμε να χρησιμοποιήσουμε τους ελληνικούς όρους  $\beta$ -μειωτέο και μειωμένο, συνεσταλμένο ή κάτι αντίστοιχο, όμως ακόμα και στην ελληνική βιβλιογραφία έχουν επικρατήσει οι αγγλικοί-λατινικοί όροι ελλείψει ικανοποιητικής μετάφρασης.



**Σχήμα 3.2.1:** Σχηματική αναπαράσταση του Θεωρήματος Church-Rosser.

$$- (\lambda x. xxy) \lambda x. xxy \rightarrow_{\beta} (\lambda x. xxy)(\lambda x. xxy)y \rightarrow_{\beta} (\lambda x. xxy)(\lambda x. xxy)yy \rightarrow_{\beta} \dots$$

Ο υπολογισμός διεξάγεται μέσα από την υλοποίηση της εφαρμογής μιας συνάρτησης πάνω σε μία άλλη. Αυτή η εφαρμογή στη γλώσσα του  $\lambda$ -λογισμού αναπαριστάται μέσω ενός  $\beta$ -redex και υλοποιείται μέσω της  $\beta$ -συστολής. Το αποτέλεσμα της  $\beta$ -συστολής (γνωστό ως contractum) «αξιοποιείται» κατά αντίστοιχο τρόπο και συνεχίζεται ο υπολογισμός. Στις δύο πρώτες περιπτώσεις στο παραπάνω παράδειγμα, αν υποθέσουμε ότι ο όρος  $M$  δεν περιέχει μέσα του κάποιο  $\beta$ -redex, οδηγούμαστε σε έναν όρο στον οποίο δεν μπορούμε πλέον να κάνουμε  $\beta$ -συστολή. Σε αυτήν την περίπτωση θεωρούμε ότι ο υπολογισμός ολοκληρώθηκε και το αποτέλεσμα του ήταν η συνάρτηση που αναπαριστά ο τελικός όρος. Στις υπόλοιπες δύο περιπτώσεις οι όροι που δίνει η  $\beta$ -συστολή συνεχώς περιέχουν κάποιο  $\beta$ -redex και έτσι η  $\beta$ -αναγωγή θα είναι άπειρη. Σε αυτές τις περιπτώσεις ο υπολογισμός δεν τερματίζει <sup>1</sup>.

**Ορισμός 3.2.12.** Ένας όρος  $M$  βρίσκεται σε  $\beta$ -κανονική μορφή αν δεν υπάρχει όρος  $N$  τέτοιος ώστε  $M \rightarrow_{\beta} N$ . Ισοδύναμα, ο  $M$  είναι σε  $\beta$ -κανονική μορφή αν δεν περιέχει μέσα του (ως υποόρο) κάποιο  $\beta$ -redex.

Συνεπώς ο υπολογισμός τερματίζει αν η  $\beta$ -αναγωγή οδηγήσει σε κάποιον όρο που βρίσκεται σε  $\beta$ -κανονική μορφή.

Όταν ο όρος περιέχει παραπάνω από ένα  $\beta$ -redex μπορούμε να κάνουμε  $\beta$ -συστολή σε οποιοδήποτε από αυτά. Θα ήταν μεγάλη αποτυχία του υπολογιστικού μας μοντέλου αν αυτή η αυθαίρετη επιλογή οδηγούσε σε διαφορετικές κανονικές μορφές.

**Παράδειγμα 3.2.13.** Στις ακόλουθες  $\beta$ -αναγωγές έχουμε υπογραμμίσει το  $\beta$ -redex που συστέλλουμε:

$$\begin{aligned} - & \underline{(\lambda x. (\lambda y. yx)z)x} \rightarrow_{\beta} (\lambda y. yx)z \rightarrow_{\beta} zx \\ - & (\lambda x. (\lambda y. yx)z)x \rightarrow_{\beta} \underline{(\lambda x. zx)x} \rightarrow_{\beta} zx \end{aligned}$$

Η μοναδικότητα της κανονικής μορφής (εφόσον αυτή υπάρχει) προκύπτει από το ακόλουθο Θεώρημα που παραθέτουμε χωρίς απόδειξη.

**Θεώρημα 3.2.14** (Θεώρημα Church-Rosser). Έστω όροι  $P, M, N$  τέτοιοι ώστε  $P \rightarrow_{\beta}^* M$  και  $P \rightarrow_{\beta}^* N$ . Τότε υπάρχει όρος  $T$  τέτοιος ώστε  $M \rightarrow_{\beta}^* T$  και  $N \rightarrow_{\beta}^* T$  (δες Σχήμα 3.2.1).

<sup>1</sup> Θυμηθείτε ότι ο μη-τερματισμός είναι απαραίτητος για ένα υπολογιστικό μοντέλο αν θέλουμε να έχει την ίδια «ισχύ» με τα υπόλοιπα μοντέλα που μελετήσαμε. Αυτό οφείλεται στις υπολογίσιμες μερικές συναρτήσεις.

Άμεσο είναι το παρακάτω πόρισμα.

**Πόρισμα 3.2.15.** Έστω όροι  $P, M, N$  τέτοιοι ώστε  $P \rightarrow_\beta^* M$  και  $P \rightarrow_\beta^* N$  και οι όροι  $M, N$  βρίσκονται σε κανονική μορφή. Τότε  $M = N$ <sup>1</sup>.

**Ορισμός 3.2.16.** Αν για τους όρους  $M, N$  ισχύει ότι  $M \rightarrow_\beta^* N$  και ο  $N$  βρίσκεται σε κανονική μορφή τότε θα λέμε ότι ο  $N$  είναι η κανονική μορφή του  $M$ .

### 3.3 Ισοδυναμία λ-λογισμού με Αναδρομικές Συναρτήσεις

Θα ξεκινήσουμε βλέποντας πως μπορούμε να αναπαραστήσουμε με λ-όρους συναρτήσεις πολλών μεταβλητών. Θα εξετάσουμε μόνο την περίπτωση όπου έχουμε δύο μεταβλητές<sup>2</sup>. Θεωρήστε μία συνάρτηση  $f : \mathbb{N} \times \mathbb{N} \rightarrow \mathbb{N}$ . Για κάθε φιξαρισμένο  $x$  ορίζουμε τη συνάρτηση  $f_x : \mathbb{N} \rightarrow \mathbb{N}$ , με  $f_x(y) = f(x, y)$ . Για να αναπαραστήσουμε την  $f$  αρκεί να αναπαραστήσουμε τη συνάρτηση που «στέλνει» τα  $x$  στις συναρτήσεις  $f_x$ <sup>3</sup>. Χρησιμοποιώντας τον συμβολισμό της λ-αφαίρεσης θα μπορούσαμε να αναπαραστήσουμε την  $f_x$  ως  $F_x = \lambda y. f(x, y)$  και έπειτα την  $f$  ως  $F = \lambda x. F_x = \lambda x. (\lambda y. f(x, y))$ . Έτσι αν  $M, N$  όροι θα έχουμε  $FMN = (\lambda x. (\lambda y. f(x, y)))MN \rightarrow_\beta (\lambda y. f(M, y))N \rightarrow_\beta f(M, N)$ . Γενικότερα, θα αναπαριστούμε μία συνάρτηση με  $n \geq 2$  μεταβλητές αναδρομικά φιζάροντας κάθε φορά και από μία μεταβλητή.

**Παράδειγμα 3.3.1.** Ας δούμε πως μπορούμε να αναπαραστήσουμε τις συναρτήσεις  $f : \mathbb{N} \times \mathbb{N} \rightarrow \mathbb{N}$ , με  $f(x, y) = x$  και  $g : \mathbb{N} \times \mathbb{N} \rightarrow \mathbb{N}$ , με  $g(x, y) = y$ . Πρώτα αναπαριστούμε τη συνάρτηση  $f_x(y) = x$  με τον όρο  $F_x = \lambda y. x$  και έπειτα την  $f$  με τον όρο  $F = \lambda x. F_x = \lambda x. (\lambda y. x)$ . Αντίστοιχα θα αναπαραστήσουμε την  $g$  με τον όρο  $G = \lambda x. (\lambda y. y)$ .

**Ορισμός 3.3.2.** Για κάθε  $n \in \mathbb{N}$  ορίζουμε τους συνδυαστές  $c_n$  ως εξής:

$$\begin{aligned} c_0 &= \lambda f x. x \\ c_1 &= \lambda f x. f x \\ &\vdots \\ c_n &= \lambda f x. f^n(x) \end{aligned}$$

όπου με  $f^n(x)$  συμβολίζουμε τον όρο  $\underbrace{f(f(\dots(fx)\dots))}_{n \text{ φορές}}$ .

Οι συνδυαστές αυτοί αναφέρονται συχνά στη βιβλιογραφία ως *αριθμοί του Church* (*Church Numerals*) και χρησιμοποιούνται για να αναπαραστήσουμε τους φυσικούς αριθμούς. Παρατηρήστε ότι οι αριθμοί του Church βρίσκονται σε  $\beta$ -κανονική μορφή. Ο λόγος που επιλέξαμε να αναπαραστήσουμε τους φυσικούς αριθμούς κατά αυτόν τον τρόπο φαίνεται στο ακόλουθο παράδειγμα.

<sup>1</sup> Τυπικά οι δύο όροι δεν είναι απαραίτητο ότι ταυτίζονται. Υπάρχει το ενδεχόμενο κάποιες δεσμευμένες μεταβλητές να έχουν διαφορετικό όνομα.

<sup>2</sup> Για  $n > 2$  μεταβλητές δουλεύουμε αναλόγως.

<sup>3</sup> Ορίζουμε δηλαδή την  $f$  ως συνάρτηση  $f : \mathbb{N} \rightarrow (\mathbb{N} \rightarrow \mathbb{N})$ , όπου  $\mathbb{N} \rightarrow \mathbb{N}$  το σύνολο των συναρτήσεων από το  $\mathbb{N}$  στο  $\mathbb{N}$ .

**Παράδειγμα 3.3.3.** Έστω  $F$  λ-όρος και  $z$  μεταβλητή τότε:

$$c_n Fz = (\lambda f x. f^n(x)) Fz \rightarrow_\beta (\lambda x. F^n(x)) z \rightarrow_\beta F^n(z)$$

και, καθώς ο συμβολισμός  $F^n(z)$  υποδουλώνει  $n$  εφαρμογές του συνδυαστή  $F$  πάνω στη  $z$ , ο συνδυαστής  $c_n$  στην ουσία εφαρμόζει επαναληπτικά τη συνάρτηση που αναπαριστά ο  $F$  πάνω στο αρχικό όρισμα  $z$ .

**Ορισμός 3.3.4.** Μία συνάρτηση  $f : \mathbb{N}^m \rightarrow \mathbb{N}$  καλείται λ-ορίσιμη αν υπάρχει λ-όρος  $F$  τέτοιος ώστε για κάθε  $n_1, n_2, \dots, n_m \in \mathbb{N}$ :

1. Αν  $f(n_1, n_2, \dots, n_m) \neq \perp$  τότε  $F c_{n_1} c_{n_2} \dots c_{n_m} \rightarrow_\beta^* c_{f(n_1, n_2, \dots, n_m)}$ .
2. Αν  $f(n_1, n_2, \dots, n_m) = \perp$  τότε ο  $F c_{n_1} c_{n_2} \dots c_{n_m}$  δεν ανάγεται σε όρο που είναι σε κανονική μορφή (η β-αναγωγή είναι άπειρη).

Σκοπός αυτής της παραγράφου είναι να δείξουμε ότι οι κλάσεις των αναδρομικών συναρτήσεων και των λ-ορίσιμων συναρτήσεων ταυτίζονται. Όπως φαντάζεσθε θα χρειαστεί να κάνουμε πρώτα κάποια προετοιμασία.

**Παράδειγμα 3.3.5.** Ας εξετάσουμε μερικές αριθμητικές συναρτήσεις που συναντήσαμε στο Κεφάλαιο 2:

- Η  $z^1(n) = 0$  ορίζεται από τον όρο  $Z = \lambda x. c_0$ , καθώς για κάθε  $n \in \mathbb{N}$  ισχύει ότι:

$$Z c_n = (\lambda x. c_0) c_n \rightarrow_\beta c_0$$

- Η  $s(n) = n + 1$  ορίζεται από τον όρο  $S = \lambda x y z. y(x y z)$ , καθώς για κάθε  $n \in \mathbb{N}$  ισχύει ότι:

$$S c_n = (\lambda x y z. y(x y z)) c_n \rightarrow_\beta \lambda y z. y(c_n y z) \rightarrow_\beta^* \lambda y z. y(y^n(z)) = \lambda y z. y^{n+1}(z) = c_{n+1}$$

- Η συνάρτηση  $\text{plus}(m, n) = m + n$  ορίζεται από τον όρο  $F_+ = \lambda x y p q. x p(y p q)$ , καθώς για κάθε  $m, n \in \mathbb{N}$  ισχύει ότι:

$$\begin{aligned} F_+ c_m c_n &= (\lambda x y p q. x p(y p q)) c_m c_n \\ &\rightarrow_\beta (\lambda y p q. c_m p(y p q)) c_n \\ &\rightarrow_\beta \lambda p q. c_m p(c_n p q) \\ &\rightarrow_\beta^* \lambda p q. p^m(p^n(q)) \\ &= \lambda p q. p^{m+n}(q) \\ &= c_{m+n} \end{aligned}$$

Στη συνέχεια θα χρειαστεί να αναπαραστήσουμε ζεύγη λ-όρων και να ορίσουμε συναρτήσεις που προβάλλουν το ζεύγος στην πρώτη ή στη δεύτερη μεταβλητή.

**Ορισμός 3.3.6.** Έστω  $M, N$  όροι. Ορίζουμε τους ακόλουθους συνδυαστές:

$$\begin{aligned}\langle M, N \rangle &= \lambda z. zMN \text{ (Συνδυαστής ζεύγους)} \\ True &= \lambda xy. x \text{ (Αληθής αληθοτιμή)} \\ False &= \lambda xy. y \text{ (Ψευδής αληθοτιμή)}\end{aligned}$$

Παρατηρήστε ότι:

$$\langle M, N \rangle True = (\lambda z. zMN) \lambda xy. x \rightarrow_\beta (\lambda xy. x)MN \rightarrow_\beta^* M$$

και αντίστοιχα  $\langle M, N \rangle False \rightarrow_\beta^* N$ . Συνεπώς οι όροι  $True, False$  αναπαριστούν τις προβολές στις δύο μεταβλητές του ζεύγους. Επιπλέον τον συνδυαστή του ζεύγους μπορούμε να τον χρησιμοποιήσουμε για να εκφράσουμε (το γνωστό μας από την πληροφορική) if-then-else. Για λόγους παραστατικότητας συχνά θα γράφουμε  $If(X) Then(M) Else(N)$  αντί για τον όρο  $\langle M, N \rangle X$ . Τέλος, ο όρος  $False$  ταυτίζεται με τον όρο που έχουμε αντιστοιχίσει στον αριθμό 0.

**Παράδειγμα 3.3.7.** Θα κατασκευάσουμε έναν συνδυαστή  $IsZero$  τέτοιον ώστε:

$$IsZero c_n = \begin{cases} True & , \text{ αν } n = 0 \\ False & , \text{ αλλιώς} \end{cases}$$

Έστω  $IsZero = \langle True False, True \rangle$ , τότε:

$$IsZero c_0 = \langle True False, True \rangle False \rightarrow_\beta True$$

και για κάθε όρο  $n > 0$ :

$$\begin{aligned}IsZero c_n &= \langle True False, True \rangle c_n = (\lambda z. z(True False)True) c_n \\ &\rightarrow_\beta c_n(True False)True = (\lambda f x. f^n(x))(True False)True \\ &\rightarrow_\beta^* (True False)^n(True) = (True False)^{n-1}((True False)True) \\ &= (True False)^{n-1}((\lambda xy. x)False)True \\ &\rightarrow_\beta^* (True False)^{n-1}(False) = (True False)^{n-2}((True False)False) \\ &\rightarrow_\beta^* (True False)^{n-2}(False) \\ &\rightarrow_\beta \dots \rightarrow_\beta False\end{aligned}$$

**Θεώρημα 3.3.8.** Μία συνάρτηση  $f : \mathbb{N}^m \rightarrow \mathbb{N}$  είναι ελαχιστικά αναδρομική ανν είναι λ-ορίσιμη.

Θα μοιράσουμε την απόδειξη του Θεωρήματος 3.3.8 σε μερικά επιμέρους Λήμματα και Προτάσεις.

**Λήμμα 3.3.9.** Για κάθε  $m > 1$  οι συναρτήσεις:

$$(a) \ s(x) = x + 1$$

$$(b) \ z^m(x_1, \dots, x_m) = 0$$

$$(c) \ p_i^m(x_1, \dots, x_m) = x_i, \text{ όπου } i \in [m]$$

είναι λ-ορίσιμες.

*Απόδειξη.* Παρατηρούμε ότι την  $s$  την ορίζει ο όρος  $S$  του Παραδείγματος 3.3.5, τις σταθερές μηδενικές συναρτήσεις οι όροι  $Z_m = \lambda x_1 \dots x_m. c_0$ , και τις προβολές οι όροι  $P_i^m = \lambda x_1 \dots x_m. x_i$ .  $\square$

**Λήμμα 3.3.10.** Έστω ότι οι συναρτήσεις  $g : \mathbb{N}^n \rightarrow \mathbb{N}$  και  $h_i : \mathbb{N}^m \rightarrow \mathbb{N}, i \in [n]$  είναι λ-ορίσιμες, τότε και η  $f(x_1, \dots, x_m) = g(h_1(x_1, \dots, x_m), \dots, h_n(x_1, \dots, x_m))$  είναι λ-ορίσιμη.

*Απόδειξη.* Αν υποθέσουμε ότι ο όρος  $G$  ορίζει την  $g$  και οι όροι  $H_1, \dots, H_n$  τις  $h_1, \dots, h_n$ , τότε ο όρος:  $F_f = \lambda x_1 \dots x_m. G(H_1 x_1 \dots x_m) \dots (H_n x_1 \dots x_m)$  ορίζει την  $f$ .  $\square$

**Λήμμα 3.3.11.** Έστω λ-ορίσιμες συναρτήσεις  $g : \mathbb{N}^{m-1} \rightarrow \mathbb{N}$  και  $h : \mathbb{N}^{m+1} \rightarrow \mathbb{N}$ . Η συνάρτηση  $f : \mathbb{N}^m \rightarrow \mathbb{N}$  που είναι λύση των εξισώσεων:

$$\begin{cases} f(0, x_1, \dots, x_{m-1}) = g(x_1, \dots, x_{m-1}) \\ f(y+1, x_1, \dots, x_{m-1}) = h(f(y, x_1, \dots, x_{m-1}), y, x_1, \dots, x_{m-1}) \end{cases}$$

είναι λ-ορίσιμη.

*Απόδειξη.* Έστω ότι οι όροι  $G, H$  ορίζουν τις συναρτήσεις  $g, h$  αντίστοιχα. Θεωρούμε τον όρο:

$$Next = \lambda p. \langle S(pTrue), H(pFalse)(pTrue)x_1 \dots x_{m-1} \rangle$$

όπου  $\langle, \rangle, True, False$  οι συνδυαστές του Ορισμού 3.3.6<sup>1</sup> και  $S$  ο συνδυαστής του Παραδείγματος 3.3.5. Παρατηρήστε ότι αν  $y$  μεταβλητή και  $M$  όρος τότε:

$$Next\langle y, M \rangle \rightarrow_\beta^* \langle Sy, HMyx_1 \dots x_{m-1} \rangle$$

Συνεπώς, αν ο  $M$  αντιστοιχεί στην τιμή  $f(y, x_1, \dots, x_{m-1})$  τότε η δεύτερη συντεταγμένη του  $Next\langle y, M \rangle$  αντιστοιχεί στην τιμή  $f(y+1, x_1, \dots, x_{m-1})$ <sup>2</sup>. Ο όρος:

$$F_f = \lambda yx_1 \dots x_{m-1}. yNext\langle c_0, Gx_1 \dots x_{m-1} \rangle False$$

ορίζει την  $f$ , καθώς:

$$\begin{aligned} F_f c_y c_{x_1} \dots c_{x_{m-1}} &\rightarrow_\beta^* c_y Next\langle c_0, Gc_{x_1} \dots c_{x_{m-1}} \rangle False \\ &\rightarrow_\beta Next^y\langle c_0, Gc_{x_1} \dots c_{x_{m-1}} \rangle False \end{aligned}$$

άρα έχουμε  $y$  επαναλήψεις, ξεκινώντας από το ζευγάρι  $\langle 0, g(x_1, \dots, x_{m-1}) \rangle$ , και στο τέλος παίρνουμε τη δεύτερη προβολή, δηλαδή την τιμή  $h(f(y, x_1, \dots, x_{m-1}), y, x_1, \dots, x_{m-1})$ .  $\square$

<sup>1</sup> Θυμηθείτε ότι οι συνδυαστές  $True$  και  $False$  δρουν σαν την πρώτη και τη δεύτερη προβολή πάνω στον  $\langle, \rangle$ .

<sup>2</sup> Η πρώτη χρησιμοποιείται για να «σημειώνουμε» τον αριθμό της επανάληψης.

Από τα παραπάνω Λήμματα προκύπτει άμεσα η ακόλουθη πρόταση.

**Πρόταση 3.3.12.** Κάθε πρωτογενώς αναδρομική συνάρτηση είναι λ-ορίσιμη.

Υπάρχει ένας πιο γενικός τρόπος να ορίσουμε την αναδρομή. Θα χρειαστούμε ένα Θεώρημα Σταθερού Σημείου.

**Θεώρημα 3.3.13** (Θεώρημα Σταθερού Σημείου). Για κάθε λ-όρο  $F$  υπάρχει λ-όρος  $X$  τέτοιος ώστε  $X \rightarrow_{\beta}^* F X$ . Ο όρος  $X$  ονομάζεται σταθερό σημείο του  $F$ .

*Απόδειξη.* Θεωρούμε τον συνδυαστή  $\Theta = (\lambda xy.y(xxy))\lambda xy.y(xxy)$ . Θα δείξουμε ότι:

$$\Theta F \rightarrow_{\beta}^* F(\Theta F)$$

δηλαδή ο  $\Theta F$  είναι σταθερό σημείο του  $F$ . Έστω  $U = \lambda xy.y(xxy)$ . Παρατηρούμε ότι:

$$\Theta F = (\lambda xy.y(xxy))UF \rightarrow_{\beta}^* F(UUF) = F(\Theta F)$$

□

**Παρατήρηση 3.3.14.** Παρατηρήστε ότι αν θέλουμε να ορίσουμε όρο  $F$  τέτοιον ώστε για κάθε όρο  $X$  να ισχύει ότι:

$$FX \rightarrow_{\beta}^* M(X, F)$$

όπου  $M(X, F)$  ένας όρος στον οποίο εμφανίζεται ο όρος  $F$  (ο  $F$  δηλαδή ορίζεται μέσω μιας αναδρομικής εξίσωσης και αναπαριστά μια αναδρομική συνάρτηση) τότε αρκεί να ορίσουμε  $F = \Theta J$ , όπου  $J = (\lambda fx.M(x, f))$ , καθώς:

$$FX = \Theta JX \rightarrow_{\beta}^* J(\Theta J)X = JFX = (\lambda fx.M(x, f))FX \rightarrow_{\beta}^* M(X, F)$$

**Λήμμα 3.3.15.** Έστω λ-ορίσιμη συνάρτηση  $g : \mathbb{N}^{m+1} \rightarrow \mathbb{N}$ ,  $m \geq 1$ , τέτοια ώστε για κάθε  $i, x_1, \dots, x_n \in \mathbb{N}$  ισχύει ότι  $g(i, x_1, \dots, x_m) \neq \perp$ , τότε η συνάρτηση  $f(x_1, \dots, x_m) = (\mu i \geq 0)[g(i, x_1, \dots, x_m) = 0]$  είναι λ-ορίσιμη.

*Απόδειξη.* Έστω ότι ο όρος  $G$  ορίζει την  $g$ . Θεωρούμε τον όρο:

$$M(i, f) = \lambda x_1 \dots x_m. If(IsZero (Gix_1 \dots x_m)) Then(i) Else(f(Si)x_1 \dots x_m)$$

όπου  $IsZero$  ο συνδυαστής του Παραδείγματος 3.3.7,  $S$  ο συνδυαστής του Παραδείγματος 3.3.5 και  $If( ) Then( ) Else( )$  ο συνδυαστής που υλοποιεί το if-then-else. Τέλος, θεωρούμε τους συνδυαστές:

$$J = \lambda fi.M(i, f) \text{ και } F = \Theta J$$

και παρατηρούμε ότι για το πρώτο  $i \in \mathbb{N}$  που είναι τέτοιο ώστε  $g(i, n_1, \dots, n_m) = 0$ :

$$\begin{aligned}
 Fc_0c_{n_1}\dots c_{n_m} &= \Theta Jc_0c_{n_1}\dots c_{n_m} \\
 &\rightarrow_{\beta}^* M(c_0, F)c_{n_1}\dots c_{n_m} \\
 &= (\lambda x_1\dots x_m. If(IsZero(Gc_0x_1\dots x_m)) \\
 &\quad \quad \quad Then(c_0) Else(F(Sc_0)x_1\dots x_m))c_{n_1}\dots c_{n_m} \\
 &\rightarrow_{\beta}^* If(IsZero(Gc_0c_{n_1}\dots c_{n_m})) Then(c_0) Else(F(Sc_0)c_{n_1}\dots c_{n_m}) \\
 &\rightarrow_{\beta}^* If(IsZero(Gc_0c_{n_1}\dots c_{n_m})) Then(c_0) Else(Fc_1c_{n_1}\dots c_{n_m}) \\
 &\rightarrow_{\beta}^* {}^1 Fc_1c_{n_1}\dots c_{n_m} \\
 &\quad \vdots \\
 &\rightarrow_{\beta}^* Fc_ic_{n_1}\dots c_{n_m} \\
 &\rightarrow_{\beta}^* If(IsZero c_0) Then(c_i) Else(Fc_{i+1}c_{n_1}\dots c_{n_m}) \\
 &\rightarrow_{\beta}^* c_i
 \end{aligned}$$

Φυσικά αν δεν υπάρχει τέτοιο  $i$  τότε η  $\beta$ -αναγωγή θα είναι άπειρη. Τέλος, ο όρος που ορίζει την  $f$  είναι ο  $F_f = Fc_0$ .  $\square$

Αν συνδυάσουμε το παραπάνω Λήμμα με την Πρόταση 3.3.12 συμπεραίνουμε ότι κάθε ολική ελαχιστικά αναδρομική συνάρτηση είναι λ-ορίσιμη. Τι συμβαίνει όμως με τις μερικές ελαχιστικά αναδρομικές συναρτήσεις; Για να δείξουμε ότι είναι λ-ορίσιμες θα χρησιμοποιήσουμε την Πρόταση 3.3.12, το Λήμμα 3.3.15 και την κανονική μορφή του Kleene που είδαμε στο Πόρισμα 2.5.2.

*Απόδειξη Θεωρήματος 3.3.8.* ( $\Rightarrow$ ) Από το Πόρισμα 2.5.2 προκύπτει ότι υπάρχουν πρωτογενώς αναδρομικές συναρτήσεις  $g : \mathbb{N}^{m+1} \rightarrow \mathbb{N}$  και  $h : \mathbb{N} \rightarrow \mathbb{N}$  τέτοιες ώστε  $f(x_1, \dots, x_m) = h((\mu i \geq 0)[g(i, x_1, \dots, x_m) = 0])$ . Από την Πρόταση 3.3.12 υπάρχουν λ-όροι  $H, G$  που ορίζουν τις  $h, g$  αντίστοιχα. Τέλος, από το Λήμμα 3.3.10 έπεται ότι η  $f$  είναι λ-ορίσιμη <sup>2</sup>.

( $\Leftarrow$ ) Η απόδειξη ότι κάθε λ-ορίσιμη συνάρτηση είναι αναδρομική μοιάζει πολύ με την απόδειξη του αντιστρόφου του Θεωρήματος 2.5.1 (για αυτό θα την παραλείψουμε): Ξεκινάμε αντιστοιχίζοντας σε κάθε λ-όρο έναν φυσικό αριθμό. Έπειτα ορίζουμε μια πρωτογενώς αναδρομική συνάρτηση που με όρισμα τον αριθμό του όρου μας δίνει τον αριθμό του όρου που προκύπτει μετά από μία  $\beta$ -συστολή. Τέλος, ορίζουμε ελαχιστική αναδρομική συνάρτηση που με όρισμα τον αριθμό που αντιστοιχεί σε έναν λ-όρο μας επιστρέφει τον αριθμό της κανονικής μορφής του εφόσον αυτή υπάρχει. Αν δεν υπάρχει κανονική μορφή τότε η συνάρτηση δεν ορίζεται.  $\square$

<sup>1</sup> Αφού  $g(0, x_1, \dots, x_m) \neq 0$  ισχύει ότι  $IsZero Gc_0c_{n_1}\dots c_{n_m} \rightarrow_{\beta}^* False$ .

<sup>2</sup> Παρατηρήστε ότι καθώς η  $g$  είναι πρωτογενώς αναδρομική συνάρτηση θα είναι ολική συνάρτηση. Συνεπώς δεν υπάρχει πρόβλημα στην εφαρμογή του Λήμματος 3.3.15. Αν η  $f$  είναι μερική συνάρτηση αυτό θα οφείλετε στο γεγονός ότι δεν θα υπάρχει  $i \in \mathbb{N}$  τέτοιο ώστε  $g(i, n_1, \dots, n_m) = 0$ .

## Ασκήσεις

**3.1 (★☆☆).** (Λήμμα αντικατάστασης) Έστω μεταβλητές  $x, y, z$  και λ-όροι  $M, N, L$  τέτοιοι ώστε  $BV(M) \cap FV(zNL) = \emptyset$ . Δείξτε ότι:

- $M[y/L][x/N] = M[x/N][y/L[x/N]]$  αν  $y \notin FV(N)$
- $M[y/L][x/N] = M[x/N][y/L]$  αν  $y \notin FV(N)$  και  $x \notin FV(L)$
- $M[x/L][x/N] = M[x/[L[x/N]]]$

**3.2 (★★☆).** Έστω λ-όροι  $M, M', N, N'$  και μεταβλητή  $x$ . Εξετάστε αν ισχύουν τα ακόλουθα:

1. Αν  $N \rightarrow_\beta N'$  τότε  $M[x/N] \rightarrow_\beta M[x/N']$ .
2. Αν  $M \rightarrow_\beta^* M'$  και  $N \rightarrow_\beta^* N'$  τότε  $M[x/N] \rightarrow_\beta^* M'[x/N']$ .

**3.3 (★★☆).** Βρείτε λ-όρους  $M, N$  με την ιδιότητα ότι κανένας τους δεν έχει β-κανονική μορφή αλλά ο λ-όρος  $MN$  έχει.

**3.4 (★☆☆).** Βρείτε λ-όρο που ορίζει τη συνάρτηση  $\text{mult}(m, n) = m \cdot n$ .

**3.5 (★☆☆).** Βρείτε λ-όρο που ορίζει τη συνάρτηση  $\text{exp}(m, n) = m^n$ .

**3.6 (★★☆).** Βρείτε λ-όρο που ορίζει τη συνάρτηση  $\text{fact}(n) = n!$ .

**3.7 (★★★).** Βρείτε λ-όρο που ορίζει τη συνάρτηση  $\text{pd}(n) = \begin{cases} 0 & , \text{ αν } n = 0 \\ n - 1 & , \text{ αλλιώς} \end{cases}$ .

**3.8 (★☆☆).** Βρείτε λ-όρο που ορίζει τη συνάρτηση  $f : \mathbb{N} \rightarrow \mathbb{N}$  με  $f(x) = \begin{cases} 1 & , \text{ αν } x = 0 \\ \perp & , \text{ αλλιώς} \end{cases}$ .

**3.9 (★☆☆).** Έστω  $M_1, \dots, M_n$ ,  $n \geq 2$  λ-όροι. Ορίστε συνδυαστή  $\langle M_1, \dots, M_n \rangle$  που αναπαριστά τη  $n$ -άδα των όρων και συνδυαστή  $X_i^n$  τέτοιο ώστε  $\langle M_1, \dots, M_n \rangle X_i^n \rightarrow_\beta^* M_i$ , για  $1 \leq i \leq n$ .

**3.10 (★★★).** Αποδείξτε το Λήμμα 3.3.11 χρησιμοποιώντας το Θεώρημα 3.3.13.

## ΚΕΦΑΛΑΙΟ 4

### ΓΡΑΜΜΑΤΙΚΕΣ-ΙΕΡΑΡΧΙΑ CHOMSKY

Στα Κεφάλαιο 1 ασχοληθήκαμε αρκετά με τις γλώσσες ενός πεπερασμένου αλφαβήτου. Το ενδιαφέρον μας στράφηκε στο κατά πόσον μπορούμε να αποφανθούμε αν μια λέξη ανήκει σε μία υπό εξέταση γλώσσα. Η ύπαρξη μίας ΤΜ που μπορεί να αναγνωρίσει ή να αποφασίσει μία γλώσσα με λίγη φαντασία μπορεί να ιδωθεί σαν ένας (πεπερασμένος) ορισμός μίας (πιθανώς άπειρης) γλώσσας. Αυτός ο ορισμός μας δίνει περισσότερη πληροφορία από την απλή συνολοθεωρητική περιγραφή της, που στην ουσία απλά μας περιγράφει κάποιες ιδιότητες που έχουν οι λέξεις της: *Μας δίνει μία μέθοδο ελέγχου για το «ανήκειν» στη γλώσσα.*

Σε αυτό το κεφάλαιο θα παρουσιάσουμε έναν φορμαλισμό, που πάλι δεν είναι «μηχανιστικός» όπως οι ΤΜ, αλλά μπορεί επίσης να χαρακτηρίσει μία γλώσσα. Θα ερευνήσουμε αν υπάρχει ένα πεπερασμένο σύνολο κανόνων που (συνδυαζόμενοι μεταξύ τους ένα πεπερασμένο πλήθος φορών) είναι ικανοί να παράγουν οποιαδήποτε λέξη της γλώσσας. Όπως κάνουμε και στις «φυσικές γλώσσες»<sup>1</sup> θα ορίσουμε μία *Γραμματική*, ένα σύνολο κανόνων δηλαδή που διέπει ποιες λέξεις επιτρέπονται και ποιες όχι<sup>2</sup>. Θα δείξουμε ότι οι γλώσσες για τις οποίες υπάρχουν γραμματικές που τις παράγουν (χωρίς περιορισμούς) είναι ακριβώς οι αναδρομικά απαριθμήσιμες γλώσσες. Αργότερα θα θέσουμε περιορισμούς στους κανόνες μίας γραμματικής και έτσι θα ορίσουμε νέες κλάσεις γλωσσών που θα αποτελέσουν τελικά την *Ιεραρχία Chomsky*.

Ως «παράπλευρο αποτέλεσμα» θα δώσουμε μέσα από τον φορμαλισμό των γραμματικών έναν ακόμα ορισμό των υπολογίσιμων συναρτήσεων.

### 4.1 Γενικές γραμματικές

#### Ορισμός 4.1.1. Γενική γραμματική (ή γραμματική χωρίς περιορισμούς ή γραμματική Τύπου

<sup>1</sup> Όπως για παράδειγμα στα ελληνικά.

<sup>2</sup> Για παράδειγμα, σύμφωνα με τη γραμματική της ελληνικής γλώσσας, η λέξη «καλλιτέχνης» είναι αποδεκτή ενώ η λέξη «καλητέχνης» επιεικώς απαράδεκτη.

0 ή απλά γραμματική) είναι μία τετράδα  $G = (V, \Sigma, R, S)$  όπου:

1.  $V$  είναι ένα πεπερασμένο αλφάβητο
2.  $\Sigma \subseteq V$  είναι το σύνολο των *τερματικών συμβόλων*
3.  $V \setminus \Sigma$  είναι το σύνολο των *μη-τερματικών συμβόλων*
4.  $S \in V \setminus \Sigma$  είναι το *αρχικό σύμβολο*
5.  $R \subseteq V^*(V \setminus \Sigma)V^* \times V^{*1}$  είναι το πεπερασμένο σύνολο *κανόνων παραγωγής*

**Συμβολισμός 4.1.2.** Έστω γραμματική  $G = (V, \Sigma, R, S)$ . Αν  $(u, v) \in R$  θα γράφουμε  $u \rightarrow v$  καθώς είναι πιο παραστατικό.

Ένας κανόνας  $u \rightarrow v \in R$  μας επιτρέπει να μετατρέψουμε τη λέξη  $u$  στη λέξη  $v$ . Βασική προϋπόθεση όμως (σύμφωνα με το 5. του Ορισμού 4.1.1) είναι η λέξη  $u$  να περιέχει κάποιο μη-τερματικό σύμβολο. Τους κανόνες παραγωγής, όπως θα δούμε στον ακόλουθο ορισμό, μπορούμε να τους εφαρμόσουμε σε οποιαδήποτε υπολέξη.

**Ορισμός 4.1.3.** Έστω γραμματική  $G = (V, \Sigma, R, S)$  και  $u, v \in V^*$ . Ορίζουμε τις σχέσεις  $\Rightarrow_G, \Rightarrow_G^* \subseteq V^* \times V^*$  ως εξής:

- $u \Rightarrow_G v$  αν υπάρχουν  $w_1, w_2 \in V^*$  και κανόνας  $u' \rightarrow v' \in R$  έτσι ώστε  $u = w_1 u' w_2$  και  $v = w_1 v' w_2$ .
- $\Rightarrow_G^*$  είναι η μεταβατική και ανακλαστική κλειστότητα της  $\Rightarrow_G$ .

Αν  $u \Rightarrow_G^* v$  θα λέμε ότι η  $u$  παράγει τη  $v$  στην  $G$ .

«Αφετηρία» όλων των παραγωγών λέξεων που θα μας απασχολήσουν θα είναι το αρχικό σύμβολο  $S$ . Επιπλέον, από όλες τις δυνατές παραγωγές ενδιαφερόμαστε μόνο για αυτές που «καταλήγουν» σε μία λέξη που απαρτίζεται αποκλειστικά από τερματικά σύμβολα. Παρατηρήστε ότι, εφόσον το αριστερό μέρος των κανόνων απαιτεί να υπάρχει στη λέξη που θα μετασχηματίσουμε μη-τερματικό σύμβολο, όταν φτάσουμε σε λέξη που περιέχει μόνο τερματικά σύμβολα η παραγωγή έχει «τελειώσει» (δεν μπορούμε πλέον να εφαρμόσουμε κάποιον κανόνα δηλαδή). Φυσικά υπάρχει η περίπτωση να μην μπορούμε να εφαρμόσουμε κάποιον κανόνα ενώ η τελευταία λέξη της παραγωγής περιέχει μη-τερματικά σύμβολα (η παραγωγή «κολλάει») ή ακόμα μία παραγωγή να συνεχίζεται επ' άπειρον<sup>2</sup>.

Σύμφωνα με τη συνήδη μας πρακτική, σε κάθε γραμματική θα αντιστοιχίσουμε μία γλώσσα. Η γλώσσα αυτή θα απαρτίζεται από τις λέξεις που παράγει η γραμματική.

<sup>1</sup>  $V^*(V \setminus \Sigma)V^* = \{w \in V^* \mid \exists w_1, w_2 \in V^* \exists a \in V \setminus \Sigma (w = w_1 a w_2)\}$ , δηλαδή το «αριστερό μέρος» ενός κανόνα έχει την μορφή  $w_1 a w_2$ , όπου  $a$  μη-τερματικό σύμβολο.

<sup>2</sup> Όπως συμβαίνει και στις TM, το πρώτο είδος κολλήματος δεν είναι ουσιαστικό καθώς θα μπορούσε να αποφευχθεί αν προσθέταμε κατάλληλους κανόνες στη γραμματική (π.χ. τους κανόνες  $a \rightarrow a$  για κάθε σύμβολο  $a \in V \setminus \Sigma$ ).

**Ορισμός 4.1.4.** Έστω γραμματική  $G = (V, \Sigma, R, S)$ . Η γλώσσα που παράγει η  $G$  είναι η γλώσσα:

$$L(G) = \{w \in \Sigma^* \mid S \Rightarrow_G^* w\}^1$$

Αν  $w \in L(G)$  θα λέμε ότι η  $w$  παράγεται από την  $G$ .

**Ορισμός 4.1.5.** Δύο γραμματικές  $G_1, G_2$  είναι ισοδύναμες αν  $L(G_1) = L(G_2)$ .

Οι παραπάνω ορισμοί θα γίνουν ευκολότερα κατανοητοί μέσω μερικών παραδειγμάτων.

**Παράδειγμα 4.1.6.** Ας θεωρήσουμε τη γραμματική  $G = (V, \Sigma, R, S)$  με  $V = \{0, 1, S\}$ ,  $\Sigma = \{0, 1\}$  και  $R = \{S \rightarrow 0S1, S \rightarrow \epsilon\}$ <sup>2</sup>. Μία παραγωγή από την  $G$  είναι η ακόλουθη:

$$S \Rightarrow_G 0S1 \Rightarrow_G 00S11 \Rightarrow_G 000S111 \Rightarrow_G 000111$$

όπου στις τρεις πρώτες παραγωγές εφαρμόζουμε τον κανόνα  $S \rightarrow 0S1$  και στην τέταρτη τον κανόνα  $S \rightarrow \epsilon$ . Εύκολα συμπεραίνουμε ότι  $L(G) = \{0^n 1^n \in \{0, 1\}^* \mid n \in \mathbb{N}\}$ <sup>3</sup>.

**Παράδειγμα 4.1.7.** Έστω γραμματική  $G = (V, \Sigma, R, S)$  με  $V = \{A, B, C, T_a, T_b, T_c, S\} \cup \Sigma$ ,  $\Sigma = \{a, b, c\}$  και

$$R = \left\{ \begin{array}{l|l} S \rightarrow ABCS, & CT_c \rightarrow T_b c, \\ S \rightarrow T_c, & BT_b \rightarrow T_b b, \\ CA \rightarrow AC, & BT_b \rightarrow T_a b, \\ BA \rightarrow AB, & AT_a \rightarrow T_a a, \\ CB \rightarrow BC, & T_a \rightarrow \epsilon \\ CT_c \rightarrow T_c c, & \end{array} \right.$$

Μία παραγωγή από την  $G$  είναι η ακόλουθη<sup>4</sup>:

$$\begin{aligned} \underline{S} &\Rightarrow_G && \text{(εφαρμόζουμε τον κανόνα } S \rightarrow ABCS) \\ ABC\underline{S} &\Rightarrow_G && \text{(εφαρμόζουμε τον κανόνα } S \rightarrow ABCS) \\ ABCABC\underline{S} &\Rightarrow_G && \text{(εφαρμόζουμε τον κανόνα } S \rightarrow ABCS) \\ ABCABCABC\underline{S} &\Rightarrow_G && \text{(εφαρμόζουμε τον κανόνα } S \rightarrow T_c) \\ ABC\underline{A}BCABCT_c &\Rightarrow_G && \text{(εφαρμόζουμε τον κανόνα } CA \rightarrow AC) \\ AB\underline{A}CBCABCT_c &\Rightarrow_G && \text{(εφαρμόζουμε τον κανόνα } BA \rightarrow AB) \\ AAB\underline{C}BCABCT_c &\Rightarrow_G && \text{(εφαρμόζουμε τον κανόνα } CB \rightarrow BC) \\ AAB\underline{B}CCABCT_c &\Rightarrow_G && \text{(εφαρμόζουμε τον κανόνα } CA \rightarrow AC) \\ AAB\underline{B}CACBCT_c &\Rightarrow_G && \text{(εφαρμόζουμε τον κανόνα } CA \rightarrow AC) \\ AAB\underline{B}ACCBCCT_c &\Rightarrow_G && \text{(εφαρμόζουμε τον κανόνα } BA \rightarrow AB) \\ AAB\underline{A}BCCBCCT_c &\Rightarrow_G && \text{(εφαρμόζουμε τον κανόνα } BA \rightarrow AB) \\ AAAB\underline{B}CCBCCT_c &\Rightarrow_G && \text{(εφαρμόζουμε τον κανόνα } CB \rightarrow BC) \end{aligned}$$

<sup>1</sup> Προσέξτε ότι η  $w$  αποτελείται μόνο από τερματικά σύμβολα του  $V^*$ .

<sup>2</sup> Παρατηρήστε ότι έχουμε μη-ντετερμινισμό στους κανόνες της γραμματικής καθώς το  $S$  μπορεί να μετατραπεί είτε σε  $0S1$  είτε σε  $\epsilon$ .

<sup>3</sup> Μπορείτε για εξάσκηση να αποδείξετε αυτόν τον ισχυρισμό τυπικά (Άσκηση 4.1).

<sup>4</sup> Υπογραμίζουμε την υπολέξη που αλλάζει σε κάθε βήμα.

$$\begin{aligned}
AAABBC\underline{BC}CT_c &\Rightarrow_G \text{ (εφαρμόζουμε τον κανόνα } CB \rightarrow BC) \\
AAABBB\underline{CC}CT_c &\Rightarrow_G \text{ (εφαρμόζουμε τον κανόνα } CT_c \rightarrow T_cc) \\
AAABBB\underline{CC}T_cc &\Rightarrow_G \text{ (εφαρμόζουμε τον κανόνα } CT_c \rightarrow T_cc) \\
AAABBB\underline{CT_c}cc &\Rightarrow_G \text{ (εφαρμόζουμε τον κανόνα } CT_c \rightarrow T_bc) \\
AAABBBT_bccc &\Rightarrow_G \text{ (εφαρμόζουμε τον κανόνα } BT_b \rightarrow T_bb) \\
AAABBT_b\underline{b}ccc &\Rightarrow_G \text{ (εφαρμόζουμε τον κανόνα } BT_b \rightarrow T_bb) \\
AAABT_a\underline{b}bbccc &\Rightarrow_G \text{ (εφαρμόζουμε τον κανόνα } BT_b \rightarrow T_ab) \\
AAAT_a\underline{a}bbbbccc &\Rightarrow_G \text{ (εφαρμόζουμε τον κανόνα } AT_a \rightarrow T_aa) \\
AAAT_a\underline{a}bbbbccc &\Rightarrow_G \text{ (εφαρμόζουμε τον κανόνα } AT_a \rightarrow T_aa) \\
AT_a\underline{a}abbbccc &\Rightarrow_G \text{ (εφαρμόζουμε τον κανόνα } AT_a \rightarrow T_aa) \\
T_a\underline{a}aabbbccc &\Rightarrow_G \text{ (εφαρμόζουμε τον κανόνα } T_a \rightarrow \epsilon) \\
aaabbbccc &
\end{aligned}$$

Παρατηρήστε ότι αν εφαρμόσουμε τους κανόνες που περιέχουν τα σύμβολα  $T_a, T_b$  πριν από τους κανόνες «αντιστροφής», θα καταλήξουμε σε μία λέξη στην οποία, να μεν δεν μπορεί να εφαρμοστεί κάποιος κανόνας, αλλά θα περιέχει μη-τερματικά σύμβολα. Επίσης το ίδιο θα συμβεί αν επιλέξουμε λανθασμένα μεταξύ των κανόνων  $CT_c \rightarrow T_cc$  και  $CT_c \rightarrow T_bc$  ή  $BT_b \rightarrow T_bb$  και  $BT_b \rightarrow T_ab$ . Τέλος, θα πρέπει να προσέξουμε να μην εφαρμόσουμε τον κανόνα  $T_a \rightarrow \epsilon$  πολύ νωρίς. Εύκολα συμπεραίνουμε ότι η γλώσσα που παράγει η γραμματική είναι η  $L(G) = \{a^n b^n c^n \in \{a, b, c\}^* \mid n \geq 1\}$ .

Για να αποδείξουμε Θεωρήματα Ισοδυναμίας (και λοιπά άλλα σημαντικά αποτελέσματα) θα χρειαστεί να «συμφωνήσουμε» σε μία κωδικοποίηση γραμματικών.

### Κωδικοποίηση γραμματικών στο $\{0, 1\}$

**Σύμβαση 4.1.8.** Όπως κάναμε και στο παρελθόν, θα θεωρήσουμε ότι όλες οι γλώσσες ανήκουν στο  $2^{\{0,1\}^*}$ . Συνεπώς από τούδε και στο εξής τα τερματικά σύμβολα των γραμματικών θα είναι πάντα τα 0, 1.

Έστω γραμματική  $G = (V, \{0, 1\}, R, S)$  με  $V = \{v_1, v_2, \dots, v_n\}$ , για κάποιο  $n \in \mathbb{N}$ , όπου (χωρίς βλάβη της γενικότητας)  $v_1 = S, v_2 = 0, v_3 = 1$ . Έστω επίσης ότι  $R = \{x_1 \rightarrow y_1, x_2 \rightarrow y_2, \dots, x_l \rightarrow y_l\}$ , για κάποιο  $l \in \mathbb{N}$ . Μία γραμματική χαρακτηρίζεται πλήρως από το σύνολο των κανόνων της (με την προϋπόθεση φυσικά ότι δεν υπάρχουν μη χρησιμοποιούμενα σύμβολα στους κανόνες<sup>1</sup>). Συνεπώς προκειμένου να κωδικοποιήσουμε την  $G$  αρκεί να κωδικοποιήσουμε το  $R$ . Πρώτα το κωδικοποιούμε σε μία λέξη του  $V \cup \{\rightarrow, ;\}$  ως εξής<sup>2</sup>:

$$\langle R \rangle_{V \cup \{\rightarrow, ;\}} = x_1 \rightarrow y_1; x_2 \rightarrow y_2; \dots; x_l \rightarrow y_l$$

<sup>1</sup> Για τους σκοπούς η ύπαρξη μη χρησιμοποιούμενων συμβόλων δεν δημιουργεί πρόβλημα!

<sup>2</sup> Τυπικά θα πρέπει να σταθεροποιήσουμε τη σειρά που κωδικοποιούνται οι κανόνες, αλλιώς θα προκύψουν πολλαπλές κωδικοποιήσεις της ίδιας γραμματικής (σε γενικές γραμμές ούτε αυτό το γεγονός δημιουργεί πρόβλημα). Ας υποθέσουμε ότι οι κανόνες τοποθετούνται στην κωδικοποίηση σύμφωνα με τη λεξικογραφική διάταξη του  $V \cup \{\rightarrow\}$ .

Έπειτα κωδικοποιούμε τα σύμβολα του  $V \cup \{\rightarrow, ;, \}$  στο  $\{0, 1\}$ :

$$\begin{aligned}\langle \rightarrow \rangle_{\{0,1\}} &= 01 \\ \langle ; \rangle_{\{0,1\}} &= 011 \\ \langle v_i \rangle_{\{0,1\}} &= \underbrace{01 \dots 1}_{i+2 \text{ φορές}}, \text{ για κάθε } i \in [n]\end{aligned}$$

Επομένως μπορούμε να κωδικοποιήσουμε την  $G$  στη λέξη  $\langle \langle R \rangle_{V \cup \{\rightarrow, ;, \}} \rangle_{\{0,1\}}$ <sup>1</sup>. Από εδώ και στο εξής θα γράφουμε  $\langle G \rangle$  αντί για  $\langle G \rangle_{\{0,1\}}$ .

Οι γενικές γραμματικές αποτελούν το τέταρτο (και τελευταίο) «υπολογιστικό μοντέλο» που θα δούμε σε αυτές τις σημειώσεις<sup>2</sup>. Και αυτό είναι ισοδύναμο με τις TM. Η απόδειξη οφείλεται στον *Noam Chomsky*.

**Θεώρημα 4.1.9** (Chomsky). Μία γλώσσα  $L \subseteq \{0, 1\}^*$  είναι αναδρομικά απαριθμήσιμη ανν υπάρχει γενική γραμματική  $G$  που την παράγει.

*Απόδειξη.* ( $\Rightarrow$ ) Έστω γλώσσα  $L \in \text{RE}$  και TM  $M = (Q, \{0, 1\}, \Gamma, \delta, q_0, q_{\text{ναι}}, q_{\text{όχι}})$  που την ημι-αποφασίζει. Υποθέτουμε χωρίς βλάβη της γενικότητας<sup>3</sup> ότι:

1. Η  $M$  είναι ντετερμινιστική και μονοτανιακή.
2. Η  $M$  είτε τερματίζει στην  $q_{\text{ναι}}$  είτε κολλάει<sup>4</sup>.
3. Η  $M$  πριν τερματίσει σβήνει την ταινία της, δηλαδή το καταληκτικό στιγμιότυπο είναι πάντα το  $\triangleright q_{\text{ναι}}$ .
4. Η κατάσταση «σθησίματος» είναι η  $q_{\sigma} \in Q$  και η  $M$  σβήνει την ταινία από το τέλος (πρώτο σύμβολο  $\sqcup$ ) προς την αρχή ( $\triangleright$ ).

Θεωρούμε τη γραμματική  $G_M = (V, \{0, 1\}, R, S)$  όπου  $V = \Gamma \cup Q \cup \{S\}$ <sup>5</sup> και:

<sup>1</sup> Παρατηρήστε ότι πολλές γραμματικές κωδικοποιούνται με την ίδια λέξη! Εδώ δεν μας είναι απαραίτητο η κωδικοποίηση να είναι μονοσήμαντη (όπως συνέβαινε με τις TM). Το μόνο που χρειαζόμαστε είναι ένας τρόπος να εκφράσουμε τις γραμματικές ως λέξεις του  $\{0, 1\}^*$ .

<sup>2</sup> Δεν μετράμε φυσικά τις επεκτάσεις των TM που είδαμε στο Κεφάλαιο 1 και θα δούμε και στο Κεφάλαιο 8, καθώς και τους περιορισμούς των TM που θα δούμε σε αυτό το κεφάλαιο.

<sup>3</sup> Υπό την έννοια ότι αν υπάρχει TM που ημι-αποφασίζει την  $L$  τότε υπάρχει και TM που την ημι-αποφασίζει με τις επιπλέον ιδιότητες που ζητάμε.

<sup>4</sup> Αυτό μπορούμε να το επιτύχουμε αν αφαιρέσουμε από την συνάρτηση μεταβάσεων όλες τις μεταβάσεις στην κατάσταση  $q_{\text{όχι}}$ .

<sup>5</sup> Θεωρούμε τις καταστάσεις σύμβολα. Για να είμαστε τυπικοί θα πρέπει επιπλέον να υποθέσουμε ότι τα σύμβολα του  $Q$  δεν εμφανίζονται στο  $\Gamma$ .

$$\begin{aligned}
R = & \{S \rightarrow \triangleright q_{\text{vαι}} \sqcup\} \cup \\
& \cup \{\triangleright q_{\text{vαι}} \rightarrow q_{\sigma} \triangleright\} \cup \\
& \cup \{bp \rightarrow qa \mid \exists q, p \in Q \setminus \{q_{\sigma}\} \exists a, b \in \Gamma (\delta(q, a) = (p, b, \Delta))\} \cup \\
& \cup \{p * b \rightarrow *qa \mid \exists q, p \in Q \setminus \{q_{\sigma}\} \exists a, b \in \Gamma (\delta(q, a) = (p, b, A)), \text{ για } * \in \Gamma\} \cup \\
& \cup \{q_{\sigma} * \sqcup \rightarrow *qa \mid \exists q \in Q \exists a \in \Gamma (\delta(q, a) = (q_{\sigma}, \sqcup, A)), \text{ για } * \in \Gamma\} \cup \\
& \cup \{\triangleright q_0 \rightarrow \epsilon, \sqcup \rightarrow \epsilon\}
\end{aligned}$$

Έστω  $w \in \{0, 1\}^*$  είσοδος της  $M$ . Αντιστοιχούμε κάθε στιγμιότυπο  $\triangleright w_1 q w_2$  της  $M(w)$  (όπου  $w_1, w_2 \in \Gamma$  και  $q \in Q$ ) στη λέξη  $\triangleright w_1 q w_2 \sqcup \in (\Gamma \cup Q)^*$  και, έχοντας προσθέσει στο  $R$  κανόνες που εφαρμόζουν τις μεταβάσεις της  $\delta$  αντίστροφα<sup>1</sup>, προσομοιώνουμε τη λειτουργία της  $M(w)$  από το τέλος (το στιγμιότυπο  $\triangleright q_{\text{vαι}}$  δηλαδή) προς την αρχή (το στιγμιότυπο  $\triangleright q_0 w$ ). Παρατηρήστε ότι  $M(w) \downarrow_{q_{\text{vαι}}}^* \text{ αν } S \Rightarrow_{G_M}^* w$ , άρα  $L(G_M) = L(M) = L$ .

( $\Leftarrow$ ) Έστω γραμματική  $G = (V, \{0, 1\}, R, S)$ . Θα ορίσουμε μία NTM  $N_G = (Q, \{0, 1\}, \Gamma, \delta, q_0, q_{\text{vαι}}, q_{\text{όχι}})$ , με  $V \subseteq \Gamma$ , που θα ημι-αποφασίζει την  $L(G)$ . Η  $N_G$  έχει τρεις ταινίες: Η πρώτη περιέχει τη λέξη εισόδου (και δεν μεταβάλλεται ποτέ), η δεύτερη είναι η ταινία εργασίας και η τρίτη περιέχει την κωδικοποίηση της  $G$  (δηλαδή τη λέξη  $\langle G \rangle$ ).

Η  $N_G$  ελέγχει αν είναι δυνατό να παραχθεί η είσοδος  $w \in \{0, 1\}^*$  σύμφωνα με τους κανόνες της  $G$ . Στην αρχή του υπολογισμού η δεύτερη ταινία περιέχει το σύμβολο  $S$  και σε κάθε βήμα κάνει τα ακόλουθα:

1. Είτε επιλέγει μη-ντετερμινιστικά έναν κανόνα από το  $R$ , είτε ελέγχει αν η δεύτερη ταινία ταυτίζεται με την πρώτη.
2. (α') Αν επιλέξει τον κανόνα  $u \rightarrow v \in R$ , η  $N_G$ :
  - i. Σαρώνει τη δεύτερη ταινία (από τα αριστερά προς τα δεξιά),
  - ii. σταματάει μη-ντετερμινιστικά σε ένα σύμβολο,
  - iii. ελέγχει αν τα επόμενα  $|u|$  σύμβολα ταυτίζονται με τη  $u$ :
    - αν ταυτίζονται τα αντικαθιστά με τη  $v$  (δημιουργώντας χώρο ή «διαγράφοντας» κενά όταν χρειαστεί),
    - αν δεν ταυτίζονται η  $N_G$  «κολλάει».
- (β') Αν επιλέξει να ελέγξει αν η δεύτερη ταινία ταυτίζεται με την πρώτη:
  - Αν όντως ταυτίζονται η  $N_G$  πάει στην  $q_{\text{vαι}}$  και τερματίζει.
  - Αν δεν ταυτίζονται η  $N_G$  «κολλάει».

Εύκολα βλέπουμε ότι υπάρχει παραγωγή της  $w$  από την  $G$  αν υπάρχει μη-ντετερμινιστικός κλάδος της  $N_G(w)$  που καταλήγει στην  $q_{\text{vαι}}$ , άρα  $L(M_G) = L(G)$ . Για να ολοκληρωθεί η απόδειξη θα πρέπει να δείξουμε ότι για κάθε μη-ντετερμινιστική TM  $k$ -ταινιών υπάρχει ισοδύναμη μονοταινιακή και ντετερμινιστική TM<sup>2</sup>.  $\square$

<sup>1</sup> Αν  $C_1 \vdash_M C_2$  για δύο στιγμιότυπα  $C_1, C_2$  της  $M(w)$  τότε, σύμφωνα με τους κανόνες της  $G_M$ , έχουμε  $C_2 \Rightarrow_{G_M}^* C_1$  όπου πλέον τα  $C_1, C_2$  τα βλέπουμε ως λέξεις του  $(\Gamma \cup Q)^*$ .

<sup>2</sup> Αφήνεται ως άσκηση.

Οι γενικές γραμματικές πέρα από το να παράγουν λέξεις μπορούν να υπολογίσουν και συναρτήσεις.

**Ορισμός 4.1.10.** Η γραμματική  $G = (V, \Sigma, R, S)$  υπολογίζει τη συνάρτηση  $f : \Sigma^* \rightarrow \Sigma^*$  αν για κάθε  $x, y \in \Sigma^*$ :

$$SxS \Rightarrow_G^* y \Leftrightarrow f(x) = y$$

και αν  $x \notin \text{dom}(f)$  τότε δεν υπάρχει  $y \in \Sigma^*$  τέτοιο ώστε  $SxS \Rightarrow_G^* y$ .

Μία συνάρτηση  $f : \Sigma^* \rightarrow \Sigma^*$  καλείται *γραμματικά υπολογίσιμη* αν υπάρχει γενική γραμματική που την υπολογίζει.

**Παράδειγμα 4.1.11.** Η συνάρτηση  $f : \{1\}^* \rightarrow \{1\}^*$  με  $f(x) = xx$  είναι γραμματικά υπολογίσιμη καθώς η γραμματική  $G = (\{1, S\}, \{1\}, S, R)$ , όπου  $R = \{S1 \rightarrow 11S, SS \rightarrow \epsilon\}$ , την υπολογίζει.

**Παράδειγμα 4.1.12.** Η συνάρτηση  $f : \mathbb{N} \rightarrow \mathbb{N}$ , με  $f(x) = 3x + 5$  είναι γραμματικά υπολογίσιμη, αν χρησιμοποιήσουμε το μοναδιαίο σύστημα αρίθμησης (δες σελίδα 80), καθώς η γραμματική  $G = (\{1, S\}, \{1\}, R, S)$ , όπου  $R = \{S1 \rightarrow 111S, S1S \rightarrow 111111\}$ , την υπολογίζει.

Αντίστοιχα με το Θεώρημα 4.1.9 μπορούμε να αποδείξουμε το ακόλουθο θεώρημα (τέταρτος ορισμός υπολογίσιμων συναρτήσεων).

**Θεώρημα 4.1.13.** Μία συνάρτηση  $f : \Sigma^* \rightarrow \Sigma^*$  είναι υπολογίσιμη αν είναι γραμματικά υπολογίσιμη.

## 4.2 Γραμματικές με συμφραζόμενα

**Ορισμός 4.2.1.** Γραμματική με συμφραζόμενα (ή γραμματική Τύπου I) είναι μία γραμματική  $G = (V, \{0, 1\}, R, S)$  όπου για κάθε κανόνα  $u \rightarrow v \in R$  ισχύει ότι  $|u| \leq |v|$ .

Το ακόλουθο Θεώρημα αναφέρεται χωρίς απόδειξη (δες Άσκηση 4.12).

**Θεώρημα 4.2.2.** Για κάθε γραμματική  $G = (V, \{0, 1\}, R, S)$  με συμφραζόμενα υπάρχει ισοδύναμη γραμματική  $G' = (V', \{0, 1\}, R', S)$ , όπου  $V \subseteq V'$  και κάθε κανόνας  $u \rightarrow v \in R'$  έχει τη μορφή  $w_1Aw_2 \rightarrow w_1ww_2$ , όπου  $w, w_1, w_2 \in V'^*$ ,  $A \in V' \setminus \{0, 1\}$  και  $w \neq \epsilon$ <sup>1</sup>.

**Ορισμός 4.2.3.** Μία γλώσσα  $L \subseteq \{0, 1\}^*$  ονομάζεται γλώσσα με συμφραζόμενα αν υπάρχει γραμματική με συμφραζόμενα που την παράγει. Συμβολίζουμε το σύνολο των γλωσσών με συμφραζόμενα ως CS.

**Σημείωση 4.2.4.** Παρατηρήστε ότι σύμφωνα με τον Ορισμό 4.2.1 οι γλώσσες του CS δεν μπορούν να περιέχουν την κενή λέξη. Αυτό θα μας δημιουργήσει πρόβλημα στην απόδειξη του Θεωρήματος 4.2.8 και στην Ιεραρχία Chomsky (Παράγραφος 4.5), όπου θα ιεραρχήσουμε (σύμφωνα με τη σχέση του συνολοθεωρητικού εγκλεισμού) τις κλάσεις των γλωσσών

<sup>1</sup> Με λόγια: Το σύμβολο  $A$  όταν έχει συμφραζόμενα  $w_1$  και  $w_2$  μετατρέπεται στη λέξη  $w$ .

που παράγονται από τους τύπους γραμματικών που θα δούμε στις Παραγράφους 4.2, 4.3 και 4.4. Ένας τρόπος να αποφύγουμε αυτό το πρόβλημα είναι να επιτρέψουμε στον Ορισμό 4.2.1 τον κανόνα  $S \rightarrow \epsilon$  και να εξασφαλίσουμε ότι το  $S$  δεν εμφανίζεται στο δεξιό μέρος κάποιου κανόνα <sup>1</sup>.

**Παράδειγμα 4.2.5.** Η γλώσσα  $L = \{a^n b^n c^n \in \{a, b, c\}^* \mid n \geq 1\}$  <sup>2</sup> του Παραδείγματος 4.1.7 είναι γλώσσα με συμφραζόμενα <sup>3</sup>, καθώς εύκολα μπορούμε να δούμε ότι η γραμματική  $G = (V, \Sigma, R, S)$  με  $V = \{B, C, T_b, T_c, S\} \cup \Sigma$ , όπου  $\Sigma = \{a, b, c\}$ , και

$$R = \left\{ \begin{array}{l|l} S \rightarrow aBC, & T_b C \rightarrow BC, \\ S \rightarrow aSBC, & aB \rightarrow ab, \\ CB \rightarrow CT_c, & bB \rightarrow bb, \\ CT_c \rightarrow T_b T_c, & bC \rightarrow bc, \\ T_b T_c \rightarrow T_b C, & cC \rightarrow cc \end{array} \right.$$

την παράγει <sup>4</sup>.

**Ορισμός 4.2.6.** Γραμμικά φραγμένο αυτόματο (LBA) είναι μία NTM  $N = (Q, \Sigma, \Gamma, \delta, q_0, q_{\text{ναι}}, q_{\text{όχι}})$  με  $\triangleleft \in \Gamma \setminus \Sigma$ , όπου το  $\triangleleft$  είναι ένα σύμβολο που σηματοδοτεί το τέλος της λέξης εισόδου (δες Σχήμα 4.2.1). Η  $N$  δεν μπορεί να κινήσει την κεφαλή δεξιότερα από το σύμβολο  $\triangleleft$  ούτε να γράψει πάνω σε αυτό <sup>5</sup>.

Ορίζοντας τον υπολογισμό και κατ' επέκταση την αποδοχή και την απόρριψη μίας λέξης αντίστοιχα με τον Ορισμό 1.3.7 μπορούμε να ορίσουμε τη γλώσσα που αναγνωρίζει το LBA ως εξής:

$$L(N) = \{w \in \Sigma^* \mid \exists w_1, w_2 \in \Gamma^* (\triangleright q_0 w \triangleleft \vdash_N^* w_1 q_{\text{ναι}} w_2 \triangleleft)\}$$

**Παρατήρηση 4.2.7.** Έστω LBA  $N = (Q, \Sigma, \Gamma, \delta, q_0, q_{\text{ναι}}, q_{\text{όχι}})$ . Χρησιμοποιώντας σύμβολα που αντιστοιχούν σε λέξεις μήκους το πολύ  $c \in \mathbb{N}$  του  $\Gamma^*$  και τροποποιώντας κατάλληλα τη  $\delta$  μπορούμε να «μεγαλώσουμε» τη διαδέσιμη «μνήμη» <sup>6</sup> από  $|w|$ , όπου  $w \in \Sigma^*$  η είσοδος, σε  $c \cdot |w|$ .

<sup>1</sup> Έτσι όλες οι παραγωγές λέξεων από τη γραμματική θα αυξάνουν το μήκος της λέξης, εκτός φυσικά από την παραγωγή της κενής λέξης

<sup>2</sup> Η  $L$  ορίζεται σαν γλώσσα του  $\{a, b, c\}$  για λόγους απλότητας. Θα μπορούσαμε να την ορίσουμε στο  $\{0, 1\}$  παραδείγματος χάρι ως εξής:  $L = \{(01)^n (011)^n (0111)^n \in \{0, 1\}^* \mid n \geq 1\}$ .

<sup>3</sup> Παρατηρήστε ότι η γραμματική του Παραδείγματος 4.1.7 δεν είναι γραμματική με συμφραζόμενα καθώς περιέχει τον κανόνα  $T_a \rightarrow \epsilon$ .

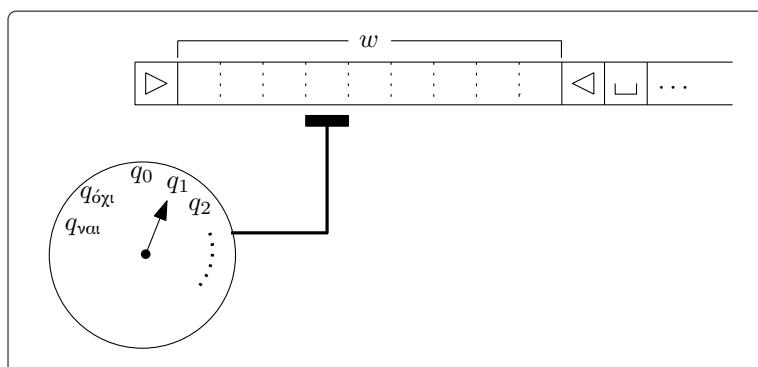
<sup>4</sup> Και η γραμματική με συμφραζόμενα  $G = (V, \Sigma, R, S)$  με  $V = \{B, C, S\} \cup \Sigma$ ,  $\Sigma = \{a, b, c\}$ , και

$$R = \left\{ \begin{array}{l|l} S \rightarrow aBC, & bB \rightarrow bb, \\ S \rightarrow aSBC, & bC \rightarrow bc, \\ CB \rightarrow BC, & cC \rightarrow cc \\ aB \rightarrow ab, & \end{array} \right.$$

την παράγει μόνο που η γραμματική του Παραδείγματος 4.2.5 έχει την «κανονική μορφή» του Θεωρήματος 4.2.2.

<sup>5</sup> Συνεπώς η  $N$  έχει πρόσβαση μόνο στο κομμάτι της ταινίας που περιέχει την είσοδο.

<sup>6</sup> Το πλήθος συμβόλων δηλαδή που μπορούμε να αποθηκεύσουμε στο κομμάτι της ταινίας που μας επιτρέπεται να τροποποιήσουμε.



Σχήμα 4.2.1: Σχηματική αναπαράσταση ενός LBA.

Τα LBA αποτελούν έναν περιορισμό των TM. Αυτός ο περιορισμός είναι ουσιαστικός καθώς (ακόμα και διαισθητικά αντιλαμβανόμαστε ότι) τα LBA δεν είναι το ίδιο «ισχυρά» με τις TM. Για να το αποδείξουμε όμως αυτό θα χρειαστεί (για μία ακόμα φορά) να κάνουμε διαγωνιοποίηση (δες Θεώρημα 4.2.11).

Το ακόλουθο θεώρημα αποδεικνύει ότι οι γλώσσες που αναγνωρίζονται από τα LBA είναι ακριβώς οι γλώσσες με συμφραζόμενα (η απόδειξη του αφήνεται ως Άσκηση).

**Θεώρημα 4.2.8.** Μία γλώσσα  $L \subseteq \{0, 1\}^*$  είναι γλώσσα με συμφραζόμενα αν υπάρχει LBA που την αναγνωρίζει <sup>1</sup>.

Αν εξετάσουμε προσεκτικά την απόδειξη του Θεωρήματος 4.2.8 θα καταλήξουμε στο ακόλουθο πόρισμα.

**Πόρισμα 4.2.9.** Έστω  $L \in CS$  και έστω ότι η γραμματική  $G$  Τύπου 1 την παράγει. Υπάρχει TM  $M_{G \rightarrow LBA}$  που δέχεται σαν είσοδο  $\langle G \rangle$  και επιστρέφει  $\langle N_G \rangle$  όπου  $N_G$  το LBA που αναγνωρίζει την  $L$  <sup>2</sup>.

Δεν είναι ιδιαίτερα δύσκολο να αποδείξει κανείς ότι τα LBA είναι TM που «τερματίζουν πάντα» (ή τουλάχιστον, μπορούμε να εξακριβώσουμε τότε «κολλάνε», Άσκηση 4.15), επομένως μία γλώσσα με συμφραζόμενα είναι αναδρομική γλώσσα. Αυτός ο ισχυρισμός (Θεώρημα 4.2.10) μπορεί να αποδειχθεί και χωρίς τη χρήση LBA (δες Άσκηση 4.14).

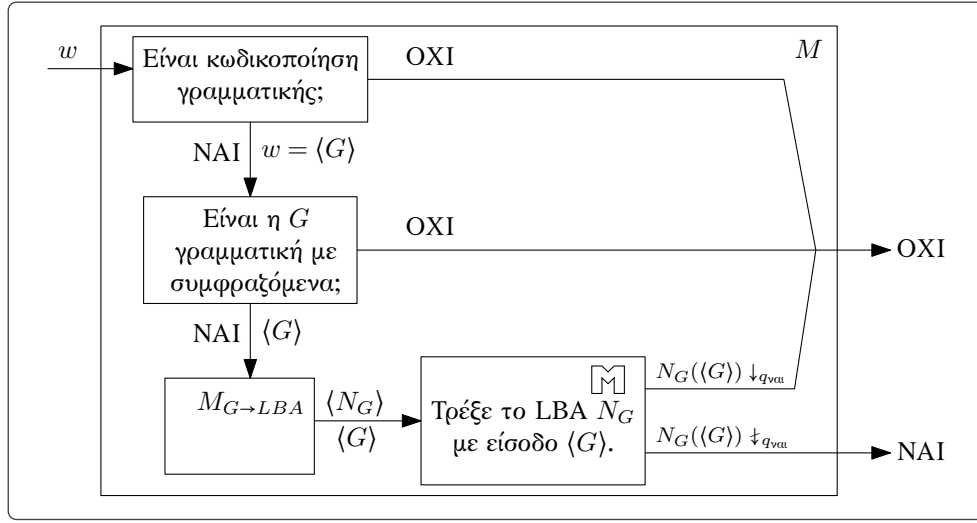
**Θεώρημα 4.2.10.** Κάθε γλώσσα με συμφραζόμενα είναι αναδρομική (δηλαδή  $CS \subseteq REC$ ).

Το αντίστροφο του Θεωρήματος 4.2.10 δεν ισχύει καθώς υπάρχουν αναδρομικές γλώσσες που δεν είναι γλώσσες με συμφραζόμενα <sup>3</sup>.

<sup>1</sup> Δες τη Σημείωση 4.2.4.

<sup>2</sup> Απόρροια του «θιαστικού» τρόπου με τον οποίο κωδικοποιήσαμε τις γραμματικές, είναι το ακόλουθο εύλογο ερώτημα: Ποιο ακριβώς LBA θα επιστρέφει η TM  $M_{G \rightarrow LBA}$ , καθώς η λέξη  $\langle G \rangle$  αντιστοιχεί σε πολλές γραμματικές; Η αλήθεια είναι ότι με την ίδια λέξη κωδικοποιούνται μόνο ισοδύναμες γραμματικές (που περιέχουν μη χρησιμοποιούμενα μη-τερματικά σύμβολα). Οπότε στην πραγματικότητα ένα μόνο LBA αντιστοιχεί στην  $\langle G \rangle$ !

<sup>3</sup> Πόρισμα αυτού είναι ότι τα LBA είναι ασθενέστερα από τις TM.



**Σχήμα 4.2.2:** Η ΤΜ που αποφασίζει την  $L$  στην απόδειξη του Θεωρήματος 4.2.11.  $M_{G \rightarrow LBA}$  είναι η ΤΜ του Πορίσματος 4.2.9.

**Θεώρημα 4.2.11.** Υπάρχει γλώσσα  $L \in \text{REC} \setminus \text{CS}$ .

*Απόδειξη.* Παρατηρήστε ότι αν μας δωθεί μια κωδικοποίηση γραμματικής στο  $\{0, 1\}$  (σύμφωνα με όσα είπαμε στη Σελίδα 104) μπορούμε να ελέγχουμε αν επιπλέον αντιστοιχεί σε κωδικοποίηση γραμματικής με συμφραζόμενα (ελέγχουμε αν οι κανόνες έχουν τη μορφή του Ορισμού 4.2.1). Θεωρούμε τη γλώσσα:

$$L = \{ \langle G \rangle \in \{0, 1\}^* \mid G \text{ γραμματική με συμφραζόμενα και } \langle G \rangle \notin L(G) \}$$

Παρατηρήστε ότι  $L \in \text{REC}$  καθώς η ΤΜ  $M$  του Σχήματος 4.2.2 την αποφασίζει<sup>1</sup>. Η  $L$  όμως δεν θα μπορούσε να είναι γλώσσα με συμφραζόμενα καθώς τότε, αν  $G_L$  ήταν η γραμματική με συμφραζόμενα που την παρήγαγε, θα ίσχυε ότι:

$$\langle G_L \rangle \in L \Leftrightarrow \langle G_L \rangle \notin L(G_L) \Leftrightarrow \langle G_L \rangle \notin L$$

που είναι άτοπο. □

### 4.3 Γραμματικές χωρίς συμφραζόμενα

**Ορισμός 4.3.1.** Γραμματική χωρίς συμφραζόμενα (ή γραμματική Τύπου 2) είναι μία γραμματική  $G = (V, \{0, 1\}, R, S)$  τέτοια ώστε  $R \subseteq (V \setminus \{0, 1\}) \times V^*$ <sup>2</sup>.

<sup>1</sup> Σύμφωνα με την Άσκηση 4.15 ο έλεγχος που κάνει η καθολική ΤΜ στο Σχήμα 4.2.2 τερματίζει πάντα.

<sup>2</sup> Δηλαδή έχουμε κανόνες της μορφής  $A \rightarrow u$ , όπου  $A$  μη-τερματικό σύμβολο και  $u \in V^*$  (η  $u$  μπορεί να είναι και η κενή λέξη).

**Ορισμός 4.3.2.** Μία γλώσσα  $L \subseteq \{0, 1\}^*$  ονομάζεται γλώσσα χωρίς συμφραζόμενα ανν υπάρχει γραμματική χωρίς συμφραζόμενα που την παράγει. Συμβολίζουμε το σύνολο των γλωσσών χωρίς συμφραζόμενα ως CF.

**Σημείωση 4.3.3.** Χωρίς βλάβη της γενικότητας, μπορούμε να θεωρήσουμε ότι στον Ορισμό 4.3.1 ο μόνος κανόνας που περιέχει την κενή λέξη στο δεξιό μέρος του είναι ο  $S \rightarrow \epsilon$  και ότι το  $S$  δεν εμφανίζεται στο δεξιό μέρος κάποιου κανόνα. Το γεγονός αυτό θα το χρειαστούμε στην απόδειξη του Θεωρήματος 4.5.1.

**Παράδειγμα 4.3.4.** Η γλώσσα  $L = \{0^n 1^n \in \{0, 1\}^* \mid n \in \mathbb{N}\}$  είναι γλώσσα χωρίς συμφραζόμενα καθώς η γραμματική  $G$  του Παραδείγματος 4.1.6 είναι γραμματική χωρίς συμφραζόμενα.

Όπως κάναμε με τις γλώσσες με συμφραζόμενα, θα ορίσουμε έναν «περιορισμό» των TM που (αποδεικνύεται ότι) αποφασίζει <sup>1</sup> τις γλώσσες χωρίς συμφραζόμενα.

**Ορισμός 4.3.5.** Αυτόματο στοιβάς (PDA) είναι μία NTM δύο ταινιών  $N = (Q, \Sigma, \Gamma, \delta, q_0, q_{\text{vai}}, q_{\text{όχι}})$  όπου  $\delta \subseteq Q \times (\Sigma \cup \{\epsilon\}) \times (\Gamma \cup \{\epsilon\}) \times Q \times (\Gamma \cup \{\epsilon\})$  <sup>2</sup> (δες Σχήμα 4.3.1). Αν έχουμε τη μετάβαση  $(p, a, b, q, c) \in \delta$  τότε δεν μπορούν ταυτόχρονα τα  $b, c$  να ισούνται με  $\epsilon$ . Η κεφαλή της πρώτης ταινίας κινείται πάντα δεξιά (μόνο που αν  $a = \epsilon$  στην ουσία δεν λαμβάνουμε κάποια πληροφορία από τη λέξη εισόδου), ενώ η κεφαλή της δεύτερης ταινίας κινείται όταν:

- $b = \epsilon$ , μετακινείται ένα κελί δεξιά και γράφει  $c$  στη θέση του  $\sqcup$ ,
- $c = \epsilon$ , αντικαθιστά το  $b$  με  $\sqcup$  και κινείται μία θέση αριστερά <sup>3</sup>,

Η  $N$  τερματίζει απαραίτητα (είτε αποδεχόμενη την είσοδο είτε απορρίπτοντάς την) όταν διαβαστεί όλη η είσοδος και φτάσουμε στο πρώτο  $\sqcup$ .

Ένα PDA  $N = (Q, \Sigma, \Gamma, \delta, q_0, q_{\text{vai}}, q_{\text{όχι}})$  αποδέχεται/απορρίπτει τη λέξη  $w \in \Sigma^*$  ανν υπάρχει λέξη  $w' \in (\Sigma \cup \{\epsilon\})^*$  τέτοια ώστε  $w = w'$  (δηλαδή η  $w'$  είναι στην ουσία η  $w$  όπου έχουμε προσθέσει σε κάποια σημεία το σύμβολο της κενής λέξης) και ο υπολογισμός με είσοδο την  $w'$  και κενή δεύτερη ταινία (όπως τον περιγράψαμε παραπάνω) καταλήγει στην κατάσταση αποδοχής/απόρριψης.

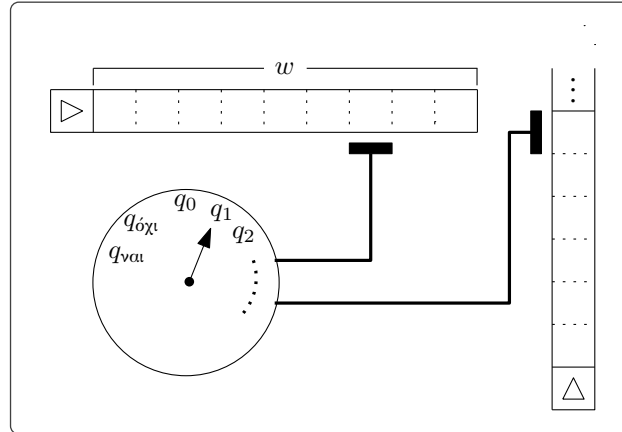
Το παρακάτω Θεώρημα αναφέρεται χωρίς απόδειξη.

**Θεώρημα 4.3.6.** Μία γλώσσα  $L \subseteq \{0, 1\}^*$  είναι γλώσσα χωρίς συμφραζόμενα ανν υπάρχει PDA που την αναγνωρίζει.

<sup>1</sup> Μην σας ξενίζει το γεγονός ότι λέμε «αποφασίζει» αντί για «αναγνωρίζει». Μία γλώσσα χωρίς συμφραζόμενα είναι και γλώσσα με συμφραζόμενα, άρα (από το Θεώρημα 4.2.10) ανήκει στο REC.

<sup>2</sup> Ναι σωστά καταλάβατε, χρησιμοποιούμε ως σύμβολο την κενή λέξη!

<sup>3</sup> Παρατηρήστε ότι η πρώτη ταινία περιέχει την είσοδο και δεν τροποποιείται ποτέ, το  $M$  μπορεί να διαβάσει μόνο το τελευταίο μη-κενό κελί της δεύτερης ταινίας και να γράφει μόνο στο πρώτο κενό κελί της, τη χρησιμοποιεί δηλαδή σαν μία «στοίβα» συμβόλων.



Σχήμα 4.3.1: Σχηματική αναπαράσταση ενός PDA.

## 4.4 Κανονικές γραμματικές

Ας ξεκινήσουμε ορίζοντας τις γλώσσες που «προέρχονται» από κανονικές εκφράσεις του  $\{0, 1\}$  (θυμηθείτε τους Ορισμούς 0.2.22 και 0.2.24).

**Ορισμός 4.4.1.** Μία γλώσσα  $L \subseteq \{0, 1\}^*$  είναι *κανονική* αν υπάρχει  $x \in R_{\{0,1\}}$  τέτοια ώστε  $L = \mathcal{L}(x)$ . Το σύνολο των κανονικών γλωσσών το συμβολίζουμε με  $R$ .

**Ορισμός 4.4.2.** *Κανονική γραμματική* (ή *αριστερο-γραμμική*<sup>1</sup> *γραμματική* ή *γραμματική Τύπου 3*) είναι μία γραμματική χωρίς συμφραζόμενα  $G = (V, \{0, 1\}, R, S)$  όπου το δεξιό μέρος των κανόνων του  $R$  περιέχει το πολύ ένα μη-τερματικό σύμβολο, το οποίο βρίσκεται στο αριστερότερο άκρο<sup>2</sup>.

**Παράδειγμα 4.4.3.** Η γραμματική  $G = (V, \{0, 1\}, R, S)$  με  $V = \{0, 1, A, S\}$  και

$$R = \left\{ \begin{array}{l|l} S \rightarrow A, & S \rightarrow S1, \\ S \rightarrow \epsilon, & A \rightarrow A0 \end{array} \right\}$$

είναι κανονική γραμματική. Παρατηρήστε ότι  $L(G) = \{0^n 1^m \in \{0, 1\}^* \mid n, m \in \mathbb{N}\}$ . Παρατηρήστε επίσης ότι  $L(G) = [0^* 1^*]$ . Όπως μας δείχνει το Θεώρημα 4.4.5, το γεγονός αυτό δεν είναι τυχαίο.

**Ορισμός 4.4.4.** *Πεπερασμένο αυτόματο (NFA)* είναι ένα PDA  $N = (Q, \Sigma, \Gamma, \delta, q_0, q_{\text{ναι}}, q_{\text{όχι}})$  που δεν έχει «στοίβα», δηλαδή η συνάρτηση μετάβασης του είναι  $\delta \subseteq Q \times (\Sigma \cup \{\epsilon\}) \times Q$ .

Το παρακάτω Θεώρημα αναφέρεται επίσης χωρίς απόδειξη.

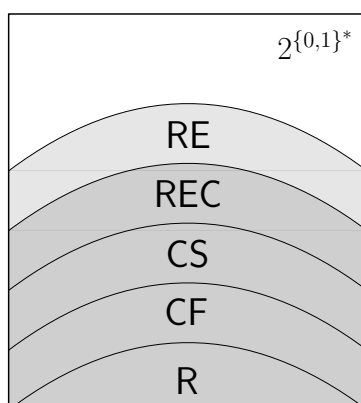
**Θεώρημα 4.4.5.** Έστω γλώσσα  $L \subseteq \{0, 1\}^*$ . Τα ακόλουθα είναι ισοδύναμα:

<sup>1</sup> Μπορούμε να ορίσουμε και *δεξιο-γραμμικές* γραμματικές με αντίστοιχο τρόπο.

<sup>2</sup> Δηλαδή έχουμε κανόνες της μορφής  $A \rightarrow Bu$  ή  $A \rightarrow u$  ή  $A \rightarrow \epsilon$  όπου  $A, B$  μη-τερματικά σύμβολα και  $u \in \{0, 1\}^*$ .

| Γλώσσες | Γραμματικές        | Υπολογιστικό Μοντέλο |
|---------|--------------------|----------------------|
| RE      | Γενικές            | TM                   |
| CS      | Με συμφραζόμενα    | LBA                  |
| CF      | Χωρίς συμφραζόμενα | PDA                  |
| R       | Κανονικές          | NFA                  |

**Πίνακας 4.1:** Σχέση μεταξύ κλάσεων γλωσσών, γραμματικών και μηχανών.



**Σχήμα 4.5.1:** Η Ιεραρχία Chomsky.

1. Η  $L \in R$ .
2. Υπάρχει κανονική γραμματική  $G$  με  $L(G) = L$ .
3. Υπάρχει NFA  $N$  με  $L(N) = L$ .

## 4.5 Ιεραρχία Chomsky

Ο Πίνακας 4.1 δείχνει τη σχέση των κλάσεων γλωσσών, τύπου γραμματικής και υπολογιστικού μοντέλου που είδαμε στις προηγούμενες παραγράφους.

**Θεώρημα 4.5.1** (Ιεραρχία Chomsky). Ισχύει ότι  $R \subset CF \subset CS \subset RE$  (δες Σχήμα 4.5.1).

*Σκιαγράφηση απόδειξης.* Η συμπερίληψη προκύπτει από τους Ορισμούς, από το Θεώρημα 4.4.5 και από το γεγονός ότι:

- Μία κανονική γραμματική είναι και γραμματική χωρίς συμφραζόμενα.
- Μία γραμματική χωρίς συμφραζόμενα είναι και γραμματική με συμφραζόμενα <sup>1</sup>.

<sup>1</sup> Αυτό προκύπτει από αυτά που αναφέρονται στις Σημειώσεις 4.2.4 και 4.3.3. Ο εγκλεισμός  $CF \subseteq CS$  μπορεί επίσης να αποδειχθεί δείχνοντας ότι μπορούμε να προσομοιώσουμε τη λειτουργία ενός PDA με ένα LBA.

- Μία γραμματική με συμφραζόμενα είναι και γενική γραμματική.

Για να αποδειχθεί ότι οι συμπεριλήψεις μεταξύ των R, CF και των CF, CS είναι γνήσιες πρέπει να εφαρμόσουμε τα Λήμματα άντλησης <sup>1</sup>, ενώ το γνήσιο της συμπερίληψης του CS στο RE αποδείχθηκε στο Θεώρημα 4.2.11.  $\square$

**Σημείωση 4.5.2.** Δεν υπάρχει τύπος γραμματικής που να παράγει ακριβώς τις γλώσσες της κλάσης REC.

Οι γραμματικές που είδαμε στο κεφάλαιο αυτό στη βιβλιογραφία συνήθως αποκαλούνται *Phrase Structure*, ένα όνομα που έδωσε ο Noam Chomsky το 1957 στις «γραμματικές» που είχαν πρότερα μελετήσει οι Emil Post και Axel Thue. Σε αυτές τις γραμματικές οι παραγωγές των λέξεων βασίζονται στον μετασχηματισμό των μη-τερματικών συμβόλων. Στις λεγόμενες *Left-associative* γραμματικές οι παραγωγές των λέξεων βασίζονται στην ακόλουθη ιδέα: Ξεκινάμε από κάποιο αρχικό σύμβολο και συνεχίζουμε την παραγωγή ανάλογα με τους επιτρεπόμενους από τους κανόνες τρόπους επέκτασης της λέξης (π.χ. προσθέτοντας κάποιο σύμβολο). Η κλάση των γλωσσών που παράγεται από τις γραμματικές αυτού του είδους ταυτίζεται με τη REC <sup>2</sup>.

## Ασκήσεις

**4.1 (☆☆☆).** Έστω γραμματική  $G = (V, \Sigma, R, S)$  με  $V = \{0, 1, S\}$ ,  $\Sigma = \{0, 1\}$  και  $R = \{S \rightarrow 0S1, S \rightarrow \epsilon\}$ . Αποδείξτε τυπικά ότι  $L(G) = \{0^n 1^n \in \{0, 1\}^* \mid n \in \mathbb{N}\}$ .

**4.2 (★★☆).** Αποδείξτε το Θεώρημα 4.1.13.

**4.3 (★☆☆).** Βρείτε γραμματική Τύπου 0 που παράγει τη γλώσσα  $L = \{ww \mid w \in \{0, 1\}^*\}$ .

**4.4 (★★☆).** Αποδείξτε το Θεώρημα 4.2.8.

**4.5 (★★☆).** Βρείτε γραμματική Τύπου 0 που παράγει τη γλώσσα  $L = \{1^{2^i} \mid i \geq 1\}$ . Εξετάστε αν είναι γλώσσα με συμφραζόμενα.

**4.6 (★☆☆).** Βρείτε γραμματική που υπολογίζει τη συνάρτηση  $f : \{0, 1\}^* \rightarrow \{0, 1\}^*$ , με  $f(x)$  να είναι η λέξη  $x$  με τα 0 να έχουν γίνει 1 και τα 1 να έχουν γίνει 0.

<sup>1</sup> Το Λήμμα άντλησης για κανονικές γλώσσες (με δυο λόγια) λέει ότι μία «αρκετά μεγάλη» λέξη περιέχει πάντα μία υπολέξη που επαναλαμβάνεται ένα πλήθος φορών (παρατηρήστε π.χ. ότι η γλώσσα του Παραδείγματος 4.3.4 δεν έχει αυτήν την ιδιότητα). Στις γλώσσες χωρίς συμφραζόμενα προκύπτει ότι για κάθε «αρκετά μεγάλη» λέξη υπάρχουν δύο επαναλαμβανόμενες υπολέξεις. Για περισσότερες λεπτομέρειες ανατρέξτε στα [1, 2, 3, 4, 7].

<sup>2</sup> Περισσότερες πληροφορίες μπορείτε να βρείτε στο [10].

**4.7 (★☆☆).** Βρείτε γραμματική που υπολογίζει τη συνάρτηση  $f : \{0, 1\}^* \rightarrow \{0, 1\}^*$ , με  $f(x_1x_2 \cdots x_n) = x_1x_1x_2x_2 \cdots x_nx_n$ .

**4.8 (★★☆).** Βρείτε γραμματική που υπολογίζει τη συνάρτηση  $f : \{0, 1\}^* \rightarrow \{0, 1\}^*$ , με:

$$f(x_1x_2 \cdots x_n) = \begin{cases} x_1x_1x_2x_2 \cdots x_nx_n & , \text{ Αν } x_n = 0 \\ y_1y_2 \cdots y_n \text{ όπου } y_i = \begin{cases} 1 & , \text{ Αν } x_i = 0 \\ 0 & , \text{ Αλλιώς} \end{cases} & , \text{ Αλλιώς} \end{cases}$$

**4.9 (★☆☆).** Βρείτε γραμματική που υπολογίζει στο μοναδιαίο σύστημα τη συνάρτηση  $f : \mathbb{N} \rightarrow \mathbb{N}$ , με  $f(x) = x \bmod 3$ .

**4.10 (★☆☆).** Βρείτε γραμματική που υπολογίζει στο μοναδιαίο σύστημα τη συνάρτηση  $f : \mathbb{N} \setminus \{0\} \rightarrow \mathbb{N}$ , με  $f(x) = x - 1$ .

**4.11 (★☆☆).** Βρείτε γραμματική που υπολογίζει στο μοναδιαίο σύστημα τη συνάρτηση  $f : \{x \in \mathbb{N} \mid x = 0 \bmod 2\} \rightarrow \mathbb{N}$ , με  $f(x) = x/2$ .

**4.12 (★★☆).** Αποδείξτε το Θεώρημα 4.2.2 Αν αποσύρουμε τον περιορισμό  $w \neq \epsilon$  ισχύει το ίδιο για κάθε γραμματική Τύπου 0;

**4.13 (★★☆).** Αποδείξτε το Θεώρημα 4.2.8.

**4.14 (★☆☆).** Αποδείξτε το Θεώρημα 4.2.10 χωρίς να χρησιμοποιήσετε LBA.

**4.15 (★☆☆).** Θεωρήστε τη γλώσσα  $L_{\text{Αποδοχής/LBA}} = \{\langle M, w \rangle \in \{0, 1\}^* \mid M \text{ είναι LBA και } M(w) \downarrow q_{\text{ναι}}\}$ . Δείξτε ότι  $L_{\text{Αποδοχής/LBA}} \in \text{REC}$ .

**4.16 (☆☆☆).** Δείξτε ότι η γλώσσα  $L = \{ww^R \mid w \in \{0, 1\}^*\}$  είναι γλώσσα χωρίς συμφραζόμενα.



## ΜΕΡΟΣ ΙΙ

---

ΥΠΟΛΟΓΙΣΙΜΟΤΗΤΑ



## 5.1 Θέση Church-Turing

Το 1900 ο David Hilbert δημοσίευσε μία λίστα αποτελούμενη από 23 προβλήματα που (κατά τον ίδιο) θα έπρεπε να απασχολήσουν τη Μαθηματική κοινότητα για τον (τότε) νέο αιώνα <sup>1</sup>. Στη δική μας αφήγηση, το δέκατο από αυτά θα μπορούσε κάλλιστα να αποτελέσει την εισαγωγή:

### Το 10<sup>ο</sup> πρόβλημα του Hilbert:

*Βρείτε μια διαδικασία σύμφωνα με την οποία μπορεί να εξακριβωθεί αν μία πολυωνυμική διοφαντική εξίσωση με ακέραιους συντελεστές έχει ακέραιες λύσεις, μετά από πεπερασμένο πλήθος πράξεων.*

Η σπουδαιότητα αυτού του προβλήματος έγκειται στο γεγονός ότι στην ουσία ζητάει την εύρεση ενός αλγορίθμου που με είσοδο μία εξίσωση θα αποφασίζει αν αυτή έχει ακέραιες λύσεις ή όχι. Σίγουρα δεν είναι η πρώτη φορά που ανατέθηκε στους μαθηματικούς η εύρεση αλγορίθμου. Το σημαντικό είναι ότι πλέον ένας σύγχρονος μαθηματικός εξετάζει παράλληλα και το ενδεχόμενο μη ύπαρξης αλγορίθμου (ή έστω αποδοτικού αλγορίθμου)!

Όμως τι ακριβώς θεωρείται αλγόριθμος. Διαισθητικά θα μπορούσαμε να ορίσουμε την έννοια του αλγορίθμου ως εξής:

**Ορισμός 5.1.1** (Διαισθητικός Ορισμός Αλγορίθμου). *Αλγόριθμος* είναι μία πεπερασμένη ακολουθία (αυστηρά καθορισμένων) απλών οδηγιών που διεκπεραιώνουν κάποια εργασία.

Ένα κλασικό παράδειγμα αλγόριθμου με την παραπάνω έννοια είναι ο αλγόριθμος του Ευκλείδη για την εύρεση του μέγιστου κοινού διαιρέτη (ΜΚΔ) (αποδοσμένος όπως διδάσκεται στην έκτη τάξη του Δημοτικού) <sup>2</sup>:

<sup>1</sup> Τα 10 πιο σημαντικά από αυτά τα παρουσίασε στο Παρίσι την ίδια χρονιά, στα πλαίσια του 2<sup>ου</sup> Διεθνούς Συνεδρίου Μαθηματικών.

<sup>2</sup> Για έναν εναλλακτικό αλγόριθμο δες τον ορισμό της συνάρτησης gcd στο Παράδειγμα 2.3.8.

---

**Είσοδος:** Μία ακολουθία από φυσικούς αριθμούς.

---

**Βήμα 1:** Γράφουμε σε μία σειρά τους αριθμούς.

**Βήμα 2:** Γράφουμε στην από κάτω σειρά τον μικρότερο από αυτούς και κάτω από τους άλλους το υπόλοιπο της διαίρεσης τους με αυτό τον αριθμό.

**Βήμα 3:** Επαναλαμβάνουμε το **Βήμα 2** έως ότου βρεθεί σειρά που περιέχει μόνο έναν αριθμό διαφορετικό του μηδενός.

**Βήμα 4:** Ο αριθμός αυτός είναι ο ΜΚΔ.

Όπως επίσης, αλγόριθμος μπορεί να θεωρηθεί και μία συνταγή μαγειρικής:

---

**Είσοδος:** Δύο αβγά, λάδι.

---

**Βήμα 1:** Ζεσταίνουμε το λάδι σε ένα μεγάλο τηγάνι σε μέτρια προς δυνατή φωτιά.

**Βήμα 2:** Σπάμε τα αυγά, ένα τη φορά, μέσα στο τηγάνι.

**Βήμα 3:** Γέρνουμε το τηγάνι και ρίχνουμε με ένα κουτάλι λάδι πάνω στους κρόκους.

**Βήμα 4:** Επαναλαμβάνουμε το **Βήμα 3** έως ότου το ασπράδι γίνει αδιαφανές.

**Βήμα 5:** Κατεβάζουμε τα αβγά από τη φωτιά και τα σερβίρουμε.

Φυσικά στο πλαίσιο αυτών των σημειώσεων δεν ενδιαφερόμαστε για αλγόριθμους της δεύτερης μορφής <sup>1</sup>. Βασικός μας σκοπός εδώ είναι, πρώτα να θεμελιώσουμε την έννοια του αλγορίθμου, έπειτα να ανακαλύψουμε προβλήματα που είναι μη-επιλύσιμα αλγοριθμικά και τέλος να κατατάξουμε αυτά τα προβλήματα ως προς τον βαθμό «μη-επιλυσιμότητάς» τους.

Πόρισμα όσων δούμε στο δεύτερο μέρος των σημειώσεων είναι η διερεύνηση των δυνατοτήτων των «μηχανών υπολογισμού», όπως για παράδειγμα οι ηλεκτρονικοί υπολογιστές, και η ανακάλυψη προβλημάτων που δεν είναι επιλύσιμα από αυτές.

Προκειμένου να αποδείξουμε ότι δεν υπάρχει αλγόριθμος για κάποιο πρόβλημα θα πρέπει να τον ορίσουμε με αυστηρό τρόπο, ως μαθηματικό αντικείμενο. Έτσι, αντί να πρέπει να αποδείξουμε ότι δεν υπάρχει «πεπερασμένη ακολουθία απλών οδηγιών που διεκπεραιώνουν κάποια εργασία», θα πρέπει να αποδείξουμε την μη ύπαρξη του συγκεκριμένου μαθηματικού αντικειμένου.

Για το λόγο αυτό ασπαζόμαστε τη *Θέση Church-Turing*, οι οποίοι τη δεκαετία 1930, ανεξάρτητα ο ένας από τον άλλο, προσπάθησαν να δώσουν έναν τυπικό ορισμό του αλγορίθμου (τουλάχιστον τυπικότερο του διαισθητικού), ο μεν Church χρησιμοποιώντας ένα «συμβολικό» σύστημα τον λ-λογισμό και ο δε Turing ένα «μηχανιστικό» σύστημα τις ΤΜ. Είδαμε ότι τα δύο αυτά «μοντέλα υπολογισμού» είναι ισοδύναμα μεταξύ τους, όπως επίσης είναι

---

<sup>1</sup> Αν ο αναγνώστης όμως ενδιαφέρεται, θα βρει πολλούς αλγορίθμους αυτής της μορφής εδώ: <https://akispetretzikis.com>.

ισοδύναμα και με τις ελαχιστικά αναδρομικές συναρτήσεις και τις γενικές γραμματικές <sup>1</sup>. Συνεπώς, χωρίς αναστολές μπορούμε να θεωρήσουμε ότι αλγόριθμος είναι, παραδείγματος χάρη, μία ΤΜ:

**Θέση Church-Turing.** Αλγοριθμικά υπολογίσιμες συναρτήσεις <sup>2</sup> είναι ακριβώς οι Turing υπολογίσιμες συναρτήσεις.

Προτού κλείσουμε αυτήν την εισαγωγική παράγραφο, ας αποδείξουμε ότι το 10<sup>ο</sup> πρόβλημα του Hilbert είναι «μη επιλύσιμο» (παραδέτοντας το κεντρικό Λήμμα της απόδειξης, το Θεώρημα 5.1.6, χωρίς απόδειξη). Αυτό θα μας εισάγει στη μεθοδολογία που θα εφαρμόζουμε για να απαντάμε σε ερωτήματα που αφορούν την ύπαρξη ή όχι αλγορίθμου για κάποιο πρόβλημα.

Ξεκινάμε δίνοντας τους ορισμούς που χρειαζόμαστε για να ορίσουμε τυπικά το πρόβλημα και να το μεταφέρουμε στον δικό μας συμβολισμό.

**Ορισμός 5.1.2.** Πολυωνυμική διοφαντική εξίσωση με ακέραιους συντελεστές (Π.Δ.Ε.) είναι μία εξίσωση της μορφής:

$$P(x_1, \dots, x_n) = \sum_{i=1}^m a_i x_1^{k_{1i}} \dots x_n^{k_{ni}} = 0$$

όπου  $a_i \in \mathbb{Z}$  (οι συντελεστές) και  $k_{1i}, \dots, k_{ni} \in \mathbb{N}$  (οι δυνάμεις των μεταβλητών  $x_1, \dots, x_n$ ), για κάθε  $i \in [m]$ . Ακέραια ρίζα της εξίσωσης  $P(x_1, \dots, x_n) = 0$  είναι μία  $n$ -άδα  $(z_1, \dots, z_n) \in \mathbb{Z}^n$  τέτοια ώστε  $P(z_1, \dots, z_n) = 0$ .

**Παράδειγμα 5.1.3.** Μία Π.Δ.Ε. με τρεις μεταβλητές είναι η  $3x^2 - 2xy - y^2z - 7 = 0$ . Η εξίσωση αυτή έχει πολλές ακέραιες ρίζες, μία από αυτές είναι η  $x = 1, y = 2, z = -2$ .

**Συμβολισμός 5.1.4.** Έστω Π.Δ.Ε.  $P(x_1, x_2, \dots, x_n) = \sum_{i=1}^m a_i x_1^{k_{1i}} x_2^{k_{2i}} \dots x_n^{k_{ni}} = 0$  και  $s \in \mathbb{Z}$ . Με  $P_s$  συμβολίζουμε την Π.Δ.Ε.  $P(s, x_2, \dots, x_n) = \sum_{i=1}^m a_i s^{k_{1i}} x_2^{k_{2i}} \dots x_n^{k_{ni}} = 0$ .

Θεωρώντας μια κωδικοποίηση των Π.Δ.Ε. σε ένα αλφάβητο, έστω το  $\{0, 1\}$ , μπορούμε να εκφράσουμε το 10<sup>ο</sup> πρόβλημα του Hilbert ως εξής:

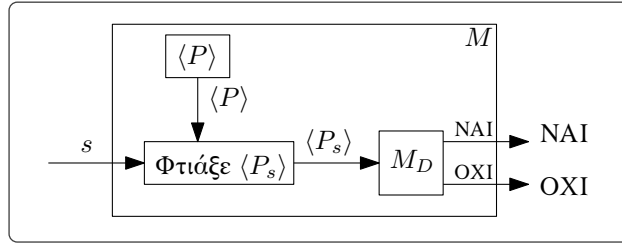
### Το 10<sup>ο</sup> πρόβλημα του Hilbert με ορολογία ΤΜ

Δείξτε (κατασκευαστικά) ότι η γλώσσα  $D = \{\langle P \rangle \in \{0, 1\}^* \mid P \text{ είναι Π.Δ.Ε. με ακέραιες ρίζες}\}$  είναι αναδρομική.

καθώς ενδιαφερόμαστε για την εύρεση ενός αλγορίθμου – δηλαδή μίας ΤΜ σύμφωνα με τη θέση Church-Turing – που δεχόμενος ως είσοδο μία Π.Δ.Ε. α) να τερματίζει πάντα και β) να μας επιστρέφει απάντηση «Ναι» αν η εξίσωση έχει ακέραιες ρίζες.

<sup>1</sup> Επιπλέον έχει αποδειχθεί ότι είναι ισοδύναμα με όλα τα υπόλοιπα «ρεαλιστικά» μοντέλα υπολογισμού που έχουν προταθεί (όπως π.χ. τα προγράμματα McCarthy, το μοντέλο του Post, ακόμα και το μοντέλο RAM πάνω στο οποίο βασίζονται οι σύγχρονοι ηλεκτρονικοί υπολογιστές).

<sup>2</sup> Χρησιμοποιώντας οσοδήποτε μεγάλους υπολογιστικούς πόρους (χώρο, χρόνο, πλήθος παράλληλων επεξεργαστών κ.λπ.) αλλά πεπερασμένους.



Σχήμα 5.1.1: Η ΤΜ  $M$  στην απόδειξη ότι  $D \notin \text{REC}$ .

**Ορισμός 5.1.5.** Ένα σύνολο  $S \subseteq \mathbb{N}$  καλείται *διοφαντικό* αν υπάρχει Π.Δ.Ε.  $P(x_1, \dots, x_{n+1})$  τέτοια ώστε

$$s \in S \Leftrightarrow \exists z_1, \dots, z_n \in \mathbb{Z} (P(s, z_1, \dots, z_n) = 0)$$

Το ακόλουθο Θεώρημα αποδείχθηκε το 1970 και έδωσε «αρνητική απάντηση» στο 10<sup>ο</sup> πρόβλημα του Hilbert.

**Θεώρημα 5.1.6** (Matiyasevich, Robinson, Davis, Putman). Κάθε αναδρομικά απαριθμήσιμο σύνολο είναι διοφαντικό.

**Θεώρημα 5.1.7.**  $D \notin \text{REC}$ .

*Απόδειξη.* Έστω (προς άτοπο) ότι  $D \in \text{REC}$  και ότι η ΤΜ  $M_D$  την αποφασίζει. Έστω επίσης  $L \in \text{RE} \setminus \text{REC}$ <sup>1</sup>. Αφού  $L \in \text{RE}$ , από το Θεώρημα 5.1.6, υπάρχει Π.Δ.Ε.  $P(x_1, \dots, x_{n+1})$ , για κάποιο  $n \in \mathbb{N}$ , τέτοια ώστε:

$$L = \{s \in \mathbb{N} \mid \exists z_1, \dots, z_n \in \mathbb{Z} (P(s, z_1, \dots, z_n) = 0)\}$$

Η ΤΜ  $M$  του Σχήματος 5.1.1 αποφασίζει την  $L$ . Άτοπο καθώς  $L \notin \text{REC}$ . □

## 5.2 Μη-αποφασισιμότητα γλωσσών

### 5.2.1 Το πρόβλημα του τερματισμού

Μία γλώσσα που παρουσιάζει πολύ μεγάλο ενδιαφέρον είναι η:

$$HP = \{\langle M, w \rangle \in \{0, 1\}^* \mid M(w) \downarrow\}$$

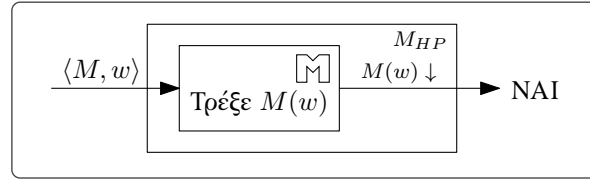
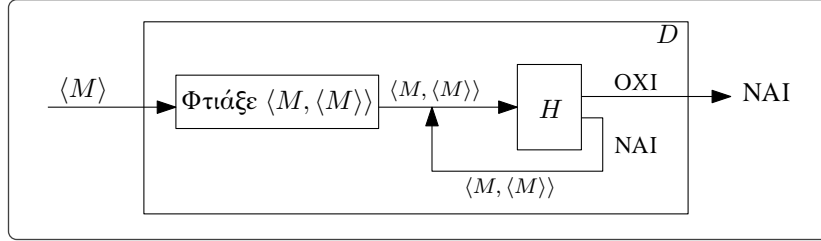
Η γλώσσα αυτή είναι γνωστή και ως *πρόβλημα του τερματισμού* καθώς περιέχει τις δυνάδες κωδικοποιήσεων ΤΜ και λέξης για την οποία ο υπολογισμός τερματίζει.

<sup>1</sup> Εδώ χρησιμοποιούμε ανεπίσημα το γεγονός ότι  $\text{REC} \subset \text{RE}$ , παρόλο που δεν το έχουμε αποδείξει ακόμα. Θα το κάνουμε όμως, με κάθε επισημότητα, στην παράγραφο που ακολουθεί. Επίσης, θεωρούμε ότι οι γλώσσες που εξετάζουμε είναι υποσύνολα του  $\mathbb{N}$ .

<sup>2</sup> Πιο τυπικά θα έπρεπε να ορίσουμε την  $HP$  ως εξής:

$$HP = \{w \in \{0, 1\}^* \mid \exists \text{ ΤΜ } M \exists w' \in \{0, 1\}^* (w = \langle M, w' \rangle \wedge M(w') \downarrow)\}$$

Θα υποθέσουμε σε αυτή την «παρατυπία» κατ' εξακολούθηση σε όσα έπονται.


 Σχήμα 5.2.1: Η ΤΜ  $M_{HP}$  ημι-αποφασίζει την  $HP$ .

 Σχήμα 5.2.2: Η ΤΜ  $D$  στην απόδειξη του Θεωρήματος 5.2.1.

Μέσα από το θεώρημα που ακολουθεί θα δούμε ότι η απάντηση στο Ερώτημα 1 (Σελίδα 29) είναι καταφατική και μάλιστα μία γλώσσα που έχει αυτήν την ιδιότητα είναι η  $HP$ . Θα μπορούσαμε να πούμε ότι το πρόβλημα του τερματισμού είναι μη-επιλύσιμο καθώς δεν υπάρχει αλγόριθμος (ΤΜ δηλαδή) που να μας επιστρέφει και τις θετικές αλλά και τις αρνητικές απαντήσεις<sup>1</sup>. Η γλώσσα αυτή όπως θα δούμε θα ανοίξει τον ασκό του Αιόλου όσον αφορά τα μη-επιλύσιμα προβλήματα.

**Θεώρημα 5.2.1.**  $HP \in RE \setminus REC$ .

*Απόδειξη.* Η  $HP$  ανήκει στο  $RE$  καθώς η ΤΜ  $M_{HP}$  που φαίνεται στο Σχήμα 5.2.1 την ημι-αποφασίζει<sup>2</sup>. Έστω (προς άτοπο) ότι  $HP \in REC$  και ότι η ΤΜ  $H$  την αποφασίζει. Θεωρούμε την ΤΜ  $D$  του Σχήματος 5.2.2 και παρατηρούμε ότι:

$$D(\langle D \rangle) \downarrow \Leftrightarrow H(\langle D, \langle D \rangle \rangle) \downarrow_{q_{\text{όχι}}} \Leftrightarrow \langle D, \langle D \rangle \rangle \notin HP \Leftrightarrow D(\langle D \rangle) \uparrow$$

Άτοπο, άρα  $HP \notin REC$ . □

**Παρατήρηση 5.2.2.** Η απόδειξη του Θεωρήματος 5.2.1 αποτελεί παράδειγμα του *διαγώνιου επιχειρήματος του Cantor*<sup>3</sup>. Ας θεωρήσουμε την αρίθμηση των ΤΜ σύμφωνα με τον

<sup>1</sup> Υπάρχει αλγόριθμος που επιστρέφει τις θετικές απαντήσεις αλλά όχι (όλες) τις αρνητικές. Συνεπώς έχουμε έναν αλγόριθμο που δεν μπορεί να επιστρέψει πάντα απάντηση και, ως εκ τούτου, δεν επιλύει το πρόβλημα.

<sup>2</sup> Σύμφωνα με τη Σύμβαση 1.4.17 η καθολική ΤΜ για εισόδους που δεν αποτελούν κωδικοποίηση ΤΜ και λέξης απορρίπτει την είσοδό της. Επομένως οι μόνες «ενδιαφέρουσες» εισοδοί για την  $M_{HP}$  είναι οι λέξεις που αποτελούν κωδικοποίηση ΤΜ και λέξης. Συνεπώς, αντί να προσθέσουμε στην περιγραφή της  $M_{HP}$  έναν έλεγχο για το αν η είσοδος αποτελεί κωδικοποίηση ΤΜ και λέξης, θα περιγράψουμε τη λειτουργία της μόνο για εισόδους αυτής της μορφής. Αυτήν την πρακτική θα την εφαρμόσουμε πολλές φορές στη συνέχεια (ακόμα και όταν περιγράφουμε ΤΜ που δεν χρησιμοποιούν την καθολική ΤΜ, δες για παράδειγμα την ΤΜ του Σχήματος 5.2.2).

<sup>3</sup> Έχουμε εφαρμόσει ήδη δύο φορές αυτό το επιχείρημα, στις αποδείξεις των Θεωρημάτων 0.1.17 και 4.2.11.

αριθμό Gödel τους και ας δούμε τον πίνακα που περιέχει τις τιμές της συνάρτησης  $\phi_k$ , που υπολογίζει η TM με αριθμό Gödel  $k$ , με είσοδο τις κωδικοποιήσεις των TM (δες τους Ορισμούς 1.2.13 και 1.4.11 καθώς και τη Σύμβαση 1.2.15):

|          | $\langle M_1 \rangle$         | $\langle M_2 \rangle$         | $\langle M_3 \rangle$         | ...      | $\langle M_k \rangle$         | ...      |
|----------|-------------------------------|-------------------------------|-------------------------------|----------|-------------------------------|----------|
| $\phi_1$ | $\phi_1(\langle M_1 \rangle)$ | $\phi_1(\langle M_2 \rangle)$ | $\phi_1(\langle M_3 \rangle)$ | ...      | $\phi_1(\langle M_k \rangle)$ | ...      |
| $\phi_2$ | $\phi_2(\langle M_1 \rangle)$ | $\phi_2(\langle M_2 \rangle)$ | $\phi_2(\langle M_3 \rangle)$ | ...      | $\phi_2(\langle M_k \rangle)$ | ...      |
| $\phi_3$ | $\phi_3(\langle M_1 \rangle)$ | $\phi_3(\langle M_2 \rangle)$ | $\phi_3(\langle M_3 \rangle)$ | ...      | $\phi_3(\langle M_k \rangle)$ | ...      |
| $\vdots$ | $\vdots$                      | $\vdots$                      | $\vdots$                      | $\vdots$ | $\vdots$                      | ...      |
| $\phi_k$ | $\phi_k(\langle M_1 \rangle)$ | $\phi_k(\langle M_2 \rangle)$ | $\phi_k(\langle M_3 \rangle)$ | ...      | $\phi_k(\langle M_k \rangle)$ | ...      |
| $\vdots$ | $\vdots$                      | $\vdots$                      | $\vdots$                      | $\vdots$ | $\vdots$                      | $\ddots$ |

Φυσικά κάποιες τιμές σε αυτόν τον πίνακα δεν θα ορίζονται (θα έχουν τιμή  $\perp$  δηλαδή).

Η (υποτιθέμενη) ύπαρξη της TM  $H$  (που αποφασίζει την  $HP$ ) μας οδηγεί στην (υποτιθέμενη) ύπαρξη της TM  $D$ , η οποία προφανώς οφείλει να εμφανίζεται στον πίνακα, ας πούμε στη θέση  $d$  (δηλαδή  $\text{Gödel}(D) = d$ , ή αλλιώς η  $D$  ταυτίζεται με την  $M_d$ ). Όμως η συνάρτηση που υπολογίζει η  $D$  «αντιστρέφει» (υπο μία έννοια) την τιμή της διαγωνίου του πίνακα, καθώς:

$$\begin{aligned} \phi_d(\langle M_k \rangle) &\neq \perp, & \text{αν } \phi_k(\langle M_k \rangle) &= \perp \\ \phi_d(\langle M_k \rangle) &= \perp, & \text{αν } \phi_k(\langle M_k \rangle) &\neq \perp \end{aligned}$$

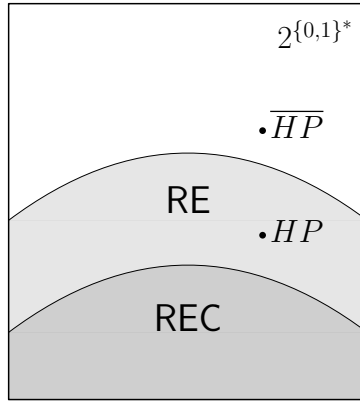
Αναπόφευκτα θα οδηγηθούμε σε άτοπο όταν εξετάσουμε την τιμή  $\phi_d(\langle M_d \rangle)$ .

Στοχαζόμενοι πάνω στο συμπέρασμα του Θεωρήματος 5.2.1 μπορούμε να φέρουμε στο μυαλό μας το ακόλουθο καθημερινό σενάριο:

*Έχουμε γράψει τον κώδικα ενός προγράμματος (στη γλώσσα προγραμματισμού που προτιμούμε) και τον τρέχουμε στον υπολογιστή μας δίνοντας του κάποια είσοδο. Καθώς ο υπολογισμός αργεί να τερματίσει αρχίζουμε να αναρωτιόμαστε αν θα τερματίσει τελικά ή όχι...*

Παρόλο που τις περισσότερες φορές, όταν έχουμε να κάνουμε με απλά προγράμματα, μπορούμε με διάφορες ευρετικές μεθόδους να διαπιστώσουμε αν θα τερματίσουν για μία δεδομένη είσοδο, γενικά το μόνο που μπορούμε να κάνουμε είναι απλά να περιμένουμε να δούμε τελικά τι θα γίνει. Αυτό το συμπέρασμα προκύπτει από το Θεώρημα 5.2.1 καθώς μας αποδεικνύει ότι δεν υπάρχει αλγόριθμος που να αποφασίζει (γενικά) αν ένα πρόγραμμα θα τερματίσει για δεδομένη είσοδο.

**Πόρισμα 5.2.3.**  $\overline{HP} \notin \text{RE}$ .



Σχήμα 5.2.3: Η σχέση εγκλεισμού μεταξύ REC και RE.

Πράγματι, αν υποθέσουμε (προς άτοπο) ότι  $\overline{HP} \in \text{RE}$ , θα είχαμε ότι  $HP, \overline{HP} \in \text{RE}$ , άρα από το Θεώρημα 1.5.4 θα έπρεπε να ίσχυε ότι  $HP \in \text{REC}$  που αντιβαίνει στο Θεώρημα 5.2.1.

Πλέον είμαστε σε θέση να εμπλουτίσουμε το Σχήμα 1.2.13 προσθέτοντας σε αυτό τις γλώσσες  $HP$  και  $\overline{HP}$  (Σχήμα 5.2.3). Το παρακάτω πόρισμα προκύπτει άμεσα από την Πρόταση 1.2.39.

**Πόρισμα 5.2.4.** Η χαρακτηριστική συνάρτηση της γλώσσας  $HP$  δεν είναι υπολογίσιμη.

Η  $\chi_{HP}$  είναι η πρώτη συνάρτηση που αποδεδειγμένα δεν είναι υπολογίσιμη. Μέχρι τώρα γνωρίζαμε ότι υπάρχουν μη-υπολογίσιμες συναρτήσεις αλλά δεν είχαμε στα χέρια μας κάποιο παράδειγμα (η απόδειξη δεν ήταν κατασκευαστική) <sup>1</sup>.

## 5.2.2 Απεικονιστικές Αναγωγές

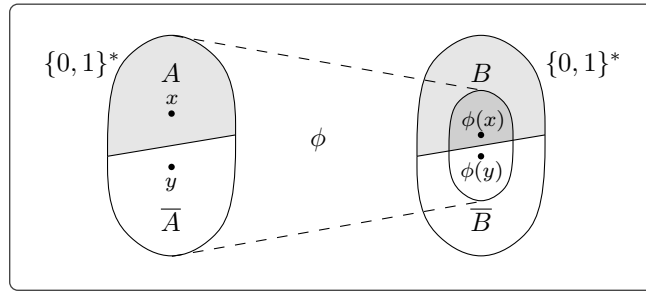
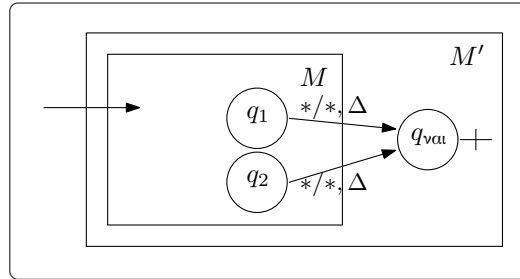
Σε αυτήν την παράγραφο θα παρουσιάσουμε τη μεθοδολογία που θα ακολουθούμε για να αποδεικνύουμε ότι μία γλώσσα δεν είναι αναδρομική (ή αναδρομικά απαριθμήσιμη). Θα μπορούσαμε φυσικά κάθε φορά να επαναλαμβάναμε την απόδειξη του Θεωρήματος 5.2.1, αυτό όμως (όπως πιθανώς να παρατηρήσατε) θα ήταν κάπως κουραστικό. Αντ' αυτού θα μιμηθούμε (πιο οργανωμένα) την απόδειξη του Θεωρήματος 5.1.7 (τόρα πια που έχουμε στη φαρέτρα μας και μία γλώσσα στο σύνολο  $\text{RE} \setminus \text{REC}$ ).

**Ορισμός 5.2.5.** Έστω γλώσσες  $A, B \subseteq \{0, 1\}^*$ . Η  $A$  ανάγεται (απεικονιστικά) στη  $B$ , συμβολισμός  $A \leq_m B$ , αν υπάρχει συνάρτηση  $\phi : \{0, 1\}^* \rightarrow \{0, 1\}^*$ , τέτοια ώστε:

1. Η  $\phi$  είναι πλήρης και υπολογίσιμη.
2.  $\forall w \in \{0, 1\}^* (w \in A \leftrightarrow \phi(w) \in B)$

Η συνάρτηση  $\phi$  καλείται (απεικονιστική ή many-one) αναγωγή της  $A$  στη  $B$  (Σχήμα 5.2.4).

<sup>1</sup> Ενδεχομένως να προκαλεί εντύπωση το γεγονός ότι η πρώτη μη-υπολογίσιμη συνάρτηση που συναντάμε δεν είναι κάποια «περίεργη» μερική συνάρτηση. Είναι μία ολική συνάρτηση και μάλιστα αφορά ένα πολύ στοιχειώδες ερώτημα αναφορικά με τις ΤΜ.

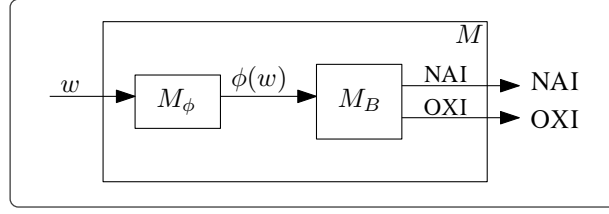

 Σχήμα 5.2.4: Η  $\phi$  είναι αναγωγή της  $A$  στην  $B$ .

 Σχήμα 5.2.5: Η ΤΜ  $M'$  στην αναγωγή της  $HP$  στην  $L_{\text{Αποδοχής}}$ .

**Παράδειγμα 5.2.6.** Θεωρούμε τη γλώσσα  $L_{\text{Αποδοχής}} = \{\langle M, w \rangle \in \{0, 1\}^* \mid M(w) \downarrow_{q_{\text{vai}}}\}$ . Θα ορίσουμε μία συνάρτηση  $\phi : \{0, 1\}^* \rightarrow \{0, 1\}^*$  ως εξής:

- Για τα  $x \in \{0, 1\}^*$  για τα οποία υπάρχει ΤΜ  $M$  και  $w \in \{0, 1\}^*$  τέτοιες ώστε  $x = \langle M, w \rangle$ ,  $\phi(x) = \langle M', w \rangle$  όπου  $M'$  είναι η ΤΜ του Σχήματος 5.2.5 που:
  - α) περιέχει την  $M$  σαν υπορουτίνα, έχοντας όμως «αποχαρακτηρίσει» τις τερματικές καταστάσεις της, οι οποίες πλέον είναι οι (απλές) καταστάσεις  $q_1, q_2$  και
  - β) μεταβαίνει στην  $q_{\text{vai}}$  (μόνο) μέσω των καταστάσεων  $q_1, q_2$  όποιο σύμβολο και να διαβάσει.
- Σε διαφορετική περίπτωση  $\phi(x) = x$ .

Παρατηρούμε ότι η  $\phi$  είναι αναγωγή της  $HP$  στην  $L_{\text{Αποδοχής}}$ , καθώς:

1. Η  $\phi$  είναι πλήρης και υπολογίσιμη.
2. -  $x \in HP \Rightarrow \exists \text{ ΤΜ } M \exists w \in \{0, 1\}^* (x = \langle M, w \rangle \wedge \langle M, w \rangle \in HP) \Rightarrow M(w) \downarrow \Rightarrow M(w) \downarrow_{q_{\text{vai}}} \text{ ή } M(w) \downarrow_{q_{\text{όχι}}} \Rightarrow M'(w) \downarrow_{q_1} \text{ ή } M'(w) \downarrow_{q_2} \Rightarrow M'(w) \downarrow_{q_{\text{vai}}} \Rightarrow \phi(\langle M, w \rangle) \in L_{\text{Αποδοχής}}$
- $x \notin HP \Rightarrow \text{Είτε } \neg(\exists \text{ ΤΜ } M \exists w \in \{0, 1\}^* (x = \langle M, w \rangle))$ , είτε  $\exists \text{ ΤΜ } M \exists w \in \{0, 1\}^* (x = \langle M, w \rangle \wedge \langle M, w \rangle \notin HP)$ :



Σχήμα 5.2.6: Η ΤΜ στην απόδειξη του Θεωρήματος 5.2.7.

- α. Στην πρώτη περίπτωση  $\phi(x) = x$  και προφανώς  $x \notin L_{\text{Αποδοχής}}$ .  
 β. Στην δεύτερη περίπτωση  $\langle M, w \rangle \notin HP \Rightarrow M(w) \uparrow \Rightarrow M'(w) \uparrow \Rightarrow \phi(\langle M, w \rangle) \notin L_{\text{Αποδοχής}}$ .

Συνεπώς  $HP \leq_m L_{\text{Αποδοχής}}$ .

**Θεώρημα 5.2.7.** Έστω  $A, B \subseteq \{0, 1\}^*$ . Αν  $A \leq_m B$  και  $B \in \text{REC}$  ( $B \in \text{RE}$ ) τότε  $A \in \text{REC}$  ( $A \in \text{RE}$  αντίστοιχα).

*Απόδειξη.* Έστω  $\phi$  η αναγωγή της  $A$  στη  $B$ , έστω  $M_\phi$  η ΤΜ που την υπολογίζει και  $M_B$  η ΤΜ που αποφασίζει (ημι-αποφασίζει) τη  $B$ . Η ΤΜ του Σχήματος 5.2.6 αποφασίζει (ημι-αποφασίζει) την  $A$  καθώς<sup>1</sup>:

- $w \in A \Leftrightarrow \phi(w) \in B \Leftrightarrow M_B(\phi(w)) \downarrow_{q_{\text{ναί}}} \Leftrightarrow M(w) \downarrow_{q_{\text{ναί}}}$
- $w \notin A \Leftrightarrow \phi(w) \notin B \Leftrightarrow M_B(\phi(w)) \downarrow_{q_{\text{όχι}}} \Leftrightarrow M(w) \downarrow_{q_{\text{όχι}}}$

Συνεπώς,  $A \in \text{REC}$  ( $A \in \text{RE}$ ). □

Για τους δικούς μας σκοπούς θα χρησιμοποιούμε κατά κύριο λόγο το ακόλουθο (άμεσο) πόρισμα του Θεωρήματος 5.2.7.

**Πόρισμα 5.2.8.** Έστω  $A, B \subseteq \{0, 1\}^*$ . Αν  $A \leq_m B$  και  $A \notin \text{REC}$  ( $A \notin \text{RE}$ ) τότε  $B \notin \text{REC}$  ( $B \notin \text{RE}$  αντίστοιχα).

**Παράδειγμα 5.2.9.** Στο Παράδειγμα 5.2.6 είδαμε ότι  $HP \leq_m L_{\text{Αποδοχής}}$ , επομένως, αφού  $HP \notin \text{REC}$  έπεται ότι  $L_{\text{Αποδοχής}} \notin \text{REC}$ .

**Σημείωση 5.2.10.** Αν για τις γλώσσες  $A, B \subseteq \{0, 1\}^*$  ισχύει ότι  $A \leq_m B$ , διαισθητικά η  $B$  αντιστοιχεί σε πιο «δύσκολο πρόβλημα» από την  $A$ , καθώς αν υπάρχει αλγόριθμος που «λύνει» τη  $B$  τότε υπάρχει και αλγόριθμος που «λύνει» την  $A$ . Αυτή η «διαίσθηση» θα γίνει μαθηματική απόδειξη στο Κεφάλαιο 8.

**Σύμβαση 5.2.11.** Προκειμένου να στρέψουμε την προσοχή του αναγνώστη στην ουσία μίας συνάρτησης αναγωγής  $\phi$  θα την παρουσιάζουμε αναλυτικά μόνο για τις εισόδους που έχουν «ενδιαφέρον» για εμάς (για τις υπόλοιπες ναι μεν θα ορίζουμε τη  $\phi$  αλλά δεν θα ελέγχουμε αν πληρούνται η δεύτερη προϋπόθεση του Ορισμού 5.2.5, καθώς αυτό θα συμβαίνει τετριμμένα).

<sup>1</sup> Η δεύτερη παύλα είναι που διαφοροποιεί τις περιπτώσεις του REC και του RE.

### Παραδείγματα μη-αναδρομικών γλωσσών

Στη συνέχεια θα δούμε μερικά ακόμα παραδείγματα γλωσσών που δεν είναι αναδρομικές (ή και αναδρομικά απαριθμήσιμες). Τα παραδείγματα αυτά θα μας αποκαλύψουν μερικά προβλήματα που είναι πέραν των «δυνατοτήτων» των ΤΜ και κατ' επέκταση (λόγω της Θέσης Church-Turing) αλγοριθμικά μη-επιλύσιμα.

**Παράδειγμα 5.2.12.** Θεωρούμε τη γλώσσα  $L = \{\langle M, w, q \rangle \in \{0, 1\}^* \mid \text{Η } M(w) \text{ μεταβαίνει στην κατάσταση } q\}$ . Η συνάρτηση  $\phi : \{0, 1\}^* \rightarrow \{0, 1\}^*$  με:

$$\phi(x) = \begin{cases} \langle M, w, q_{\text{ναι}} \rangle & , \text{ αν υπάρχει ΤΜ } M \text{ και } w \in \{0, 1\}^* \text{ τέτοια ώστε } x = \langle M, w \rangle \\ \langle M_{\uparrow}, w, q_{\text{ναι}} \rangle & , \text{ αλλιώς} \end{cases}$$

όπου  $M_{\uparrow}$  μία ΤΜ που δεν τερματίζει ποτέ, είναι αναγωγή της  $L_{\text{Αποδοχής}}$  στην  $L$  καθώς:

1.  $\phi$  πλήρης και υπολογίσιμη.
2. -  $\langle M, w \rangle \in L_{\text{Αποδοχής}} \Rightarrow M(w) \downarrow_{q_{\text{ναι}}} \Rightarrow \langle M, w, q_{\text{ναι}} \rangle \in L$   
 -  $\langle M, w \rangle \notin L_{\text{Αποδοχής}} \Rightarrow M(w) \uparrow \text{ ή } M(w) \downarrow_{q_{\text{όχι}}} \Rightarrow M(w) \not\downarrow_{q_{\text{ναι}}} \Rightarrow \langle M, w, q_{\text{ναι}} \rangle \notin L$

Αφού  $L_{\text{Αποδοχής}} \notin \text{REC}$  έπεται ότι  $L \notin \text{REC}$ .

**Σημείωση 5.2.13.** Από το Παράδειγμα 5.2.12 συμπεραίνουμε ότι (πέραν ειδικών περιπτώσεων) δεν μπορούμε να γνωρίζουμε αν μία ΤΜ περνάει από κάποια συγκεκριμένη κατάσταση κατά τον υπολογισμό της με είσοδο μία (τυχούσα) λέξη  $w$ <sup>1</sup>.

**Παράδειγμα 5.2.14.** Θεωρούμε τη γλώσσα  $L_{\epsilon} = \{\langle M \rangle \in \{0, 1\}^* \mid M(\epsilon) \downarrow_{q_{\text{ναι}}}\}$ . Η συνάρτηση  $\phi : \{0, 1\}^* \rightarrow \{0, 1\}^*$  με:

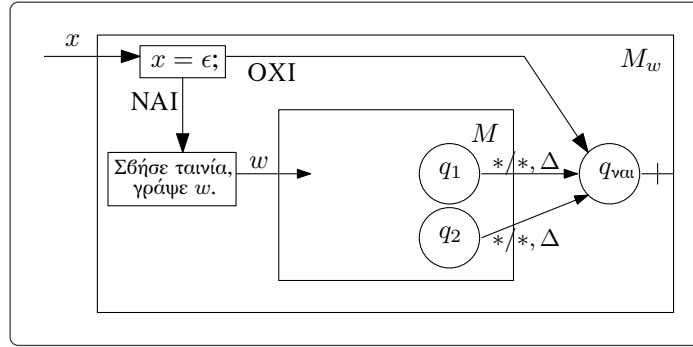
$$\phi(x) = \begin{cases} \langle M_w \rangle & , \text{ αν υπάρχει ΤΜ } M \text{ και } w \in \{0, 1\}^* \text{ τέτοια ώστε } x = \langle M, w \rangle \\ \langle M_{\uparrow} \rangle & , \text{ αλλιώς} \end{cases}$$

όπου  $M_w$  η ΤΜ στο Σχήμα 5.2.7 (οι  $q_1, q_2$  έχουν αντικαταστήσει τις  $q_{\text{ναι}}, q_{\text{όχι}}$  της  $M$ ) και  $M_{\uparrow}$  μία ΤΜ που δεν τερματίζει ποτέ, είναι αναγωγή της  $HP$  στην  $L_{\epsilon}$  καθώς:

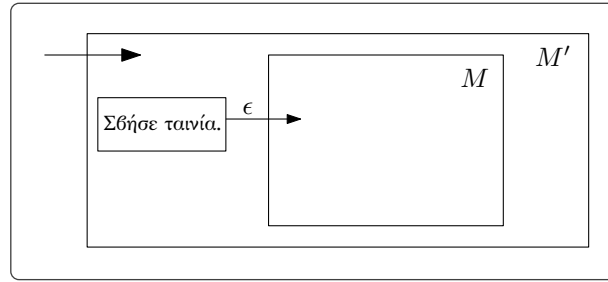
1.  $\phi$  πλήρης και υπολογίσιμη.
2. -  $\langle M, w \rangle \in HP \Rightarrow M(w) \downarrow \Rightarrow M_w(\epsilon) \downarrow_{q_{\text{ναι}}} \Rightarrow \langle M_w \rangle \in L_{\epsilon}$   
 -  $\langle M, w \rangle \notin HP \Rightarrow M(w) \uparrow \Rightarrow M_w(\epsilon) \uparrow \Rightarrow \langle M_w \rangle \notin L_{\epsilon}$

Αφού  $HP \notin \text{REC}$  έπεται ότι  $L_{\epsilon} \notin \text{REC}$ .

<sup>1</sup> Σε αντίθετη περίπτωση (όπως φαίνεται από τη συνάρτηση αναγωγής) θα μπορούσαμε να ξέρουμε αν θα περάσει και από την  $q_{\text{ναι}}$ , πράγμα που θα καθιστούσε την  $L_{\text{Αποδοχής}}$  αναδρομική γλώσσα.



Σχήμα 5.2.7: Η TM  $M_w$  στην αναγωγή της HP στην  $L_\epsilon$ .



Σχήμα 5.2.8: Η TM  $M'$  στην αναγωγή της  $L_\epsilon$  στην  $L_\infty$ .

**Παράδειγμα 5.2.15.** Θεωρούμε τη γλώσσα  $L_\infty = \{\langle M \rangle \in \{0,1\}^* \mid |L(M)| = \aleph_0\}$ . Η συνάρτηση  $\phi : \{0,1\}^* \rightarrow \{0,1\}^*$  με:

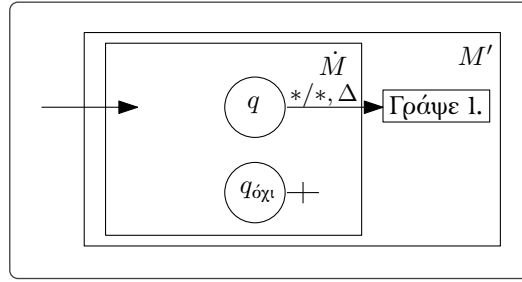
$$\phi(x) = \begin{cases} \langle M' \rangle & , \text{αν υπάρχει TM } M \text{ τέτοια ώστε } x = \langle M \rangle \\ x & , \text{αλλιώς} \end{cases}$$

όπου  $M'$  η TM στο Σχήμα 5.2.8, είναι αναγωγή της  $L_\epsilon$  στην  $L_\infty$  καθώς:

1.  $\phi$  πλήρης και υπολογίσιμη.
2. -  $\langle M \rangle \in L_\epsilon \Rightarrow M(\epsilon) \downarrow_{q_{\text{vai}}} \Rightarrow \forall w \in \{0,1\}^* (M'(w) \downarrow_{q_{\text{vai}}}) \Rightarrow L(M') = \{0,1\}^* \Rightarrow |L(M')| = \aleph_0 \Rightarrow \langle M' \rangle \in L_\infty$   
 -  $\langle M \rangle \notin L_\epsilon \Rightarrow M(\epsilon) \not\downarrow_{q_{\text{vai}}} \Rightarrow \forall w \in \{0,1\}^* (M'(w) \not\downarrow_{q_{\text{vai}}}) \Rightarrow L(M') = \emptyset \Rightarrow |L(M')| = 0 \Rightarrow \langle M' \rangle \notin L_\infty$

Αφού  $L_\epsilon \notin \text{REC}$  έπεται ότι  $L_\infty \notin \text{REC}$ .

**Παρατήρηση 5.2.16.** Η συνάρτηση  $\phi$  του Παραδείγματος 5.2.15 είναι και αναγωγή της  $L_\epsilon$  στη γλώσσα  $L_{\{0,1\}^*} = \{\langle M \rangle \in \{0,1\}^* \mid L(M) = \{0,1\}^*\}$ . Επομένως  $L_{\{0,1\}^*} \notin \text{REC}$ .



**Σχήμα 5.2.9:** Η ΤΜ  $M'$  στην αναγωγή της  $L_{\text{Αποδοχής}}$  στη γλώσσα του Παραδείγματος 5.2.17.

**Παράδειγμα 5.2.17.** Θεωρούμε τη γλώσσα  $L = \{\langle M, w \rangle \in \{0, 1\}^* \mid \text{Η } M(w) \text{ γράφει 1 στην ταινία}\}$ . Η συνάρτηση  $\phi : \{0, 1\}^* \rightarrow \{0, 1\}^*$  με:

$$\phi(x) = \begin{cases} \langle M', \dot{w} \rangle & , \text{ αν υπάρχει ΤΜ } M \text{ και } w \in \{0, 1\}^* \text{ τέτοια ώστε } x = \langle M, w \rangle \\ x & , \text{ αλλιώς} \end{cases}$$

όπου  $M'$  η ΤΜ στο Σχήμα 5.2.9, όπου η  $\dot{M}$  και η  $\dot{w}$  προκύπτουν αν αντικαταστήσουμε στη συνάρτηση μεταβάσεων της  $\langle M \rangle$  και στη  $w$  αντίστοιχα κάθε σύμβολο  $*$   $\in \{0, 1\}^*$  με το σύμβολο  $\dot{*}$ <sup>1</sup> (η  $q$  έχει αντικαταστήσει την  $q_{\text{ναι}}$  της  $\dot{M}$ ). Η  $\phi$  είναι αναγωγή της  $L_{\text{Αποδοχής}}$  στην  $L$  καθώς:

1.  $\phi$  πλήρης και υπολογίσιμη.
2. -  $\langle M, w \rangle \in L_{\text{Αποδοχής}} \Rightarrow M(w) \downarrow_{q_{\text{ναι}}} \Rightarrow M'(\dot{w}) \downarrow_q \Rightarrow \text{Η } M'(\dot{w}) \text{ θα γράφει 1} \Rightarrow \langle M', \dot{w} \rangle \in L$   
-  $\langle M, w \rangle \notin L_{\text{Αποδοχής}} \Rightarrow M(w) \not\downarrow_{q_{\text{ναι}}} \Rightarrow \text{Η } M'(\dot{w}) \text{ δεν θα επισκεφτεί την } q \Rightarrow \text{Η } M'(\dot{w}) \text{ δεν θα γράφει 1} \Rightarrow \langle M', \dot{w} \rangle \notin L$

Αφού  $L_{\text{Αποδοχής}} \notin \text{REC}$  έπεται ότι  $L \notin \text{REC}$ .

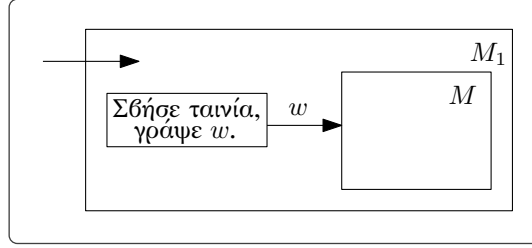
**Παράδειγμα 5.2.18.** Θεωρούμε τη γλώσσα  $L_{\equiv} = \{\langle M_1, M_2 \rangle \in \{0, 1\}^* \mid L(M_1) = L(M_2)\}$ . Η συνάρτηση  $\phi : \{0, 1\}^* \rightarrow \{0, 1\}^*$  με:

$$\phi(x) = \begin{cases} \langle M_1, M_{\text{ναι}} \rangle & , \text{ αν υπάρχει ΤΜ } M \text{ και } w \in \{0, 1\}^* \text{ τέτοια ώστε } x = \langle M, w \rangle \\ \langle M_{\uparrow}, M_{\text{ναι}} \rangle & , \text{ αλλιώς} \end{cases}$$

όπου  $M_1$  η ΤΜ στο Σχήμα 5.2.10,  $M_{\uparrow}$  μία ΤΜ που δεν τερματίζει ποτέ και  $M_{\text{ναι}}$  μία ΤΜ που αποδέχεται κάθε λέξη. Η  $\phi$  είναι αναγωγή της  $L_{\text{Αποδοχής}}$  στην  $L_{\equiv}$  καθώς:

1.  $\phi$  πλήρης και υπολογίσιμη.
2. -  $\langle M, w \rangle \in L_{\text{Αποδοχής}} \Rightarrow M(w) \downarrow_{q_{\text{ναι}}} \Rightarrow \forall x \in \{0, 1\}^* (M_1(x) \downarrow_{q_{\text{ναι}}}) \Rightarrow L(M_1) = \{0, 1\}^* = L(M_{\text{ναι}}) \Rightarrow \langle M_1, M_{\text{ναι}} \rangle \in L_{\equiv}$

<sup>1</sup> Τα σύμβολα  $\dot{0}$  και  $\dot{1}$  αποτελούν σύμβολα του αλφαριθμητικού ταινίας της ΤΜ  $M'$  και θεωρούμε ότι δεν υπάρχουν στο αλφάριθμητικό ταινίας της  $M$ . Επίσης θεωρούμε ότι η  $\langle M', \dot{w} \rangle$  είναι κωδικοποιημένη στο  $\{0, 1\}$ .



**Σχήμα 5.2.10:** Η ΤΜ  $M_1$  στην αναγωγή της  $L_{\text{Αποδοχής}}$  στην  $L_{\equiv}$ .

$$- \langle M, w \rangle \notin L_{\text{Αποδοχής}} \Rightarrow M(w) \not\downarrow_{q_{\text{vai}}} \Rightarrow \forall x \in \{0, 1\}^* (M_1(x) \not\downarrow_{q_{\text{vai}}}) \Rightarrow L(M_1) = \emptyset \neq L(M_{\text{vai}}) \Rightarrow \langle M_1, M_{\text{vai}} \rangle \notin L_{\equiv}$$

Αφού  $L_{\text{Αποδοχής}} \notin \text{REC}$  έπεται ότι  $L_{\equiv} \notin \text{REC}$ .

**Σημείωση 5.2.19.** Από το Παράδειγμα 5.2.18 συμπεραίνουμε ότι, παρόλο που γνωρίζουμε ότι υπάρχουν (αριθμησίμως) άπειρες ΤΜ που αναγνωρίζουν την ίδια γλώσσα, αν μας δοθούν δύο ΤΜ δεν μπορούμε να αποφανθούμε αν όντως ισχύει αυτό <sup>1</sup>.

**Παράδειγμα 5.2.20.** Θεωρούμε τη γλώσσα  $L_{\emptyset} = \{\langle M \rangle \in \{0, 1\}^* \mid L(M) = \emptyset\}$ . Η συνάρτηση  $\phi : \{0, 1\}^* \rightarrow \{0, 1\}^*$  με:

$$\phi(x) = \begin{cases} \langle M_w \rangle & , \text{ αν υπάρχει ΤΜ } M \text{ και } w \in \{0, 1\}^* \text{ τέτοια ώστε } x = \langle M, w \rangle \\ \langle M_{\uparrow} \rangle & , \text{ αλλιώς} \end{cases}$$

όπου η  $M_w$  απεικονίζεται στο Σχήμα 5.2.11 και η  $M_{\uparrow}$  είναι μία ΤΜ που δεν τερματίζει ποτέ, είναι αναγωγή της  $\bar{L}_{\text{Αποδοχής}}$  στην  $L_{\emptyset}$  καθώς <sup>2</sup>:

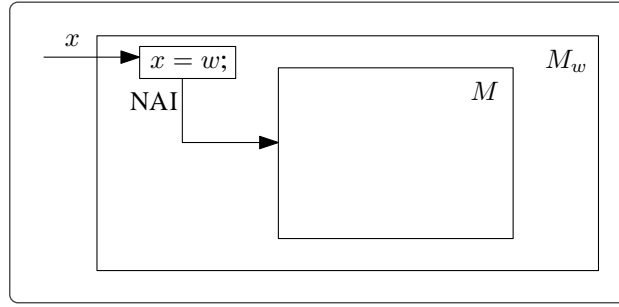
1.  $\phi$  πλήρης και υπολογίσιμη.
2. - Αν  $x \in \bar{L}_{\text{Αποδοχής}}$  τότε υπάρχουν δύο περιπτώσεις:
  - α. Η  $x$  δεν έχει τη μορφή  $\langle M, w \rangle$ . Τότε  $\phi(x) = \langle M_{\uparrow} \rangle \in L_{\emptyset}$ .
  - β. Η  $x$  έχει τη μορφή  $\langle M, w \rangle$  και μάλιστα  $M(w) \not\downarrow_{q_{\text{vai}}}$ . Τότε  $\phi(x) = \langle M_w \rangle$  και  $\forall x \in \{0, 1\}^* (M_w(x) \not\downarrow_{q_{\text{vai}}}) \Rightarrow L(M_w) = \emptyset \Rightarrow \langle M_w \rangle \in L_{\emptyset}$ .
- Αν  $x \notin \bar{L}_{\text{Αποδοχής}}$ , τότε  $x = \langle M, w \rangle$  και μάλιστα  $M(w) \downarrow_{q_{\text{vai}}}$ . Τότε  $\phi(x) = \langle M_w \rangle$  και  $M_w(w) \downarrow_{q_{\text{vai}}} \Rightarrow L(M_w) = \{w\} \Rightarrow \langle M_w \rangle \notin L_{\emptyset}$

Εύκολα μπορούμε να δείξουμε ότι  $L_{\text{Αποδοχής}} \in \text{RE} \setminus \text{REC}$ , οπότε, από το Θεώρημα 1.5.4 έπεται ότι  $\bar{L}_{\text{Αποδοχής}} \notin \text{RE}$ . Συνεπώς  $L_{\emptyset} \notin \text{RE}$ .

Κλείνοντας, θα αποδείξουμε δύο προτάσεις που θα χρησιμοποιήσουμε αργότερα στο Κεφάλαιο 8.

<sup>1</sup> Η γλώσσα  $L_{\equiv}$  δεν είναι ούτε αναδρομικά απαριθμήσιμη. Μπορείτε να δείτε το γιατί (Άσκηση 5.19);

<sup>2</sup> Όταν κάνουμε αναγωγή από το συμπλήρωμα μίας γλώσσας θα πρέπει να είμαστε πιο προσεκτικοί και να ελέγχουμε επιμελώς ότι η δεύτερη ιδιότητα του Ορισμού 5.2.5 πληρούται.



Σχήμα 5.2.II: Η ΤΜ  $M_w$  στην αναγωγή της  $\bar{L}_{\text{Αποδοχής}}$  στην  $L_\emptyset$ .

**Πρόταση 5.2.21.** Η σχέση  $\leq_m$  επί του συνόλου  $2^{\{0,1\}^*}$  είναι μεταβατική σχέση.

*Απόδειξη.* Έστω γλώσσες  $A, B, C \subseteq \{0,1\}^*$  τέτοιες ώστε  $A \leq_m B$  και  $B \leq_m C$ , και έστω  $\phi_1$  η αναγωγή της  $A$  στην  $B$  και  $\phi_2$  η αναγωγή της  $B$  στη  $C$ . Θα δείξουμε ότι η  $\phi_2 \circ \phi_1$  είναι αναγωγή της  $A$  στη  $C$ . Παρατηρούμε ότι:

1. Η  $\phi_2 \circ \phi_1$  είναι (προφανώς) πλήρης και υπολογίσιμη από την Πρόταση 1.2.12.
2.  $w \in A \Leftrightarrow \phi_1(w) \in B \Leftrightarrow \phi_2(\phi_1(w)) \in C$

Συνεπώς,  $A \leq_m C$ . □

**Πρόταση 5.2.22.** Έστω  $A, B \subseteq \{0,1\}^*$ . Αν  $A \leq_m B$  τότε  $\bar{A} \leq_m \bar{B}$ .

*Απόδειξη.* Έστω  $\phi$  η αναγωγή της  $A$  στη  $B$ . Αρκεί να δούμε το Σχήμα 5.2.4 και να παρατηρήσουμε ότι:

$$w \in \bar{A} \Leftrightarrow \phi(w) \in \bar{B}$$

Συνεπώς η  $\phi$  είναι και αναγωγή της  $\bar{A}$  στη  $\bar{B}$ . □

## Ασκήσεις

**5.1 (★☆☆).** Δείξτε ότι  $D = \{\langle P \rangle \in \{0,1\}^* \mid \text{η διοφαντική εξίσωση } P \text{ έχει ακέραιες ρίζες}\} \in \text{RE}$ .

**5.2 (★★☆).** Δείξτε ότι  $D_1 = \{\langle P \rangle \in \{0,1\}^* \mid \text{η διοφαντική εξίσωση } P \text{ μίας μεταβλητής έχει ακέραιες ρίζες}\} \in \text{REC}$ .

**5.3 (☆☆☆).** Έστω  $A, B \subseteq \{0,1\}^*$  και συνάρτηση  $\phi : \{0,1\}^* \rightarrow \{0,1\}^*$ , τέτοια ώστε:

1. Η  $\phi$  είναι υπολογίσιμη.
2.  $A \subseteq \text{dom}(\phi)$

3.  $\forall w \in \{0, 1\}^* (w \in A \leftrightarrow \phi(w) \in B)$

Δείξτε ότι αν  $B \in \text{RE}$  τότε και  $A \in \text{RE}$ .

**5.4 (★☆☆).** Βρείτε παράδειγμα γλωσσών  $A, B \subseteq \{0, 1\}^*$ , με  $B \in \text{REC}$  και  $A \notin \text{REC}$ , και συνάρτησης  $\phi : \{0, 1\}^* \rightarrow \{0, 1\}^*$  που ικανοποιεί τις προϋποθέσεις της Άσκησης 5.3.

**5.5 (★☆☆).** Έστω  $L \in \text{RE} \setminus \text{REC}$  και ΤΜ  $M$  τέτοια ώστε  $L(M) = L$ . Δείξτε ότι το σύνολο  $S_L = \{w \in \{0, 1\}^* \mid M(w) \uparrow\}$  είναι άπειρο.

**5.6 (★☆☆).** Δείξτε ότι  $L_\infty \leq_m L_{\{0, 1\}^*}$ .

**5.7 (★☆☆).** Δείξτε ότι  $L = \{\langle M, w \rangle \in \{0, 1\}^* \mid M(w) \text{ περνάει από όλες τις μη-τερματικές καταστάσεις της } M\} \notin \text{REC}$ .

**5.8 (★☆☆).** Δείξτε ότι  $L = \{\langle M \rangle \in \{0, 1\}^* \mid \forall w \in \{0, 1\}^* (\eta \ M(w) \text{ γράφει κάποτε 1 και αμέσως κινεί την κεφαλή αριστερά})\} \notin \text{REC}$ .

**5.9 (★☆☆).** Δείξτε ότι  $L = \{\langle M \rangle \in \{0, 1\}^* \mid \forall w \in \{0, 1\}^* (\eta \ M(w) \text{ αποδέχεται μετά από άρτιο πλήθος βημάτων})\} \notin \text{REC}$ .

**5.10 (★★☆).** Δείξτε ότι  $L = \{\langle M_1, M_2 \rangle \in \{0, 1\}^* \mid \text{Υπάρχει λέξη } w \in \{0, 1\}^* \text{ τέτοια ώστε } M_1(w) \downarrow_{q_{\text{vau}}}^m \wedge M_2(w) \downarrow_{q_{\text{vau}}}^n \text{ με } n \neq m\} \notin \text{REC}$ .

**5.11 (★☆☆).** Δείξτε ότι  $L = \{\langle M_1, M_2, w \rangle \in \{0, 1\}^* \mid \text{Υπάρχει } t \in \mathbb{N} \text{ και } a \in \{0, 1\} \text{ τέτοια ώστε οι } M_1 \text{ και } M_2 \text{ στο } t\text{-οστό βήμα της λειτουργίας τους με είσοδο την } w \text{ γράφουν } a\} \notin \text{REC}$ .

**5.12 (★★☆).** Δείξτε ότι για κάθε  $L \in \text{RE}$  ισχύει ότι  $L \leq_m \{\langle M \rangle \in \{0, 1\}^* \mid M(\langle M \rangle) \downarrow\}$ .

**5.13 (★☆☆).** Δείξτε ότι  $L \in \text{REC}$  ανν  $L \leq_m 0^*1^*$ .

**5.14 (★☆☆).** Δείξτε ότι αν  $L_1, L_2 \in \text{REC} \setminus \{\emptyset, \{0, 1\}^*\}$  τότε  $L_1 \leq_m L_2$ .

**5.15 (★★☆).** Έστω  $K$  και  $R$  τα σύνολα της Άσκησης 1.21. Ισχύει ότι  $R \cup K \in \text{RE}$ ;

**5.16 (☆☆☆).** Εξετάστε αν η γλώσσα  $L = \{\langle M, w \rangle \in \{0, 1\}^* \mid \exists \text{ ΤΜ } M' (w \notin L(M) \cap L(M'))\}$  είναι αναδρομική.

**5.17 (★☆☆).** Εξετάστε αν η γλώσσα  $L = \{\langle M_1, M_2, M_3 \rangle \in \{0, 1\}^* \mid L(M_1) = L(M_2) \cup L(M_3)\}$  είναι αναδρομικά απαριθμήσιμη.

**5.18 (★☆☆).** Δείξτε ότι  $L = \{\langle M_1, M_2 \rangle \in \{0, 1\}^* \mid \epsilon \in L(M_1) \cap L(M_2)\} \in \text{RE} \setminus \text{REC}$ .

**5.19 (☆☆☆).** Δείξτε ότι  $L_{\equiv} = \{\langle M_1, M_2 \rangle \in \{0, 1\}^* \mid L(M_1) = L(M_2)\} \notin \text{RE}$ .

## ΚΕΦΑΛΑΙΟ 6

### ΤΟ ΘΕΩΡΗΜΑ ΤΟΥ RICE

Θα ξεκινήσουμε αυτό το κεφάλαιο με τον ίδιο τρόπο που τελειώσαμε το προηγούμενο, με μια αναγωγή. Ας δείξουμε ξανά ότι η γλώσσα  $L_\epsilon$  του Παραδείγματος 5.2.14 δεν ανήκει στο REC, δείχνοντας αυτήν τη φορά ότι  $L_{\text{Αποδοχής}} \leq_m L_\epsilon$ .

**Παράδειγμα 6.0.1.** Θεωρήστε TM  $M_\epsilon$  που αποδέχεται τη λέξη  $\epsilon$  (ή αλλιώς, αναγνωρίζει την  $L_\epsilon$ ). Η συνάρτηση  $\phi : \{0, 1\}^* \rightarrow \{0, 1\}^*$  με:

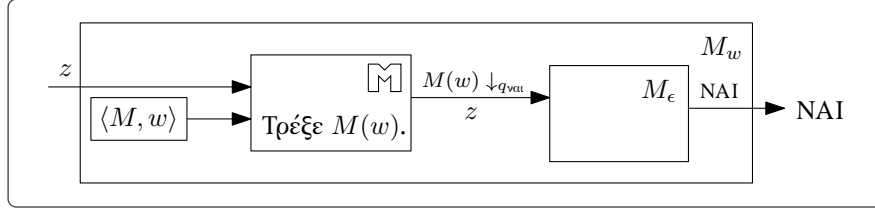
$$\phi(x) = \begin{cases} \langle M_w \rangle & , \text{ αν υπάρχει TM } M \text{ και } w \in \{0, 1\}^* \text{ τέτοια ώστε } x = \langle M, w \rangle \\ \langle M_\uparrow \rangle & , \text{ αλλιώς} \end{cases}$$

όπου  $M_w$  η TM στο Σχήμα 6.0.1 και  $M_\uparrow$  μία TM που δεν τερματίζει ποτέ, είναι αναγωγή της  $L_{\text{Αποδοχής}}$  στην  $L_\epsilon$  καθώς:

1.  $\phi$  πλήρης και υπολογίσιμη.
2. -  $\langle M, w \rangle \in L_{\text{Αποδοχής}} \Rightarrow M(w) \downarrow_{q_{\text{ναι}}} \Rightarrow L(M_w) = L(M_\epsilon) \Rightarrow \langle M_w \rangle \in L_\epsilon$   
-  $\langle M, w \rangle \notin L_{\text{Αποδοχής}} \Rightarrow M(w) \not\downarrow_{q_{\text{ναι}}} \Rightarrow L(M_w) = \emptyset \Rightarrow \langle M_w \rangle \notin L_\epsilon$

Η γλώσσα  $L_\epsilon$  ανήκει σε μία ευρεία κλάση γλωσσών που περιέχουν (αποκλειστικά) λέξεις που αντιστοιχούν σε κωδικοποιήσεις TM των οποίων οι γλώσσες που αναγνωρίζουν πληρούν κάποιες «προδιαγραφές» (όπως για παράδειγμα στην  $L_\epsilon$  περιέχει την  $\epsilon$ ). Για όλες αυτές τις γλώσσες μπορούμε να εφαρμόσουμε την ίδια ακριβώς αναγωγή <sup>1</sup>! Δεν θα μπορούσαμε να σκεφτούμε πιο χαρακτηριστικό παράδειγμα, για να περιγράψουμε τη βασική ιδέα αυτής της (μετα-)αναγωγής, από το Παράδειγμα 6.0.1:

<sup>1</sup> Ελέγξτε την ορθότητα αυτού του ισχυρισμού για τις γλώσσες των Παραδειγμάτων 5.2.15, 5.2.20 και της Παρατήρησης 5.2.16. Η μόνη περίπτωση για τις οποίες αυτός ο ισχυρισμός δεν ισχύει περιγράφονται στο Θεώρημα 6.1.1.



**Σχήμα 6.0.1:** Η ΤΜ  $M_w$  στην απόδειξη του Παραδείγματος 6.0.1.

Ορίζουμε συνάρτηση αναγωγής που «στέλνει» μία λέξη  $x$  στην κωδικοποίηση μιας ΤΜ  $M$ , έτσι ώστε:

$$L(M) : \begin{cases} \text{Πληροί τις προδιαγραφές} & , \text{ αν } x \in L_{\text{Αποδοχής}} \\ \text{Δεν πληροί τις προδιαγραφές} & , \text{ αν } x \notin L_{\text{Αποδοχής}} \end{cases}$$

Το γεγονός αυτό παρατηρήθηκε από τον Henry Gordon Rice, ο οποίος απέδειξε το 1951 δύο Θεωρήματα που το καταδεικνύουν (τα Θεώρημα 6.1.1 και 6.2.2). Τα Θεωρήματα αυτά στη βιβλιογραφία συνήθως φέρουν το όνομά του.

Προτού δούμε το πρώτο από τα Θεωρήματα του Rice, θα χρειαστεί να δώσουμε κάποιους ορισμούς.

**Ορισμός 6.0.2.** Ιδιότητα (αναδρομικά απαριθμήσιμων) γλωσσών είναι κάθε σύνολο  $\mathcal{P} \subseteq \text{RE}$ . Θα λέμε ότι η γλώσσα  $L \in \text{RE}$  έχει την ιδιότητα  $\mathcal{P}$  αν  $L \in \mathcal{P}$ .

**Παράδειγμα 6.0.3.** Τα ακόλουθα σύνολα αποτελούν ιδιότητες γλωσσών:

- $\mathcal{P}_\epsilon = \{L \in \text{RE} \mid \epsilon \in L\}$
- $\mathcal{P}_\infty = \{L \in \text{RE} \mid |L| = \aleph_0\}$
- $\mathcal{P}_{\mathbb{N}} = \{L \in \text{RE} \mid |L| \in \mathbb{N}\}$
- $\mathcal{P}_{\{0,1\}^*} = \{\{0,1\}^*\}$
- $\mathcal{P}_\emptyset = \{\emptyset\}$
- $\emptyset$  (η κενή ιδιότητα)
- REC

**Ορισμός 6.0.4.** Έστω ιδιότητα  $\mathcal{P} \subseteq \text{RE}$ . Ορίζουμε τη γλώσσα  $L_{\mathcal{P}}$ , που περιέχει τις κωδικοποιήσεις των ΤΜ που αναγνωρίζουν τις γλώσσες με την ιδιότητα  $\mathcal{P}$ , ως εξής:

$$L_{\mathcal{P}} = \{\langle M \rangle \in \{0,1\}^* \mid L(M) \in \mathcal{P}\}$$

Τα Θεωρήματα του Rice επικεντρώνονται στη γλώσσα  $L_{\mathcal{P}}$  και καθορίζουν τις προδιαγραφές που θα πρέπει να πληροί η ιδιότητα  $\mathcal{P}$  έτσι ώστε η  $L_{\mathcal{P}}$  να είναι αναδρομική ή έστω αναδρομικά απαριθμήσιμη.

## 6.1 Η περίπτωση του REC

Παρατηρήστε ότι και οι τέσσερις γλώσσες που έχουμε εμμέσως παραλληλίσει σε αυτό το κεφάλαιο, οι  $L_\epsilon$ ,  $L_\infty$ ,  $L_{\{0,1\}^*}$  και  $L_\emptyset$ , δεν είναι αναδρομικές. Εξετάζοντας τις ιδιότητες στις οποίες αντιστοιχούν ( $\mathcal{P}_\epsilon$ ,  $\mathcal{P}_\infty$ ,  $\mathcal{P}_{\{0,1\}^*}$  και  $\mathcal{P}_\emptyset$  αντίστοιχα) δεν μπορούμε να βρούμε κάτι κοινό, πέρα φυσικά από το απλό γεγονός ότι περιέχουν τουλάχιστον μία γλώσσα του RE αλλά δεν περιέχουν όλες τις γλώσσες του RE. Τέτοιου είδους ιδιότητες συνήθως τις αποκαλούμε *μη-τετριμμένες*. Το (απλό) Θεώρημα του Rice αποδεικνύει ότι η  $L_{\mathcal{P}}$  είναι αναδρομική αν η ιδιότητα  $\mathcal{P}$  είναι τετριμμένη.

**Θεώρημα 6.1.1 (Rice).** Για κάθε ιδιότητα  $\mathcal{P} \subseteq \text{RE}$  ισχύει ότι:

$$L_{\mathcal{P}} \in \text{REC} \Leftrightarrow \mathcal{P} = \emptyset \vee \mathcal{P} = \text{RE}$$

*Απόδειξη.* ( $\Rightarrow$ ) <sup>1</sup> Έστω ιδιότητα  $\mathcal{P} \subseteq \text{RE}$ , με  $\mathcal{P} \notin \{\emptyset, \text{RE}\}$ . Θεωρούμε, χωρίς βλάβη της γενικότητας, ότι  $\emptyset \notin \mathcal{P}$  <sup>2</sup>. Έστω επίσης γλώσσα  $L \in \mathcal{P}$  και TM  $M_L$  που την ημι-αποφασίζει. Θα δείξουμε ότι  $L_{\text{Αποδοχής}} \leq_m L_{\mathcal{P}}$ . Θεωρούμε  $\phi : \{0,1\}^* \rightarrow \{0,1\}^*$  με:

$$\phi(x) = \begin{cases} \langle M_w \rangle & , \text{ αν υπάρχει TM } M \text{ και } w \in \{0,1\}^* \text{ τέτοια ώστε } x = \langle M, w \rangle \\ \langle M_\dagger \rangle & , \text{ αλλιώς} \end{cases}$$

όπου  $M_w$  η TM του Σχήματος 6.1.1 και  $M_\dagger$  μία TM που δεν τερματίζει ποτέ. Παρατηρούμε ότι:

1.  $\phi$  πλήρης και υπολογίσιμη.
2. -  $x \in L_{\text{Αποδοχής}}$  τότε  $x = \langle M, w \rangle$  με  $\langle M, w \rangle \in L_{\text{Αποδοχής}}$ , οπότε  $\phi(x) = \langle M_w \rangle$  και  $L(M_w) = L(M_L) = L \in \mathcal{P}$  άρα  $\phi(x) \in L_{\mathcal{P}}$ .  
 -  $x \notin L_{\text{Αποδοχής}}$  τότε:
  - α. είτε  $x = \langle M, w \rangle$  με  $\langle M, w \rangle \notin L_{\text{Αποδοχής}}$ , οπότε  $\phi(x) = \langle M_w \rangle$  και  $L(M_w) = \emptyset \notin \mathcal{P}$  (αφού  $M(w) \nmid_{q_{\text{acc}}}$ ), άρα  $\phi(x) \notin L_{\mathcal{P}}$ ,
  - β. είτε  $x \neq \langle M, w \rangle$  οπότε  $\phi(x) = \langle M_\dagger \rangle$  και  $L(M_\dagger) = \emptyset \notin \mathcal{P}$ , άρα  $\phi(x) \notin L_{\mathcal{P}}$ .

Αφού  $L_{\text{Αποδοχής}} \notin \text{REC}$  έπεται ότι  $L_{\mathcal{P}} \notin \text{REC}$ .

( $\Leftarrow$ ) Παρατηρούμε ότι:

$$\text{Αν } \mathcal{P} = \emptyset \text{ τότε } L_{\mathcal{P}} = \{\langle M \rangle \in \{0,1\}^* \mid L(M) \in \emptyset\} = \emptyset \in \text{REC}$$

και

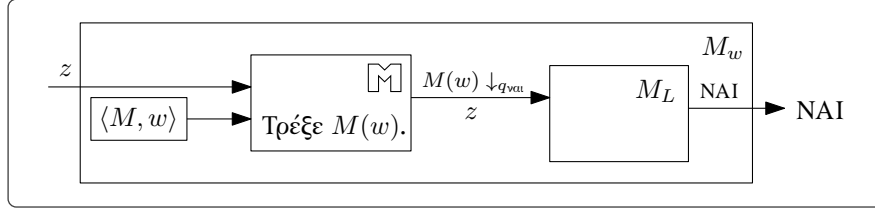
$$\text{Αν } \mathcal{P} = \text{RE} \text{ τότε } L_{\mathcal{P}} = \{\langle M \rangle \in \{0,1\}^* \mid L(M) \in \text{RE}\} = \mathcal{G} \in \text{REC}^3$$

□

<sup>1</sup> Θα δείξουμε την αντιθετοαντιστροφή του.

<sup>2</sup> Αλλιώς θα πάρουμε την  $\overline{\mathcal{P}} = \text{RE} \setminus \mathcal{P}$  για την οποία επίσης ισχύει ότι  $\overline{\mathcal{P}} \notin \{\emptyset, \text{RE}\}$ . Ολοκληρώνοντας την απόδειξη θα έχουμε δείξει ότι  $L_{\overline{\mathcal{P}}} \notin \text{REC}$ . Για να συνάγουμε το ζητούμενο αρκεί να παρατηρήσουμε ότι  $L_{\mathcal{P}} \in \text{REC}$  αν  $L_{\overline{\mathcal{P}}} \in \text{REC}$ .

<sup>3</sup> Δες Ορισμό 1.4.11 και Παρατήρηση 1.4.12.


 Σχήμα 6.1.1: Η TM  $M_w$  στην απόδειξη του Θεωρήματος 6.1.1.

**Παράδειγμα 6.1.2** (Εφαρμογή του Θεωρήματος του Rice).

- $L_{\mathbb{N}} = \{\langle M \rangle \in \{0, 1\}^* \mid |L(M)| \in \mathbb{N}\} \notin \text{REC}$  καθώς για την ιδιότητα  $\mathcal{P}_{\mathbb{N}}$  ισχύει ότι  $\mathcal{P}_{\mathbb{N}} \neq \emptyset$  (παραδείγματος χάρη  $\{\epsilon\} \in \mathcal{P}_{\mathbb{N}}$ ) και  $\mathcal{P}_{\mathbb{N}} \neq \text{RE}$  ( $\{0, 1\}^* \notin \mathcal{P}_{\mathbb{N}}$ ).
- $L_{\text{REC}} = \{\langle M \rangle \in \{0, 1\}^* \mid L(M) \in \text{REC}\} \notin \text{REC}$  καθώς για την ιδιότητα  $\text{REC}$  ισχύει ότι  $\text{REC} \neq \emptyset$  (παραδείγματος χάρη κάθε πεπερασμένη γλώσσα ανήκει στην  $\text{REC}$ ) και όπως είδαμε  $\text{REC} \neq \text{RE}$ .
- $L = \{\langle M \rangle \in \{0, 1\}^* \mid L(M) = \emptyset \vee L(M) = \{(01)^n \mid n \in \mathbb{N}\} \vee L(M) = \{0, 1\}^*\} \notin \text{REC}$  καθώς για την ιδιότητα  $\mathcal{P} = \{\emptyset, \{(01)^n \mid n \in \mathbb{N}\}, \{0, 1\}^*\}$  ισχύει ότι  $L = L_{\mathcal{P}}$  και προφανώς  $\mathcal{P} \notin \{\emptyset, \text{RE}\}$ .

## 6.2 Η περίπτωση του RE

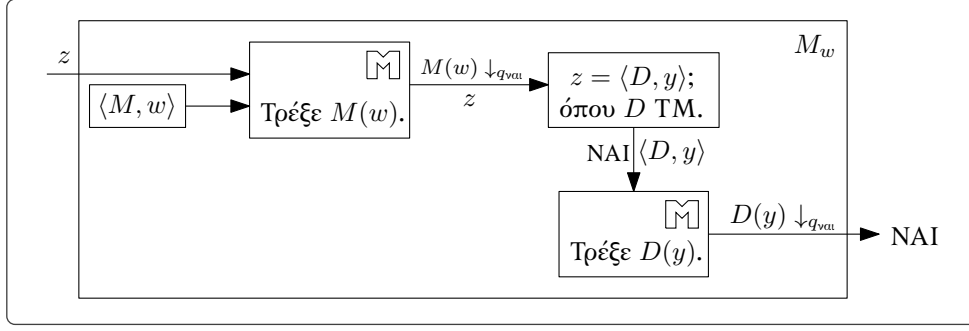
Ας δούμε μία ακόμα αναγωγή που παρουσιάζει ενδιαφέρον.

**Παράδειγμα 6.2.1.** Η συνάρτηση  $\phi : \{0, 1\}^* \rightarrow \{0, 1\}^*$  με:

$$\phi(x) = \begin{cases} \langle M_w \rangle & , \text{αν υπάρχει TM } M \text{ και } w \in \{0, 1\}^* \text{ τέτοια ώστε } x = \langle M, w \rangle \\ \langle M_{\uparrow} \rangle & , \text{αλλιώς} \end{cases}$$

όπου η  $M_{\uparrow}$  κατά τα γνωστά δεν τερματίζει ποτέ και η  $M_w$  φαίνεται στο Σχήμα 6.2.1, είναι αναγωγή της  $\bar{L}_{\text{Αποδοχής}}$  στην  $L_{\text{REC}}$  καθώς:

1.  $\phi$  πλήρης και υπολογίσιμη.
2. -  $x \in \bar{L}_{\text{Αποδοχής}}$  τότε:
  - α. είτε  $x = \langle M, w \rangle$  με  $\langle M, w \rangle \in \bar{L}_{\text{Αποδοχής}}$ , οπότε  $\phi(x) = \langle M_w \rangle$  και για κάθε  $x \in \{0, 1\}^*$  ισχύει ότι  $M_w(x) \uparrow$  (αφού  $M(w) \not\downarrow_{q_{\text{vac}}}$ ), άρα  $L(M_w) = \emptyset \in \text{REC}$ , συνεπώς  $\phi(x) \in L_{\text{REC}}$ ,
  - β. είτε  $x \neq \langle M, w \rangle$ , οπότε  $\phi(x) = \langle M_{\uparrow} \rangle$  και  $L(M_{\uparrow}) = \emptyset \in \text{REC}$ , άρα  $\phi(x) \in L_{\text{REC}}$ .
- $x \notin \bar{L}_{\text{Αποδοχής}}$  τότε  $x = \langle M, w \rangle$  με  $\langle M, w \rangle \in L_{\text{Αποδοχής}}$ , οπότε  $\phi(x) = \langle M_w \rangle$  και  $L(M_w) = \{\langle D, y \rangle \in \{0, 1\}^* \mid D(y) \downarrow_{q_{\text{vac}}}\} = L_{\text{Αποδοχής}}$  (αφού  $M(w) \downarrow_{q_{\text{vac}}}$ ), και αφού  $L_{\text{Αποδοχής}} \notin \text{REC}$  έπεται ότι  $\phi(x) \notin L_{\text{REC}}$ .


 Σχήμα 6.2.1: Η TM  $M_w$  του Παραδείγματος 6.2.1.

Τέλος, αφού  $\bar{L}_{\text{Αποδοχής}} \notin \text{RE}$  έπεται ότι  $L_{\text{REC}} \notin \text{RE}$ .

Παρόλο που η ιδέα της αναγωγής του Θεωρήματος 6.1.1 (μία παραλλαγή της για την ακρίβεια) μπορεί να χρησιμοποιηθεί για να δείξουμε ότι η γλώσσα  $L_{\text{REC}}$  δεν είναι αναδρομικά απαριθμήσιμη, δυστυχώς δεν αρκεί για να επεκτείνουμε το Θεώρημα 6.1.1 στις αναδρομικά απαριθμήσιμες γλώσσες <sup>1</sup>.

Είναι φανερό ότι η κλάση REC, ιδωμένη σαν ιδιότητα γλωσσών, ικανοποιεί πολλές και ποικίλες «προδιαγραφές». Η προδιαγραφή όμως που δεν ικανοποιεί, και ως εκ τούτου η γλώσσα  $L_{\text{REC}}$  δεν είναι αναδρομικά απαριθμήσιμη, είναι ότι υπάρχουν υπερσύνολα γλωσσών του REC που δεν ανήκουν στο REC (δες το Παράδειγμα 6.2.3 για περισσότερες λεπτομέρειες). Το δεύτερο Θεώρημα του Rice (γνωστό και ως *Γενικευμένο Θεώρημα του Rice*) καθορίζει πλήρως τις απαραίτητες προδιαγραφές μίας ιδιότητας  $\mathcal{P}$  ώστε η  $L_{\mathcal{P}}$  να είναι αναδρομικά απαριθμήσιμη.

**Θεώρημα 6.2.2** (Γενικευμένο Θεώρημα του Rice). Για κάθε ιδιότητα  $\mathcal{P} \subseteq \text{RE}$  ισχύει ότι:

$$L_{\mathcal{P}} \in \text{RE} \Leftrightarrow \textcircled{1} \wedge \textcircled{2} \wedge \textcircled{3}$$

όπου:

$$\textcircled{1} \quad \forall L \in \mathcal{P} \quad \forall L' \in \text{RE} \quad (L \subseteq L' \rightarrow L' \in \mathcal{P}) \quad ^2$$

$$\textcircled{2} \quad \forall L \in \mathcal{P} \quad (|L| = \aleph_0 \rightarrow \exists L' \subseteq L \quad (|L'| \in \mathbb{N} \wedge L' \in \mathcal{P})) \quad ^3$$

$$\textcircled{3} \quad F_{\mathcal{P}} = \{w_1 \# w_2 \# \dots \# w_n \in (\{0, 1\} \cup \{\#\})^* \mid \{w_1, w_2, \dots, w_n\} \in \{L \in \mathcal{P} \mid |L| \in \mathbb{N}\}\} \in \text{RE} \quad ^4 \quad ^5$$

Απόδειξη.  $(\Rightarrow) \quad L_{\mathcal{P}} \in \text{RE} \Rightarrow \textcircled{1} :$  <sup>6</sup> Έστω γλώσσες  $L_1 \in \mathcal{P}$  και  $L_2 \in \text{RE}$  τέτοιες ώστε  $L_1 \subseteq L_2$

<sup>1</sup> Την παραθέτουμε όμως εδώ προς τέρψη του αναγνώστη, αλλά και για να τον προετοιμάσουμε για τις δύσκολες αναγωγές που περιέχει η απόδειξη του Θεωρήματος 6.2.2.

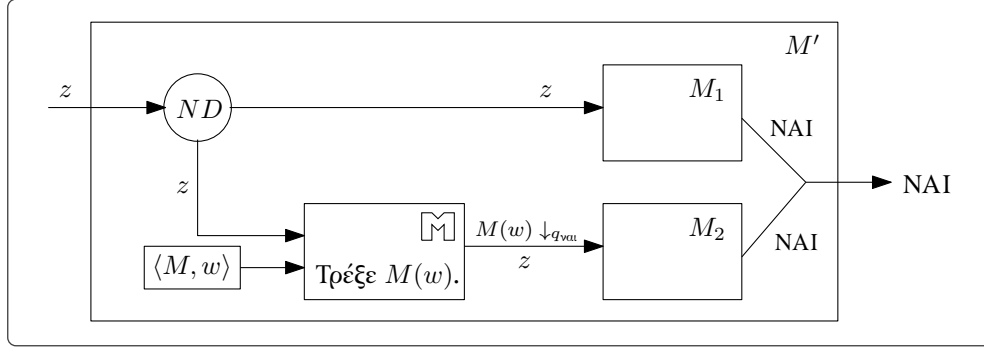
<sup>2</sup> Η συνθήκη αυτή «διαβάζεται»: Κάθε αναδρομικά απαριθμήσιμο υπερσύνολο μίας γλώσσας που έχει την ιδιότητα, έχει επίσης την ιδιότητα.

<sup>3</sup> Κάθε γλώσσα που έχει την ιδιότητα έχει πεπερασμένο υποσύνολο που έχει επίσης την ιδιότητα.

<sup>4</sup> Τυπικά θα πρέπει να κωδικοποιήσουμε τη γλώσσα  $\{w_1, w_2, \dots, w_n\}$  στο  $\{0, 1\}$ . Θα χρησιμοποιήσουμε όμως άτυπα την κωδικοποίηση στο  $\{0, 1\} \cup \{\#\}$  καθώς είναι πιο παραστατική.

<sup>5</sup> Η γλώσσα που περιέχει λέξεις που αντιστοιχούν σε πεπερασμένες γλώσσες που έχουν την ιδιότητα είναι αναδρομικά απαριθμήσιμη.

<sup>6</sup> Θα δείξουμε την αντιθετοαντιστροφή του, δηλαδή ότι  $\neg \textcircled{1} \Rightarrow L_{\mathcal{P}} \notin \text{RE}$ .



**Σχήμα 6.2.2:** Η ΤΜ  $M'$  στην απόδειξη του ότι  $L_P \in RE \Rightarrow \textcircled{1}$  στο Θεώρημα 6.2.2.

και  $L_2 \notin \mathcal{P}$ . Έστω επίσης ότι οι ΤΜ  $M_1, M_2$  ημι-αποφασίζουν τις  $L_1, L_2$  αντίστοιχα. Θα δείξουμε ότι  $\bar{L}_{\text{Αποδοχής}} \leq_m L_P$ . Θεωρούμε συνάρτηση  $\phi : \{0, 1\}^* \rightarrow \{0, 1\}^*$  με:

$$\phi(x) = \begin{cases} \langle M' \rangle & , \text{ αν υπάρχει ΤΜ } M \text{ και } w \in \{0, 1\}^* \text{ τέτοια ώστε } x = \langle M, w \rangle \\ \langle M_1 \rangle & , \text{ αλλιώς} \end{cases}$$

όπου  $M'$  η ΤΜ του Σχήματος 6.2.2. Παρατηρούμε ότι:

1.  $\phi$  πλήρης και υπολογίσιμη.
2. -  $x \in \bar{L}_{\text{Αποδοχής}}$  τότε
  - α. είτε  $x = \langle M, w \rangle$  με  $\langle M, w \rangle \in \bar{L}_{\text{Αποδοχής}}$ , οπότε  $\phi(x) = \langle M' \rangle$  και  $L(M') = L(M_1) = L_1 \in \mathcal{P}$  άρα  $\phi(x) \in L_P$ ,
  - β. είτε  $x \neq \langle M, w \rangle$ , οπότε  $\phi(x) = \langle M_1 \rangle$  και  $L_1 \in \mathcal{P}$  άρα  $\phi(x) \in L_P$ .
- $x \notin \bar{L}_{\text{Αποδοχής}}$  τότε  $x = \langle M, w \rangle$  με  $\langle M, w \rangle \in L_{\text{Αποδοχής}}$ , οπότε  $\phi(x) = \langle M' \rangle$  και  $L(M') = L(M_2) = L_2 \notin \mathcal{P}$  (αφού  $M(w) \downarrow_{q_{\text{ναι}}}$  και  $L_1 \subseteq L_2$ ), άρα  $\phi(x) \notin L_P$ .

Αφού  $\bar{L}_{\text{Αποδοχής}} \notin RE$  έπεται ότι  $L_P \notin RE$ .

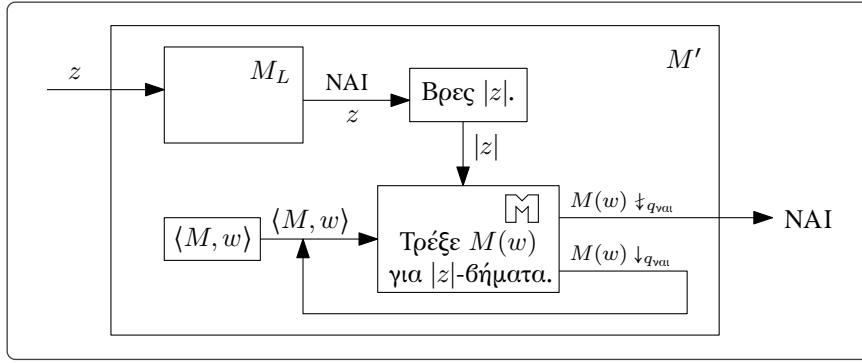
$L_P \in RE \Rightarrow \textcircled{2}$ :<sup>1</sup> Έστω γλώσσα  $L \in \mathcal{P}$  τέτοια ώστε  $|L| = \aleph_0$  και κάθε πεπερασμένο υποσύνολό της δεν ανήκει στην  $\mathcal{P}$ . Έστω επίσης  $M_L$  η ΤΜ που ημι-αποφασίζει την  $L$ . Θα δείξουμε ότι  $\bar{L}_{\text{Αποδοχής}} \leq_m L_P$ . Θεωρούμε συνάρτηση  $\phi : \{0, 1\}^* \rightarrow \{0, 1\}^*$  με:

$$\phi(x) = \begin{cases} \langle M' \rangle & , \text{ αν υπάρχει ΤΜ } M \text{ και } w \in \{0, 1\}^* \text{ τέτοια ώστε } x = \langle M, w \rangle \\ \langle M_L \rangle & , \text{ αλλιώς} \end{cases}$$

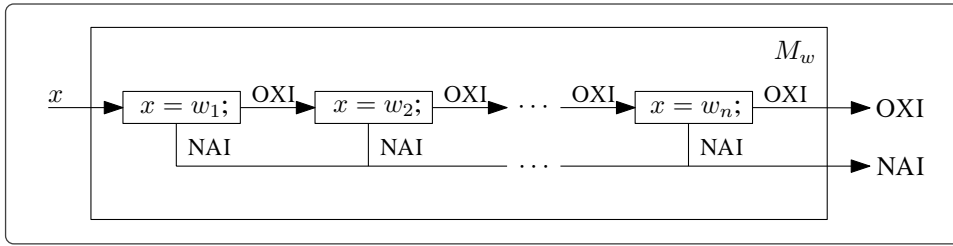
όπου  $M'$  η ΤΜ του Σχήματος 6.2.3. Παρατηρούμε ότι:

1.  $\phi$  πλήρης και υπολογίσιμη.

<sup>1</sup> Θα δείξουμε την αντιθετοαντιστροφή του, δηλαδή ότι  $\neg \textcircled{2} \Rightarrow L_P \notin RE$ .



**Σχήμα 6.2.3:** Η ΤΜ  $M'$  στην απόδειξη του ότι  $L_{\mathcal{P}} \in \text{RE} \Rightarrow \textcircled{2}$  στο Θεώρημα 6.2.2.



**Σχήμα 6.2.4:** Η ΤΜ  $M_w$  στην απόδειξη του ότι  $L_{\mathcal{P}} \in \text{RE} \Rightarrow \textcircled{3}$  στο Θεώρημα 6.2.2.

2. -  $x \in \bar{L}_{\text{Αποδοχής}}$  τότε

- α. είτε  $x = \langle M, w \rangle$  με  $\langle M, w \rangle \in \bar{L}_{\text{Αποδοχής}}$ , οπότε  $\phi(x) = \langle M' \rangle$  και  $L(M') = L(M_L) = L \in \mathcal{P}$  άρα  $\phi(x) \in L_{\mathcal{P}}$ ,
  - β. είτε  $x \neq \langle M, w \rangle$ , οπότε  $\phi(x) = \langle M_L \rangle$  και  $L \in \mathcal{P}$  άρα  $\phi(x) \in L_{\mathcal{P}}$ .
- $x \notin \bar{L}_{\text{Αποδοχής}}$  τότε  $x = \langle M, w \rangle$  με  $\langle M, w \rangle \in L_{\text{Αποδοχής}}$ , οπότε  $\phi(x) = \langle M' \rangle$ . Παρατηρούμε ότι για κάποιο  $t \in \mathbb{N}$  ισχύει ότι  $M(w) \downarrow_{q_{\text{ναί}}}^t$ , οπότε  $L(M') = \{z \in L \mid |z| < t\}$ . Συνεπώς  $|L(M')| \in \mathbb{N}$  και  $L(M') \subseteq L$  άρα  $L(M') \notin \mathcal{P}$ , οπότε  $\phi(x) \notin L_{\mathcal{P}}$ .

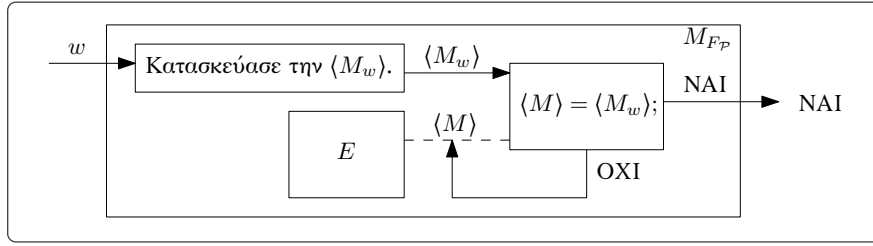
Αφού  $\bar{L}_{\text{Αποδοχής}} \notin \text{RE}$  έπεται ότι  $L_{\mathcal{P}} \notin \text{RE}$ .

$L_{\mathcal{P}} \in \text{RE} \Rightarrow \textcircled{3}$ : Για κάθε λέξη του  $(\{0, 1\} \cup \{\#\})^*$ , έστω τη  $w = w_1\#w_2\#\dots\#w_n$  όπου  $w_i \in \{0, 1\}^*$  για  $i \in [n]$ <sup>1</sup>, θεωρούμε τη λέξη  $\langle M_w \rangle \in \{0, 1\}^*$ , όπου  $M_w$  η ΤΜ του Σχήματος 6.2.4 που αποφασίζει την γλώσσα  $\{w_1, w_2, \dots, w_n\}$ .

Αφού  $L_{\mathcal{P}} \in \text{RE}$  υπάρχει απαριθμητής, έστω  $E$ , που απαριθμεί την  $L_{\mathcal{P}}$ . Θεωρούμε την ΤΜ  $M_{F_{\mathcal{P}}}$  του Σχήματος 6.2.5 και παρατηρούμε ότι:

- Αν  $w \in F_{\mathcal{P}}$ , τότε  $w = w_1\#w_2\#\dots\#w_n$  για κάποιες λέξεις  $w_1, w_2, \dots, w_n \in \{0, 1\}^*$ , όπου η  $L = \{w_1, w_2, \dots, w_n\} \in \mathcal{P}$ . Αφού η  $M_w$  αποφασίζει την  $L$  ο  $E$  κάποια στιγμή θα τυπώσει  $\langle M_w \rangle$ . Άρα  $M_{F_{\mathcal{P}}}(w) \downarrow_{q_{\text{ναί}}}$ .

<sup>1</sup> Ενδεχομένως κάποια από τις  $w_i$ ,  $i \in [n]$ , να είναι η κενή λέξη και να έχουμε και επαναλήψεις.



**Σχήμα 6.2.5:** Η TM  $M_{F_P}$  στην απόδειξη του ότι  $L_P \in RE \Rightarrow \textcircled{3}$  στο Θεώρημα 6.2.2.

- Αν  $w \notin F_P$ , τότε  $w = w_1 \# w_2 \# \dots \# w_n$  για κάποιες λέξεις  $w_1, w_2, \dots, w_n \in \{0, 1\}^*$ <sup>1</sup>, όπου  $\{w_1, w_2, \dots, w_n\} \notin \mathcal{P}$ . Ο  $E$  δεν θα τυπώσει ποτέ  $\langle M_w \rangle$ . Άρα  $M_{F_P}(w) \uparrow$ .

Επομένως η  $M_{F_P}$  ημι-αποφασίζει την  $F_P$ .

( $\Leftarrow$ ):<sup>2</sup> Από το  $\textcircled{3}$  υπάρχει απαριθμητής  $E$  που απαριθμεί την  $F_P$ . Θα δείξουμε ότι η TM  $D$  του Σχήματος 6.2.6 ημι-αποφασίζει την  $L_P$ <sup>3</sup>.

$L_P \subseteq L(D)$ : Έστω  $\langle M \rangle \in L_P$  δηλαδή  $L(M) \in \mathcal{P}$ . Από το  $\textcircled{2}$  έπεται ότι

$$\exists L \subseteq L(M) \ (|L| \in \mathbb{N} \wedge L \in \mathcal{P}),$$

έστω ότι  $L = \{w_1, \dots, w_n\}$ . Από το  $\textcircled{3}$  έπεται ότι ο  $E$  κάποια στιγμή θα τυπώσει  $w_1 \# \dots \# w_n$ , έστω μετά από  $i$ -βήματα, και αφού  $L \subseteq L(M)$ , έπεται ότι

$$\exists j \in \mathbb{N} \ \forall s \in [n] \ (M(w_s) \downarrow_{q_{\text{vac}}}^j),$$

οπότε για το ζευγάρι  $(i, j)$  ισχύει ότι  $D(\langle M \rangle) \downarrow_{q_{\text{vac}}}$ , άρα  $\langle M \rangle \in L(D)$ .

$L(D) \subseteq L_P$ : Έστω  $\langle M \rangle \in L(D)$ , δηλαδή υπάρχει  $(i, j) \in \mathbb{N}^2$  τέτοιο ώστε

$$\forall s \in [n] \ (M(w_s) \downarrow_{q_{\text{vac}}}^j),$$

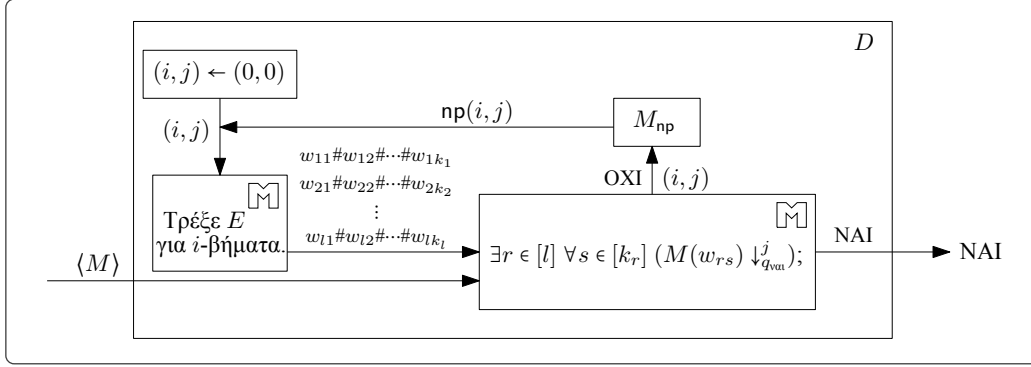
όπου  $w_1 \# \dots \# w_n$  είναι μία από τις λέξεις που τύπωσε ο  $E$  σε  $i$ -βήματα. Συνεπώς ισχύει ότι η  $L = \{w_1, \dots, w_n\}$  είναι υποσύνολο της  $L(M)$  και, αφού ο  $E$  απαριθμεί την  $F_P$ , ισχύει ότι η  $L$  έχει την ιδιότητα  $\mathcal{P}$ . Από το  $\textcircled{1}$  έπεται ότι  $L(M) \in \mathcal{P}$ , άρα  $\langle M \rangle \in L_P$ .  $\square$

Στη συνέχεια θα δούμε μερικά παραδείγματα εφαρμογής του Γενικευμένου Θεωρήματος του Rice.

<sup>1</sup> Ακόμα και αν τετριμμένα ισχύει ότι  $n = 1$ .

<sup>2</sup> Εδώ θα φανεί ο λόγος που οι  $\textcircled{1}$ ,  $\textcircled{2}$  και  $\textcircled{3}$  είναι ικανές να μας εξασφαλίσουν ότι η  $L_P$  θα είναι αναδρομικά απαριθμήσιμη: Δοσμένης μιας TM  $M$  η  $\textcircled{3}$  μας δίνει το δικαίωμα να ελέγξουμε μόνο ένα πεπερασμένο κομμάτι της  $L(M)$  για να εξακριβώσουμε αν  $L(M) \in \mathcal{P}$ , καθώς από τη  $\textcircled{2}$  αν  $L(M) \in \mathcal{P}$  θα υπάρχει πεπερασμένο υποσύνολό της που έχει την ιδιότητα  $\mathcal{P}$  (και κάποια στιγμή ο απαριθμητής για την  $F_P$  θα το τυπώσει), και αντίστροφα, αν κάποιο πεπερασμένο κομμάτι της  $L(M)$  έχει την  $\mathcal{P}$  τότε και η  $L(M)$  οφείλει να έχει την  $\mathcal{P}$ , λόγω του  $\textcircled{1}$ .

<sup>3</sup> Η TM  $M_{np}$  που χρησιμοποιεί σαν υπορουτίνα η  $D$  είναι μία παραλλαγή της TM της Παρατήρησης 1.4.19.


 Σχήμα 6.2.6: Η ΤΜ  $D$  στην απόδειξη του Θεωρήματος 6.2.2.

**Παράδειγμα 6.2.3.** Θα αποδείξουμε ξανά ότι η γλώσσα  $L_{\text{REC}}$  δεν είναι αναδρομικά απαριθμήσιμη, χωρίς να χρησιμοποιήσουμε αναγωγή (όπως κάναμε στο Παράδειγμα 6.2.1). Θεωρούμε την ιδιότητα  $\mathcal{P} = \text{REC}$  και παρατηρούμε ότι για τη γλώσσα  $\emptyset$  (που προφανώς έχει την ιδιότητα  $\mathcal{P}$ ) υπάρχει γλώσσα  $L'$  με  $\emptyset \subseteq L'$  που δεν έχει την ιδιότητα  $\mathcal{P}$ , παραδείγματος χάρη η  $L_{\text{Αποδοχής}}$ . Συνεπώς παραβιάζεται η συνθήκη ① του Θεωρήματος 6.2.2, άρα  $L_{\text{REC}} \notin \text{RE}$ .

**Παράδειγμα 6.2.4.** Παρατηρήστε ότι για την ιδιότητα  $\mathcal{P}_\infty$  δεν ισχύει η συνθήκη ② καθώς δεν υπάρχει πεπερασμένη γλώσσα με την ιδιότητα  $\mathcal{P}_\infty$ . Συνεπώς  $L_\infty \notin \text{RE}$ .

**Παράδειγμα 6.2.5.** Έστω η ιδιότητα  $\mathcal{P} = \{L \in \text{RE} \mid L \setminus L_{\text{Αποδοχής}} \neq \emptyset\}$ . Παρατηρούμε ότι αν η  $L$  έχει την ιδιότητα  $\mathcal{P}$  τότε  $L \setminus L_{\text{Αποδοχής}} \neq \emptyset$ , οπότε:

$$\forall L' \in \text{RE} \ (L \subseteq L' \rightarrow L' \setminus L_{\text{Αποδοχής}} \neq \emptyset)$$

Άρα η  $\mathcal{P}$  ικανοποιεί τη συνθήκη ① του Θεωρήματος 6.2.2.

Επίσης, αφού  $L \setminus L_{\text{Αποδοχής}} \neq \emptyset$ , υπάρχει  $w \in L \setminus L_{\text{Αποδοχής}}$ . Θεωρούμε τη γλώσσα  $\{w\} \subseteq L$  για την οποία ισχύει επίσης ότι  $\{w\} \setminus L_{\text{Αποδοχής}} \neq \emptyset$ , άρα  $\{w\} \in \mathcal{P}$ . Συνεπώς η  $\mathcal{P}$  ικανοποιεί και τη συνθήκη ② του Θεωρήματος 6.2.2.

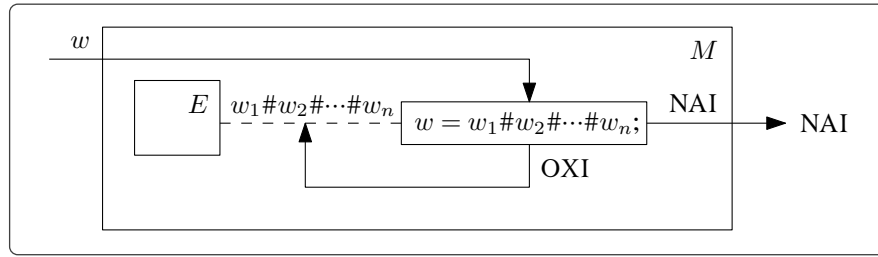
Έστω (προς άτοπο) ότι ικανοποιεί και τη συνθήκη ③, δηλαδή υπάρχει απαριθμητής  $E$  που απαριθμεί την  $F_{\mathcal{P}}$ . Η ΤΜ  $M$  του Σχήματος 6.2.7 ημι-αποφασίζει την  $\bar{L}_{\text{Αποδοχής}}$ , καθώς αν  $w \in \bar{L}_{\text{Αποδοχής}}$  τότε  $\{w\} \in \mathcal{P}$  άρα ο  $E$  κάποια στιγμή θα τυπώσει τη  $w$ . Άτοπο. Συνεπώς  $L_{\mathcal{P}} \notin \text{RE}$ .

**Παράδειγμα 6.2.6.** Έστω η ιδιότητα  $\mathcal{P} = \{L \in \text{RE} \mid |L| \geq 10\}$ . Παρατηρούμε ότι αν η  $L$  έχει την ιδιότητα  $\mathcal{P}$  τότε  $|L| \geq 10$ , οπότε:

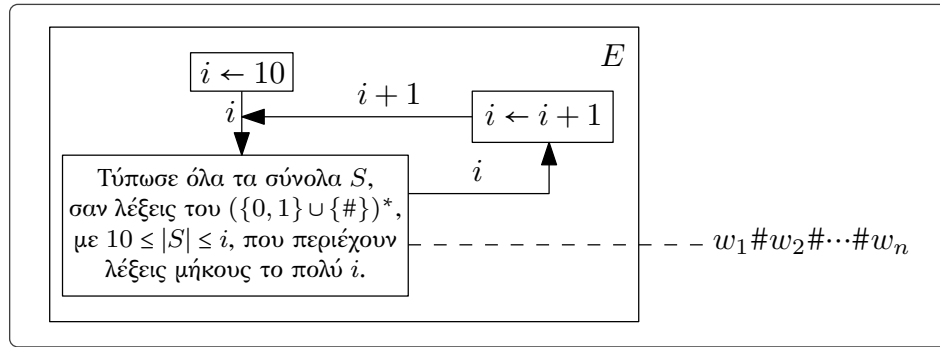
$$\forall L' \in \text{RE} \ (L \subseteq L' \rightarrow |L'| \geq |L| \geq 10)$$

Άρα η  $\mathcal{P}$  ικανοποιεί τη συνθήκη ① του Θεωρήματος 6.2.2.

Επίσης, αφού  $|L| \geq 10$ , υπάρχουν διακεκριμένες  $w_1, \dots, w_{10} \in L$ . Θεωρούμε τη γλώσσα  $L' = \{w_1, \dots, w_{10}\} \subseteq L$  η οποία έχει 10 στοιχεία, άρα  $L' \in \mathcal{P}$ . Συνεπώς η  $\mathcal{P}$  ικανοποιεί και τη συνθήκη ② του Θεωρήματος 6.2.2.



**Σχήμα 6.2.7:** Η ΤΜ  $M$  που (υποθετικά) ημι-αποφασίζει την  $\bar{L}_{\text{Αποδοχής}}$  στο Παράδειγμα 6.2.5.



**Σχήμα 6.2.8:** Ο απαριθμητής  $E$  στο Παράδειγμα 6.2.6.

Τέλος, ο απαριθμητής  $E$  του Σχήματος 6.2.8 απαριθμεί την  $F_P$ . Συνεπώς η  $\mathcal{P}$  ικανοποιεί και τη συνθήκη ③ του Θεωρήματος 6.2.2, άρα έπεται ότι  $L_P \in \text{RE}$ <sup>1</sup>.

## Ασκήσεις

**6.1 (☆☆☆).** Έστω  $L \in \text{RE}$ . Εκφράστε σαν γλώσσα το ακόλουθο πρόβλημα:

**Είσοδος:** Κωδικοποίηση μίας ΤΜ  $M$

**Έξοδος:** Ναι αν η  $M$  αναγνωρίζει την  $L$  και όχι αλλιώς.

Και ελέγξτε αν ανήκει στο REC.

**6.2 (★☆☆).** Θεωρήστε τη γλώσσα  $L = \{\langle M \rangle \in \{0, 1\}^* \mid L(M) = HP\}$ . Δείξτε ότι:

1. Η  $L$  δεν είναι αναδρομική, χωρίς να χρησιμοποιήσετε το (απλό) Θεώρημα του Rice (και το δεύτερο υποερώτημα).

<sup>1</sup> Φυσικά στην προκειμένη περίπτωση θα ήταν λιγότερο κουραστικό να κατασκευάσουμε κατευθείαν μία ΤΜ που να ημι-αποφασίζει την  $L_{10} = \{\langle M \rangle \in \{0, 1\}^* \mid |L(M)| \geq 10\}$ . Η κατασκευή αυτής της ΤΜ αφήνεται ως άσκηση.

2. Η  $L$  δεν είναι αναδρομικά απαριθμήσιμη, χωρίς να χρησιμοποιήσετε το (γενικευμένο) Θεώρημα του Rice.

**6.3 (★☆☆).** Εξετάστε αν η γλώσσα  $L = \{\langle M \rangle \in \{0, 1\}^* \mid \text{Υπάρχει TM } M' \text{ με } \text{άρτιο πλῆθος καταστάσεων τέτοια ώστε } L(M') = L(M)\}$  είναι αναδρομική.

**6.4 (★☆☆).** Δείξτε ότι  $L = \{\langle M \rangle \in \{0, 1\}^* \mid \exists w \in \Sigma^* : |w| = 1871 \wedge w \in L(M)\} \in \text{RE}$ . Ισχύει ότι  $\bar{L} \in \text{RE}$ ;

**6.5 (★☆☆).** Εξετάστε αν οι γλώσσες:

- $L_{\text{RE}} = \{\langle M \rangle \in \{0, 1\}^* \mid L(M) \in \text{RE}\}$
- $L_{\text{CS}} = \{\langle M \rangle \in \{0, 1\}^* \mid L(M) \in \text{CS}\}$
- $L_{\text{CF}} = \{\langle M \rangle \in \{0, 1\}^* \mid L(M) \in \text{CF}\}$
- $L_{\text{R}} = \{\langle M \rangle \in \{0, 1\}^* \mid L(M) \in \text{R}\}$

είναι αναδρομικά απαριθμήσιμες.

**6.6 (★☆☆).** Δώστε παράδειγμα ιδιότητας που ικανοποιεί τα ① και ③ στην εκφώνηση του Θεωρήματος 6.2.2, αλλά δεν ικανοποιεί το ②.

**6.7 (☆☆☆).** Εξετάστε αν οι γλώσσες:

- $L_1 = \{\langle M \rangle \in \{0, 1\}^* \mid L(M) \cap \{0^{2^n} \in \{0, 1\}^* \mid n \in \mathbb{N}\} = \emptyset\}$
- $L_2 = \{\langle M \rangle \in \{0, 1\}^* \mid L(M) \cap \{0^{2^n} \in \{0, 1\}^* \mid n \in \mathbb{N}\} \neq \emptyset\}$

είναι αναδρομικά απαριθμήσιμες.

**6.8 (☆☆☆).** Εξετάστε αν οι γλώσσες:

- $L_1 = \{\langle M \rangle \in \{0, 1\}^* \mid \text{Υπάρχουν τουλάχιστον δύο λέξεις } w_1, w_2, \text{ με } |w_1| \neq |w_2|, \text{ για τις οποίες η } M \text{ τερματίζει}\}$
- $L_2 = \{\langle M \rangle \in \{0, 1\}^* \mid \text{Υπάρχουν ακριβώς δύο λέξεις } w_1, w_2, \text{ με } |w_1| \neq |w_2|, \text{ για τις οποίες η } M \text{ τερματίζει}\}$

είναι αναδρομικά απαριθμήσιμες.

**6.9 (★☆☆).** Εξετάστε αν οι γλώσσες:

- $L_1 = \{\langle M \rangle \in \{0, 1\}^* \mid |L(M)| \leq 68\}$
- $L_2 = \{\langle M \rangle \in \{0, 1\}^* \mid |L(M)| \geq 68\}$

είναι αναδρομικά απαριθμήσιμες.

**6.10 (★☆☆).** Εξετάστε αν οι γλώσσες:

- $L_1 = \{\langle M \rangle \in \{0,1\}^* \mid \text{Η } M \text{ τερματίζει για όλες τις λέξεις με άρτιο μήκος}\}$
- $L_2 = \{\langle M \rangle \in \{0,1\}^* \mid \text{Υπάρχει λέξη αρτίου μήκους για την οποία η } M \text{ τερματίζει}\}$

είναι αναδρομικά απαριθμήσιμες.

**6.11 (★☆☆).** Εξετάστε αν η γλώσσα  $L = \{\langle M \rangle \in \{0,1\}^* \mid |L(M)| \text{ είναι πρώτος αριθμός}\}$  είναι αναδρομικά απαριθμήσιμη.

**6.12 (★☆☆).** Εξετάστε αν η γλώσσα  $L = \{\langle M \rangle \in \{0,1\}^* \mid \text{Η } M \text{ τερματίζει για όλα τα παλίνδρομα του } \{0,1\}^*\}$  είναι αναδρομικά απαριθμήσιμη.

**6.13 (★☆☆).** Εξετάστε αν η γλώσσα  $L = \{\langle M \rangle \in \{0,1\}^* \mid |L(M)| = |\overline{L(M)}| = \aleph_0\}$  είναι αναδρομικά απαριθμήσιμη.

## ΚΕΦΑΛΑΙΟ 7

### ΤΟ ΘΕΩΡΗΜΑ ΑΝΑΔΡΟΜΗΣ

#### 7.1 Μπορούν οι μηχανές να αυτοαναπαράγονται;

Προτού απαντήσουμε σε αυτό το ερώτημα ας παρακολουθήσουμε τον ακόλουθο συλλογισμό:

1. Οι ζωντανοί οργανισμοί είναι μηχανές.

Η πρόταση αυτή είναι αληθής και αποτελεί δεμελιώδες δόγμα της σύγχρονης Βιολογίας. Οι ζωντανοί οργανισμοί λειτουργούν με «μηχανιστικό» τρόπο.

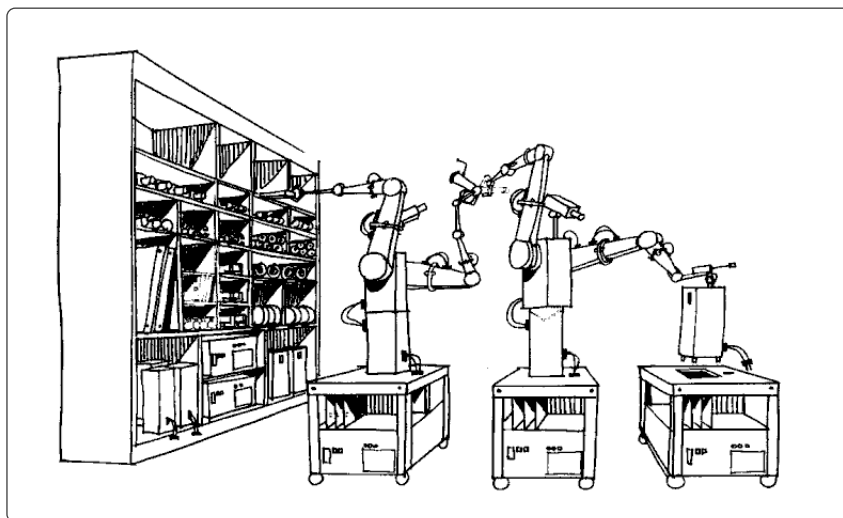
2. Οι ζωντανοί οργανισμοί μπορούν να αυτοαναπαράγονται.

Η πρόταση αυτή είναι επίσης αληθής. Είναι ουσιώδες γνώρισμα των ζωντανών οργανισμών να μπορούν να παραγάγουν, μέσω κάποιας διαδικασίας γονιμοποίησης και γέννησης, έναν ζωντανό οργανισμό του ίδιου είδους.

Μπορούν λοιπόν οι μηχανές να αυτοαναπαράγονται, όπως θα έκανε ένας ζωντανός οργανισμός;

Μιλώντας γενικά για «μηχανές», ίσως απαντούσαμε αρνητικά, καθώς αν η μηχανή  $A$  παράγει τη μηχανή  $B$  λογικά θα πρέπει να είναι «πιο πολύπλοκη» (σε επίπεδο σχεδίασης και περιγραφής) από τη  $B$ . Συνεπώς η  $A$  δεν θα μπορούσε να παραγάγει την  $A$ . Με ωριμότερη σκέψη όμως, μάλλον θα καταλήγαμε σε καταφατική απάντηση (δες Σχήμα 7.1.1). Αυτό που καθοδηγεί σε λάθος δρόμο τη διαίσθησή μας είναι το γεγονός ότι σχεδιάζουμε μία μηχανή με σκοπό να πράξει μία συγκεκριμένη διαδικασία, και συνήθως αυτή η διαδικασία δεν είναι η αναπαραγωγή! Αυτό δεν σημαίνει όμως ότι δεν μπορούμε να σχεδιάσουμε μία μηχανή που (αν την τροφοδοτήσουμε με τα απαραίτητα υλικά) να μπορεί να κατασκευάσει μία μηχανή του ίδιου τύπου<sup>1</sup>.

<sup>1</sup> Ενδιαφέρον παρουσιάζει η ιδέα των αυτοαναπαράγομενων διαστημοπλοίων (γνωστά και ως *Von Neumann probes*) και τα διάφορα φιλοσοφικά ερωτήματα που εγείρουν όσον αφορά την ύπαρξη εξωγήινων πολιτισμών (βλέπε *Παράδοξο του Fermi*).



**Σχήμα 7.1.1:** Καλλιτεχνική αναπαράσταση μίας μηχανής που αυτοαναπαράγεται.

Ας επικεντρωθούμε στις μηχανές που μας ενδιαφέρουν, τις μηχανές υπολογισμού, και ας μεταφέρουμε το ερώτημα αυτό στους αλγόριθμους. Όμως, τι θα καθιστούσε αυτοαναπαγωγή για έναν αλγόριθμο; Η πιο συνετή προσέγγιση θα ήταν η εξής:

*Ένας αλγόριθμος αυτοαναπαράγεται αν έχει ως έξοδο κάποια κωδικοποίηση του ίδιου του εαυτού!*

Σκοπός της παραγράφου αυτής είναι να αποδείξουμε ότι και οι ΤΜ μπορούν να αυτοαναπαράγονται με την παραπάνω έννοια: Μπορεί μία ΤΜ  $M$  να έχει σαν έξοδο την  $\langle M \rangle$ . Αν δεχθούμε ότι μία ΤΜ είναι ένα πρόγραμμα (δες Σελίδα 20), η απάντηση είναι άμεση καθώς ξέρουμε ότι ένα πρόγραμμα μπορεί να έχει σαν έξοδο τον ίδιο τον κώδικα του. Για παράδειγμα ας δούμε το ακόλουθο πρόγραμμα σε ψευδογλώσσα <sup>1</sup>:

Γράψε 2 αντίγραφα του παρακάτω μηνύματος το 2<sup>ο</sup> σε εισαγωγικά.  
"Γράψε 2 αντίγραφα του παρακάτω μηνύματος το 2<sup>ο</sup> σε εισαγωγικά."

Σε φυσική γλώσσα αυτό θα το γράφαμε απλούστατα ως εξής:

Γράψε αυτήν την πρόταση.

<sup>1</sup> Σε Python θα γράφαμε π.χ.:

```
a = ['print("a =", a)', 'for s in a:', '    print(s)']  
print("a =", a)  
for s in a:  
    print(s)
```

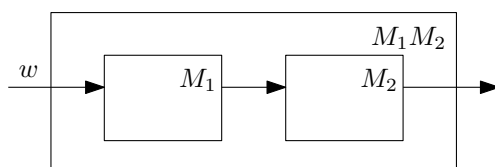
Παραδείγματα για άλλες γλώσσες προγραμματισμού υπάρχουν εδώ: <http://www.nyx.net/~gthompson/quine.htm>.

όμως μία γλώσσα προγραμματισμού δεν μπορεί να καταλάβει (άμεσα) την αυτοαναφορά (την λέξη «αυτήν» δηλαδή).

Μιμούμενοι την παραπάνω υλοποίηση της αυτοαναπαραγωγής αλγορίθμων, μέσω αυτοαναφοράς, θα αποδείξουμε ότι υπάρχουν TM με έξοδο την κωδικοποίησή τους (οι λεγόμενες *αυτογραφικές TM*). Μάλιστα θα προχωρήσουμε την ιδέα αυτή περαιτέρω και θα αποδείξουμε κάτι ακόμα πιο εντυπωσιακό: *Μία TM  $M$  μπορεί να χρησιμοποιεί κατά τη λειτουργία της την  $\langle M \rangle$* . Μπορεί να έχει δηλαδή «επίγνωση» του «εαυτού» της και να εκμεταλλευτεί αυτό το γεγονός κατά τον υπολογισμό!

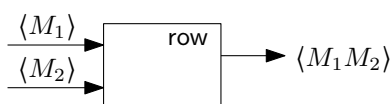
Είναι πια καιρός να αφήσουμε τη φιλοσοφία και να επανέλθουμε στον κόσμο των μαθηματικών. Θα ξεκινήσουμε εισάγοντας τον συμβολισμό που θα διευκολύνει την περιγραφή των TM που θα ορίσουμε στη συνέχεια.

**Συμβολισμός 7.1.1.** Έστω TM  $M_1, M_2$ . Θεωρούμε την TM  $M_1M_2$ :



που τρέχει την  $M_1$  με είσοδο  $w$  και όταν αυτή τερματίσει (αν τερματίσει) τρέχει την  $M_2$  με είσοδο το περιεχόμενο της ταινίας της  $M_1(w)$  κατά τον τερματισμό της. Στην περίπτωση όπου η  $M_2$  δέχεται δύο εισόδους (όπως στην απόδειξη του Θεωρήματος 7.2.1), η πρώτη θα είναι το περιεχόμενο της ταινίας της  $M_1(w)$  και η δεύτερη η  $w$ .

Θεωρούμε επίσης την TM row:



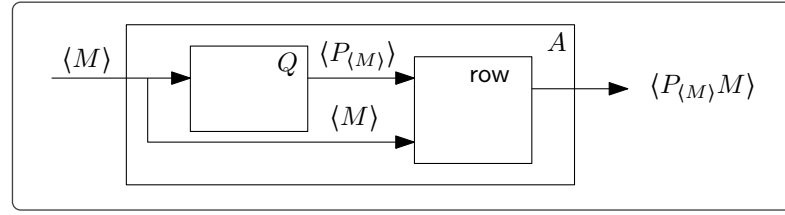
που δέχεται ως είσοδο τις κωδικοποιήσεις των TM  $M_1$  και  $M_2$  και επιστρέφει την κωδικοποίηση της TM  $M_1M_2$  (και όχι την παράθεση των λέξεων  $\langle M_1 \rangle, \langle M_2 \rangle$ ).

**Θεώρημα 7.1.2.** Υπάρχει TM  $M$  που («αγνοεί» την είσοδό της και) επιστρέφει  $\langle M \rangle$ .

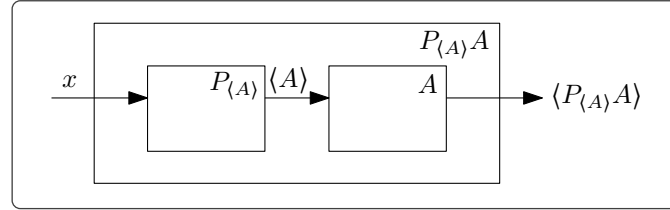
*Απόδειξη.* Θεωρούμε την TM  $P_w$  που «αγνοεί» την είσοδό της και επιστρέφει τη λέξη  $w$  και την TM  $Q$  που παίρνει μία λέξη  $w$  σαν είσοδο και επιστρέφει την  $\langle P_w \rangle$ . Τέλος, θεωρούμε την TM  $A$  του Σχήματος 7.1.2 και παρατηρούμε ότι η TM  $P_{\langle A \rangle}A$  του Σχήματος 7.1.3 («αγνοεί» την είσοδό της και) επιστρέφει  $\langle P_{\langle A \rangle}A \rangle$ , άρα είναι η TM που αναζητούσαμε.  $\square$

Όμως σε ποιο σημείο εφαρμόζεται η αυτοαναφορά στην παραπάνω απόδειξη; Τυπικά η αυτοαναφορά στα μαθηματικά εκφράζεται μέσω κάποιου *Θεωρήματος Σταθερού Σημείου* (δες Θεώρημα 7.3.4). Οι λεπτομέρειες θα αφεθούν ως άσκηση (Άσκηση 7.10<sup>1</sup>)...

<sup>1</sup> Ίσως μια μικρή βοήθεια: Θεωρήστε τον μετασχηματισμό TM  $t : \mathcal{G} \rightarrow \mathcal{G}$  με  $t(\langle M \rangle) = \langle P_{\langle M \rangle} \rangle$ .



Σχήμα 7.1.2: Η ΤΜ  $A$  στην απόδειξη του Θεωρήματος 7.1.2.



Σχήμα 7.1.3: Η ΤΜ  $P_{\langle A \rangle}A$  στην απόδειξη του Θεωρήματος 7.1.2.

## 7.2 Το Θεώρημα Αναδρομής

**Θεώρημα 7.2.1** (Θεώρημα Αναδρομής<sup>1</sup>). Για κάθε υπολογίσιμη συνάρτηση  $t : \{0, 1\}^* \times \{0, 1\}^* \rightarrow \{0, 1\}^*$  υπάρχει ΤΜ  $R$  τέτοια ώστε για κάθε  $x \in \{0, 1\}^*$ :

$$\phi_R(x) = t(\langle R \rangle, x)$$

όπου  $\phi_R$  είναι η συνάρτηση που υπολογίζει η ΤΜ  $R$  (δες Ορισμό 1.2.13).

**Απόδειξη.** Έστω  $T$  η ΤΜ που υπολογίζει τη συνάρτηση  $t$  (η  $T$  δέχεται σαν είσοδο δύο λέξεις). Παρατηρούμε ότι η ΤΜ  $P_{\langle AT \rangle}AT$  του Σχήματος 7.2.1, με είσοδο  $x \in \{0, 1\}^*$  επιστρέφει την τιμή  $t(\langle P_{\langle AT \rangle}AT \rangle, x)$ , άρα είναι η ΤΜ  $R$  που αναζητούσαμε.  $\square$

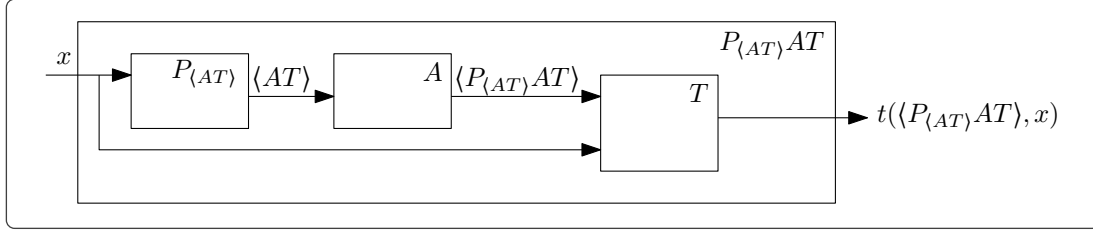
Ως πρώτο παράδειγμα εφαρμογής του Θεωρήματος Αναδρομής θα αποδείξουμε ξανά το γεγονός ότι  $HP \notin \text{REC}$ .

**Παράδειγμα 7.2.2.** Έστω (προς άτοπο) ότι η ΤΜ  $H$  αποφασίζει την  $HP$ . Θεωρούμε τη συνάρτηση  $t : \{0, 1\}^* \times \{0, 1\}^* \rightarrow \{0, 1\}^*$ , με:

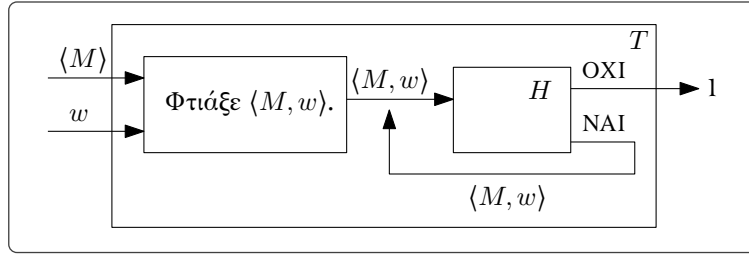
$$t(x, w) = \begin{cases} 1 & , \text{αν υπάρχει ΤΜ } M \text{ τέτοια ώστε } x = \langle M \rangle \text{ και } M(w) \uparrow \\ \perp & , \text{αλλιώς} \end{cases}$$

Αυτή η (μερική) συνάρτηση είναι υπολογίσιμη (π.χ. από την ΤΜ του Σχήματος 7.2.2), άρα από το Θεώρημα 7.2.1 υπάρχει ΤΜ  $R$  τέτοια ώστε για κάθε  $w \in \{0, 1\}^*$ :

<sup>1</sup> Στη βιβλιογραφία το Θεώρημα αυτό αναφέρεται ως *Δεύτερο Θεώρημα Αναδρομής του Kleene* και δεν θα πρέπει να συγχέεται με το Θεώρημα Αναδρομής που συναντάμε στην *Αξιοματική Θεωρία Συνόλων* (εκεί το θεώρημα αποδεικνύει την ύπαρξη των συναρτήσεων που ορίζονται αναδρομικά, ενώ εδώ αποδεικνύει ότι οι συναρτήσεις που ορίζονται αναδρομικά μέσω υπολογίσιμων συναρτήσεων είναι υπολογίσιμες, δες Άσκηση 7.7).



**Σχήμα 7.2.1:** Η ΤΜ  $P_{\langle AT \rangle}AT$  στην απόδειξη του Θεωρήματος 7.2.1.



**Σχήμα 7.2.2:** Η ΤΜ του Παραδείγματος 7.2.2 (αν η πρώτη είσοδος δεν είναι κωδικοποίηση ΤΜ η  $T$  θα κολλήσει).

$$\phi_R(w) = t(\langle R \rangle, w) = \begin{cases} 1 & , \text{αν } R(w) \uparrow \\ \perp & , \text{αν } R(w) \downarrow \end{cases} = \begin{cases} 1 & , \text{αν } \phi_R(w) = \perp \\ \perp & , \text{αν } \phi_R(w) \neq \perp \end{cases}$$

πράγμα που φυσικά είναι άτοπο.

Το Παράδειγμα 7.2.2 είναι ενδεικτικό της δύναμης του Θεωρήματος Αναδρομής, καθώς μας δείχνει ότι μπορεί να χρησιμοποιηθεί για να αποδείξουμε ότι η  $HP$  δεν ανήκει στο  $REC$ , χωρίς να χρειαστεί να κάνουμε διαγωνιοποίηση! Βέβαια στην πραγματικότητα, αντί για διαγωνιοποίηση χρησιμοποιήσαμε αυτοαναφορά, μία έννοια που στη λογική ταυτίζεται συχνά με το διαγώνιο επιχείρημα του Cantor (και όπως προείπαμε και με τα Θεωρήματα Σταθερού Σημείου).

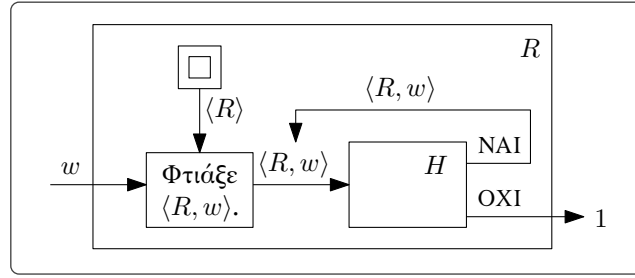
**Πόρισμα 7.2.3.** Έστω υπολογίσιμη συνάρτηση  $f : \{0, 1\}^* \rightarrow \{0, 1\}^*$ . Υπάρχει ΤΜ  $R$  που υπολογίζει την  $f$  και «χρησιμοποιεί<sup>1</sup>» κατά τον υπολογισμό την  $\langle R \rangle$ .

Πράγματι, αρκεί να θεωρήσουμε τη συνάρτηση  $t : \{0, 1\}^* \times \{0, 1\}^* \rightarrow \{0, 1\}^*$  με  $t(x, y) = f(y)$ , καθώς από το Θεώρημα 7.2.1 (αφού η  $t$  προφανώς είναι υπολογίσιμη) παίρνουμε ΤΜ  $R$  τέτοια ώστε για κάθε  $y \in \{0, 1\}^*$  να ισχύει ότι  $\phi_R(y) = t(\langle R \rangle, y) = f(y)$ <sup>2</sup>.

Στην απόδειξη του παραπάνω Πορίσματος η συνάρτηση  $t$  (και κατ' επέκταση η ΤΜ  $T$  που την υπολογίζει) δεν εκμεταλλευόταν την  $\langle R \rangle$ , απλά την παρήγαγε. Τίποτα δεν μας

<sup>1</sup> Εδώ ο όρος «χρησιμοποιεί» εκφράζει το γεγονός ότι η  $R$  κατά την διάρκεια του υπολογισμού της παράγει την  $\langle R \rangle$ .

<sup>2</sup> Πιο αναλυτικά: Έστω  $M_f$  η ΤΜ που υπολογίζει την  $f$  και  $T$  η ΤΜ που υπολογίζει την  $t$  (απλά τρέχει την  $M_f$  για τη δεύτερη είσοδο). Τότε η ζητούμενη  $R$  είναι η  $P_{\langle AT \rangle}AT$  (η υπορουτίνα  $P_{\langle AT \rangle}A$  παράγει την  $\langle R \rangle$ ).



**Σχήμα 7.2.3:** Η ΤΜ του Παραδείγματος 7.2.5, όπου  $H$  η ΤΜ που (υποθετικά) αποφασίζει την  $HP$ .

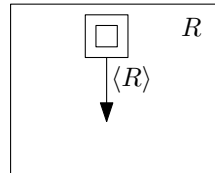
εμποδίζει φυσικά να ορίσουμε πιο σύνθετες συναρτήσεις  $t$  που θα κάνουν ουσιαστική χρήση της  $\langle R \rangle$ . Θα δούμε αρκετά παραδείγματα σε αυτό το κεφάλαιο.

**Πόρισμα (του Πορίσματος 7.2.3).** Έστω γλώσσα  $L \in RE$ . Υπάρχει ΤΜ  $R$  με  $L(R) = L$  που «χρησιμοποιεί» στον υπολογισμό της την  $\langle R \rangle$ <sup>1</sup>.

Αν κοιτάξουμε προσεκτικά την απόδειξη του Θεωρήματος 7.2.1 θα δούμε ότι η ΤΜ  $R$  (με άλλα λόγια η  $P_{\langle AT \rangle} AT$ ) πρώτα δημιουργεί την  $\langle R \rangle$  (δηλαδή την  $\langle P_{\langle AT \rangle} AT \rangle$ ), μέσω της υπορουτίνας  $P_{\langle AT \rangle} A$  και έπειτα τη χρησιμοποιεί για να υπολογίσει την  $t(\langle R \rangle, x)$  (δίνοντάς την ως είσοδο στην  $T$  μαζί με την  $x$ ). Το γεγονός αυτό αποτελεί την έμπνευση του ακόλουθου συμβολισμού.

**Συμβολισμός 7.2.4 (Κουτάκια, συνέχεια...).**

8. Όταν χρησιμοποιούμε το Θεώρημα Αναδρομής κατά τον σχεδιασμό μίας ΤΜ θα γράφουμε:



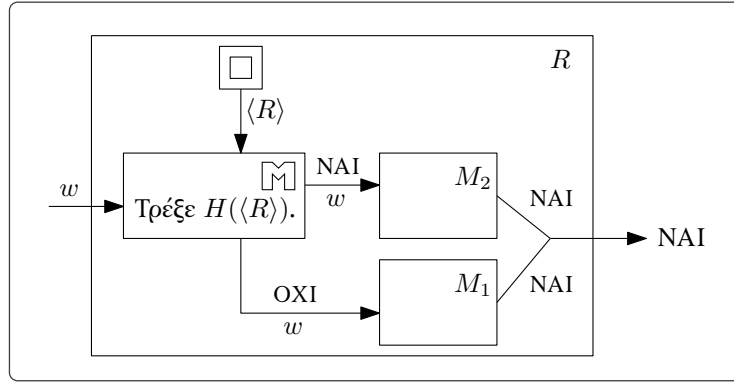
**Παράδειγμα 7.2.5** (Το Παράδειγμα 7.2.2 με τον παραπάνω συμβολισμό). Θωρούμε την ΤΜ  $R$  του Σχήματος 7.2.3 και παρατηρούμε ότι για  $w \in \{0, 1\}^*$ :

$$R(w) \downarrow \Leftrightarrow H(\langle R, w \rangle) \downarrow_{q_{\text{όχι}}} \Leftrightarrow R(w) \uparrow$$

που είναι άτοπο.

Προς αποφυγήν παρεξηγήσεων πρέπει να τονίσουμε ότι για την παραπάνω απόδειξη (και για όσες ακολουθούν) δεν χρησιμοποιούμε το Πόρισμα 7.2.3 (και το πόρισμά του)

<sup>1</sup> Δες Άσκηση 7.1.



Σχήμα 7.2.4: Η TM του Παραδείγματος 7.2.6.

αλλά κατευδείαν την απόδειξη του Θεωρήματος Αναδρομής: Ορίζουμε την TM  $T$  του Σχήματος 7.2.2 και έπειτα παίρνουμε ως  $R$  τη μηχανή  $P_{\langle AT \rangle} AT$  (το διπλό κουτάκι του Συμβολισμού 7.2.4 στην πραγματικότητα είναι η υπορουτίνα  $P_{\langle AT \rangle} A$ ). Οι αποδείξεις των Παραδειγμάτων 7.2.2 και 7.2.5 βασίζονται σε ακριβώς τα ίδια επιχειρήματα, όμως ο Συμβολισμός 7.2.4 απλοποιεί αρκετά την παρουσίαση.

**Παράδειγμα 7.2.6** (Εναλλακτική απόδειξη του Θεωρήματος 6.1.1).

( $\Rightarrow$ ) Έστω ιδιότητα  $\mathcal{P} \subseteq \text{RE}$  με  $\mathcal{P} \notin \{\emptyset, \text{RE}\}$  και γλώσσες  $L_1 \in \mathcal{P}$  και  $L_2 \in \text{RE} \setminus \mathcal{P}$ . Έστω επίσης ότι οι TM  $M_1, M_2$  ημι-αποφασίζουν τις  $L_1$  και  $L_2$  αντίστοιχα και (προς άτοπο) ότι η  $H$  αποφασίζει την  $L_{\mathcal{P}}$ . Παρατηρούμε ότι για την TM του Σχήματος 7.2.4 ισχύει ότι:

- $\langle R \rangle \in L_{\mathcal{P}} \Rightarrow H(\langle R \rangle) \downarrow_{q_{\text{ναί}}} \Rightarrow L(R) = L(M_2) = L_2 \notin \mathcal{P} \Rightarrow \langle R \rangle \notin L_{\mathcal{P}}$
- $\langle R \rangle \notin L_{\mathcal{P}} \Rightarrow H(\langle R \rangle) \downarrow_{q_{\text{όχι}}} \Rightarrow L(R) = L(M_1) = L_1 \in \mathcal{P} \Rightarrow \langle R \rangle \in L_{\mathcal{P}}$

που είναι άτοπο.

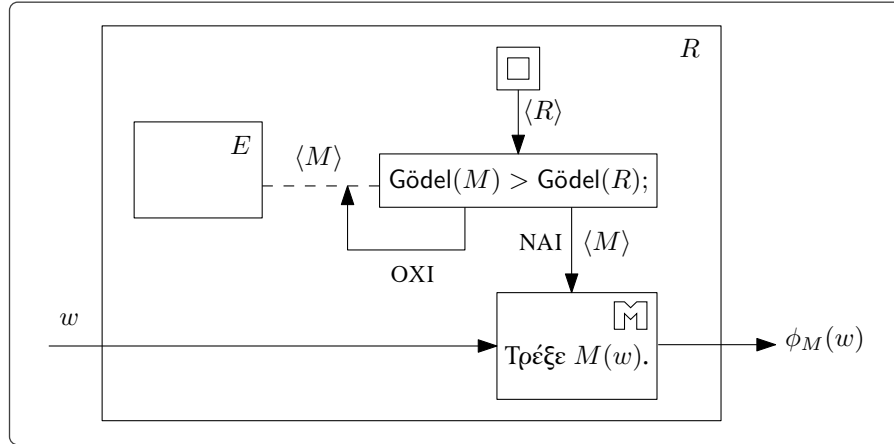
Θα κλείσουμε τα παραδείγματα εφαρμογών του Θεωρήματος Αναδρομής ορίζοντας μία πολύ ενδιαφέρουσα κλάση TM: Υπάρχουν αριθμησίμως άπειρες TM που αναγνωρίζουν μια γλώσσα  $L \in \text{RE}$ , απ' όλες αυτές, ακριβώς μία έχει τη *βραχύτερη-συντομότερη «περιγραφή»*.

**Ορισμός 7.2.7.** Μία TM  $M$  καλείται *βραχύτατη TM* ανν για κάθε  $i \in \mathbb{N}$  με  $i < \text{Gödel}(M)$  ισχύει ότι  $\phi_{M_i} \neq \phi_M$ , όπου  $M_i$  η TM με αριθμό Gödel  $i$ . Ορίζουμε επίσης τη γλώσσα  $L_{\text{Βραχύτατες}} = \{\langle M \rangle \in \{0, 1\}^* \mid M \text{ βραχύτατη TM}\}$ .

Παρατηρήστε ότι η  $L_{\text{Βραχύτατες}}$  περιέχει τις βραχύτερες κωδικοποιήσεις TM που αναγνωρίζουν τις γλώσσες στο RE. Θα δείξουμε ότι αυτή η γλώσσα δεν είναι αναδρομικά απαριθμήσιμη.

**Λήμμα 7.2.8.** Η γλώσσα  $L_{\text{Βραχύτατες}}$  είναι άπειρη.

*Απόδειξη.* Έστω (προς άτοπο) ότι  $L_{\text{Βραχύτατες}} = \{\langle M_1 \rangle, \langle M_2 \rangle, \dots, \langle M_n \rangle\}$  για κάποιο  $n \in \mathbb{N}$ .



Σχήμα 7.2.5: Η ΤΜ της Πρότασης 7.2.9.

Παρατηρούμε ότι υπάρχει πεπερασμένη γλώσσα  $L \notin \{L(M_1), L(M_2), \dots, L(M_n)\}$ <sup>1</sup>. Συνεπώς η βραχύτατη ΤΜ που αποφασίζει την  $L$  θα έπρεπε να είναι μία εκ των  $M_1, M_2, \dots, M_n$ . Άτοπο.  $\square$

**Πρόταση 7.2.9.**  $L_{\text{Βραχύτατες}} \notin \text{RE}$ .

*Απόδειξη.* Έστω (προς άτοπο) ότι  $L_{\text{Βραχύτατες}} \in \text{RE}$  και ότι ο απαριθμητής  $E$  την απαριθμεί. Θεωρούμε την ΤΜ  $R$  του Σχήματος 7.2.5 και παρατηρούμε ότι ο  $E$  κάποτε θα επιστρέψει μία ΤΜ  $M$  με  $\text{Gödel}(M) > \text{Gödel}(R)$ , καθώς η  $L_{\text{Βραχύτατες}}$  είναι άπειρη (Λήμμα 7.2.8). Οπότε θα έχουμε:

$$\left. \begin{array}{l} \phi_R = \phi_M \\ \langle M \rangle \in L_{\text{Βραχύτατες}} \end{array} \right\} \Rightarrow \text{Gödel}(M) \leq \text{Gödel}(R)$$

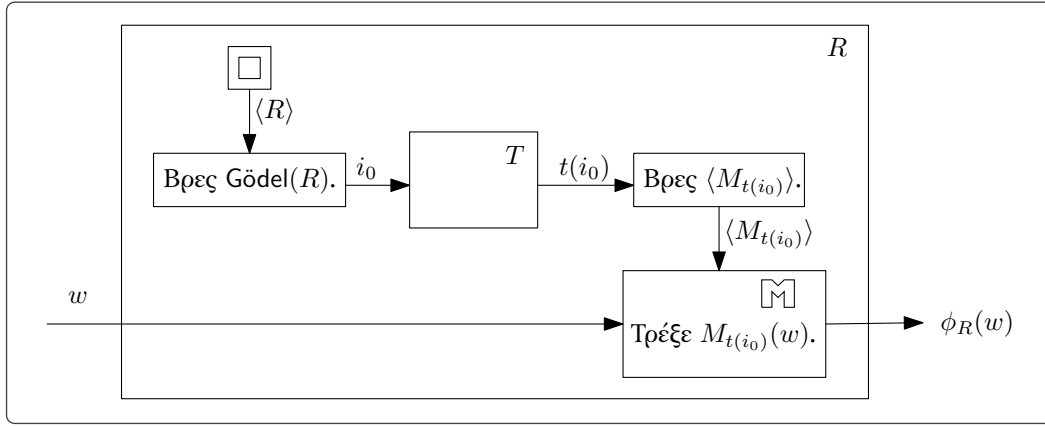
που είναι άτοπο.  $\square$

### 7.3 Το Πρώτο Θεώρημα Μη-πληρότητας του Gödel

Στόχος μας εδώ είναι η απόδειξη του περιβόητου (Πρώτου) Θεωρήματος Μη-πληρότητας (Θεώρημα 7.3.7). Προς αυτό θα χρειαστούμε κάποιες έννοιες και αποτελέσματα που θα μας βοηθήσουν επίσης στο να καταλάβουμε βαθύτερα το Θεώρημα Αναδρομής και το «εργαλείο» της αυτοαναφοράς.

**Ορισμός 7.3.1.** Μετασχηματισμός ΤΜ είναι οποιαδήποτε συνάρτηση  $t : \mathcal{G} \rightarrow \mathcal{G}$  (δες Ορισμό 1.4.11).

<sup>1</sup> Παρατηρήστε ότι ακριβώς μία από τις  $L(M_1), \dots, L(M_n)$  μπορεί να είναι η  $\{0, 1\}^*$ , έστω χωρίς βλάβη της γενικότητας ότι είναι η  $M_1$  (η περίπτωση όπου καμία από τις  $L(M_1), \dots, L(M_n)$  δεν είναι η  $\{0, 1\}^*$  καλύπτεται από τα επιχειρήματα που θα ακολουθήσουν). Συνεπώς υπάρχουν λέξεις  $w_2 \notin L(M_2), \dots, w_n \notin L(M_n)$ . Παρατηρήστε ότι  $L = \{w_2, \dots, w_n\} \notin \{L(M_1), L(M_2), \dots, L(M_n)\}$ .



**Σχήμα 7.3.1:** Η TM που «αποτελεί» σταθερό σημείο για τον μετασχηματισμό  $t$ .

Για τους σκοπούς αυτής της παραγράφου μας βολεύει να περάσουμε πάλι στον «κόσμο» των φυσικών αριθμών και των υπολογίσιμων αριθμητικών συναρτήσεων. Για παράδειγμα ο παραπάνω ορισμός μπορεί να εκφραστεί πιο απλά, αν αντί για την κωδικοποίηση μιας TM χρησιμοποιήσουμε τον αριθμό Gödel της.

**Ορισμός 7.3.2.** Μετασχηματισμός TM είναι οποιαδήποτε συνάρτηση  $t : \mathbb{N} \rightarrow \mathbb{N}$ .

**Ορισμός 7.3.3.** Έστω μετασχηματισμός  $t : \mathbb{N} \rightarrow \mathbb{N}$ . Το  $i_0 \in \mathbb{N}$  είναι σταθερό σημείο του  $t$  αν οι TM με αριθμούς Gödel  $i_0$  και  $t(i_0)$  είναι ισοδύναμες (δες Ορισμό 1.2.14).

Χάριν συντομίας σε όσα έπονται θα συμβολίζουμε με  $M_i$  την TM με αριθμό Gödel  $i$  και με  $\phi_i$  τη συνάρτηση που υπολογίζει (την  $\phi_{M_i}$  δηλαδή). Συνεπώς, μπορούμε πιο απλά να πούμε ότι το  $i_0$  θα είναι σταθερό σημείο του μετασχηματισμού  $t$  αν  $\phi_{i_0} = \phi_{t(i_0)}$ .

**Θεώρημα 7.3.4** (Θεώρημα Σταθερού Σημείου). Κάθε πλήρης και υπολογίσιμος μετασχηματισμός TM έχει σταθερό σημείο.

*Απόδειξη.* Έστω  $T$  η TM που υπολογίζει τον μετασχηματισμό  $t$ . Παρατηρούμε ότι αν η TM  $R$  του Σχήματος 7.3.1 έχει αριθμό Gödel  $i_0$  τότε  $\phi_R = \phi_{i_0} = \phi_{t(i_0)}$ .  $\square$

Το Θεώρημα 7.3.4 θα το συναντήσετε στη βιβλιογραφία ως *Θεώρημα Σταθερού Σημείου του Rogers*. Ας δούμε ένα παράδειγμα εφαρμογής του.

**Πρόταση 7.3.5.** Για κάθε πλήρη, υπολογίσιμο, 1-1 και επί μετασχηματισμό  $t : \mathbb{N} \rightarrow \mathbb{N}$  υπάρχει  $i_0 \in \mathbb{N}$  τέτοιο ώστε  $\phi_{t(i_0)} = \phi_{t(i_0)+1}$ <sup>1</sup>.

*Απόδειξη.* Αφού η  $t$  είναι 1-1 και επί έπεται ότι αντιστρέφεται. Θεωρούμε τη συνάρτηση  $\sigma : \mathbb{N} \rightarrow \mathbb{N}$  με  $\sigma(x) = t(t^{-1}(x) + 1)$ . Από την Πρόταση 1.2.12 προκύπτει ότι η  $\sigma$  είναι

<sup>1</sup> Δηλαδή οι TM με αριθμούς Gödel  $t(i_0)$  και  $t(i_0) + 1$  είναι ισοδύναμες.

υπολογίσιμη ως σύνθεση υπολογίσιμων συναρτήσεων και (προφανώς) πλήρης, άρα μπορούμε να εφαρμόσουμε το Θεώρημα 7.3.4 και να πάρουμε  $j_0 \in \mathbb{N}$  τέτοιο ώστε:

$$\phi_{j_0} = \phi_{\sigma(j_0)} \quad (7.1)$$

Παρατηρούμε ότι το  $i_0 = t^{-1}(j_0)$  έχει τη ζητούμενη ιδιότητα καθώς:

$$\phi_{\sigma(j_0)} = \phi_{t(t^{-1}(j_0)+1)} = \phi_{t(i_0+1)}$$

και

$$\phi_{j_0} = \phi_{t(t^{-1}(j_0))} = \phi_{t(i_0)}$$

άρα από την (7.1) έπεται ότι  $\phi_{t(i_0)} = \phi_{t(i_0+1)}$ . □

*Fun fact:* Το Θεώρημα Σταθερού Σημείου είναι ισοδύναμο με το Θεώρημα Αναδρομής (δες Ασκήσεις 7.9 και 7.11). Για λόγους πληρότητας θα αναδιατυπώσουμε το Θεώρημα 7.2.1 χρησιμοποιώντας τον συμβολισμό αυτής της παραγράφου.

**Θεώρημα 7.3.6.** Για κάθε υπολογίσιμη συνάρτηση  $t : \mathbb{N}^2 \rightarrow \mathbb{N}$  υπάρχει  $i \in \mathbb{N}$  (αριθμός Gödel TM δηλαδή) τέτοιο ώστε για κάθε  $x \in \mathbb{N}$ :

$$\phi_i(x) = t(i, x)$$

Η παραπάνω μορφή του Θεωρήματος Αναδρομής θα μας φανεί χρήσιμη στην απόδειξη του Θεωρήματος Μη-πληρότητας. Για τη διατύπωση και απόδειξη αυτού του Θεωρήματος θα χρειαστούμε κάποιες έννοιες από την πρωτοβάθμια λογική. Ο αναγνώστης που δεν είναι εξοικειωμένος με αυτή θα πρέπει να ανατρέξει στο Παράρτημα Α προτού συνεχίσει τη μελέτη του.

**Θεώρημα 7.3.7** (1<sup>ο</sup> Θεώρημα Μη-πληρότητας Gödel). Υπάρχει πρόταση  $\varphi$  της  $\Gamma_1^{\text{θα}}$  τέτοια ώστε αν το  $P$  είναι συνεπές τότε  $P \not\models \varphi$  και  $P \not\models \neg\varphi$ <sup>1</sup>.

*Απόδειξη.* Έστω ότι το  $P$  είναι συνεπές και έστω (προς άτοπο) ότι για κάθε πρόταση  $\varphi$  της  $\Gamma_1^{\text{θα}}$  ισχύει ότι είτε  $P \vdash \varphi$  είτε  $P \vdash \neg\varphi$ .

Θυμηθείτε ότι η συνάρτηση που υπολογίζει μία TM είναι ελαχιστικά αναδρομική (Θεώρημα 2.5.1). Θα συμβολίζουμε με  $f_i$  την ελαχιστικά αναδρομική συνάρτηση που ορίζει η  $\phi_i$  (η συνάρτηση δηλαδή που υπολογίζει η TM με αριθμό Gödel  $i$ ). Από το Θεώρημα A.5.6

<sup>1</sup> Στην κλασική απόδειξη ο Gödel κατασκεύασε μια πρόταση  $\varphi$  που έφερε το νόημα «Εγώ δεν αποδεικνύομαι στο  $P$ », βασιζόταν δηλαδή στην αυτοαναφορά (εκφρασμένη φυσικά μέσω ενός Θεωρήματος Σταθερού Σημείου). Για να ορίσει ο Gödel αυτήν την πρόταση χρειάστηκε να κωδικοποιήσει τους λογικούς τύπους (και τις ακολουθίες αυτών) σε φυσικούς αριθμούς, πράγμα απαραίτητο για να ορίσει την ελαχιστικά αναδρομική σχέση Proof (δες Πρόταση A.5.9). Η σχέση αυτή περιέχει τα ζευγάρια φυσικών αριθμών που αντιστοιχούν σε τυπική απόδειξη από το  $P$  και στην πρόταση που αποδεικνύει αυτή η απόδειξη. Με αυτόν τον τρόπο μπορούμε να μιλάμε για τυπικές αποδείξεις τύπων με κάτι πιο εύκολα «διαχειρίσιμο»: με φυσικούς αριθμούς αντί για πεπερασμένες ακολουθίες τύπων. Οπότε για να δείξουμε ότι η αυτοαναφορική πρόταση  $\varphi$  (που αναφέρθηκε πριν) δεν έχει απόδειξη θα πρέπει απλά να δείξουμε ότι δεν υπάρχει φυσικός αριθμός που να αντιστοιχεί σε απόδειξή της. Το επόμενο και τελευταίο βήμα είναι να δείξουμε ότι οι ελαχιστικά αναδρομικές σχέσεις είναι αναπαραστάσιμες (Ορισμός A.5.5) στο  $P$ , μπορούν δηλαδή να «εκφραστούν» με λογικούς τύπους.

η  $f_i$  είναι αναπαραστάσιμη στο  $P$ , δηλαδή υπάρχει τύπος  $\varphi_i(x, y)$  τέτοιος ώστε για κάθε  $x \in \mathbb{N}$ :

$$\begin{aligned} f_i(x) = y &\Rightarrow P \vdash \varphi_i(\underline{x}, \underline{y}) \\ f_i(x) \neq y &\Rightarrow P \vdash \neg \varphi_i(\underline{x}, \underline{y}) \end{aligned}$$

Θεωρούμε συνάρτηση  $g : \mathbb{N}^2 \rightarrow \mathbb{N}$  με:

$$g(i, j) = \begin{cases} 1 & , \text{ αν } P \vdash \forall y \neg \varphi_i(\underline{j}, y) \\ \perp & , \text{ αλλιώς} \end{cases}$$

(Παρατηρήστε ότι αν  $P \vdash \forall y \neg \varphi_i(\underline{j}, y)$ , αφού η πρόταση  $\varphi_i$  στην ουσία αναπαριστά τη  $\phi_i$ , τότε δεν υπάρχει η τιμή  $\phi_i(j)$  και κατ' επέκταση ο υπολογισμός  $M_i(j)$  δεν τερματίζει. Το γεγονός αυτό θα το αποδείξουμε και τυπικά σε λίγο.)

Η συνάρτηση  $g$  είναι υπολογίσιμη <sup>1</sup> από την ΤΜ  $M$  του Σχήματος 7.3.2, όπου  $M_{\chi_{\text{Proof}}}$  η ΤΜ που υπολογίζει τη χαρακτηριστική συνάρτηση της σχέσης Proof (δες Πρόταση Α.5.9 και φυσικά το Θεώρημα 2.5.1) και  $M_{TM \rightarrow \mu}$ ,  $M_{\mu \rightarrow \varphi}$  οι ΤΜ των Παρατηρήσεων 2.5.3 και Α.5.8 αντίστοιχα <sup>2</sup>. Συνεπώς από το Θεώρημα 7.3.6 <sup>3</sup> υπάρχει  $i_0 \in \mathbb{N}$  τέτοιο ώστε για κάθε  $j \in \mathbb{N}$ :

$$\phi_{i_0}(j) = g(i_0, j) \quad (7.2)$$

Εφόσον πήραμε τον αριθμό Gödel  $i_0$  μπορούμε πλέον να καταλήξουμε στη ζητούμενη πρόταση, η οποία είναι η:

$$\forall y \neg \varphi_{i_0}(\underline{j}, y)$$

Αφού το  $P$  έχει υποτεθεί συνεπές μπορεί να ισχύει ακριβώς ένα από τα ακόλουθα:

1.  $P \vdash \forall y \neg \varphi_{i_0}(\underline{j}, y)$
2.  $P \vdash \neg \forall y \neg \varphi_{i_0}(\underline{j}, y)$

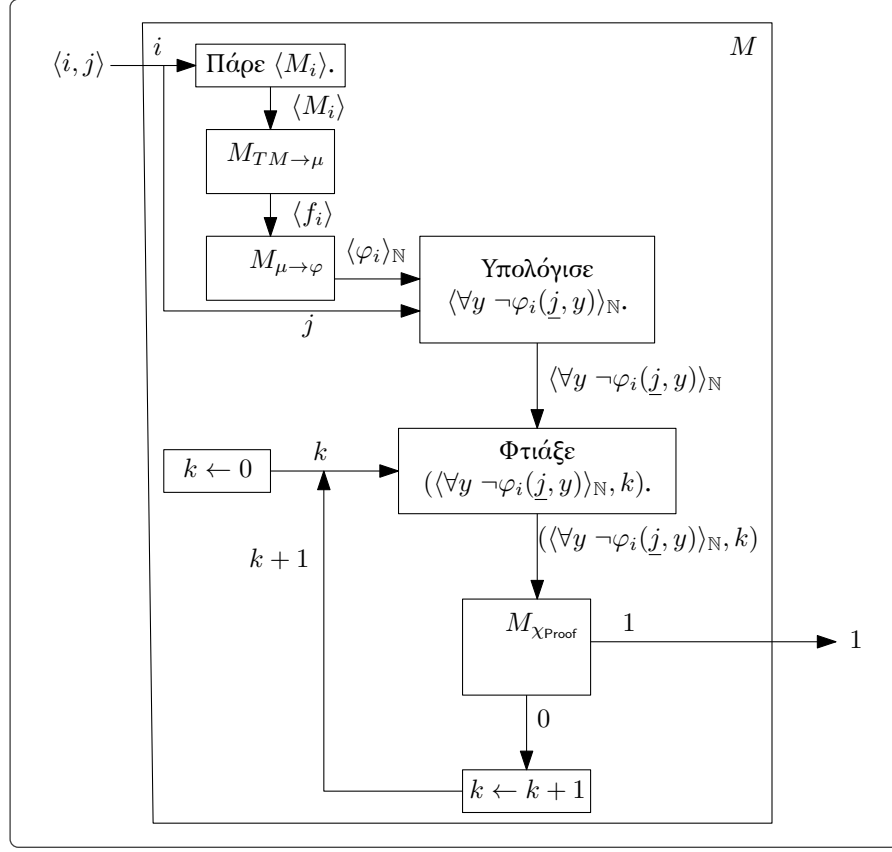
Σκοπός μας είναι να οδηγηθούμε σε άτοπο και στις δύο περιπτώσεις.

1. Έστω ότι  $P \vdash \forall y \neg \varphi_{i_0}(\underline{j}, y)$ . Από το Θεώρημα Εγκυρότητας (Θεώρημα Α.4.1) προκύπτει ότι  $P \models \forall y \neg \varphi_{i_0}(\underline{j}, y)$  και αφού  $\mathfrak{N} \models P$ , εφαρμόζοντας τον ορισμό του Tarski, προκύπτει ότι για κάθε  $n \in \mathbb{N}$  ισχύει ότι  $\mathfrak{N} \models \neg \varphi_{i_0}(\underline{j}, y/n)$ . Αν ίσχυε ότι  $\phi_{i_0}(j) = n$ , αφού η  $\varphi_{i_0}$  αναπαριστά την  $f_{i_0}$ , θα έπρεπε να ισχύει ότι  $P \vdash \varphi_{i_0}(\underline{j}, \underline{n})$ , άρα (από το

<sup>1</sup> Το βασικό συστατικό για να το πετύχουμε αυτό είναι η «κωδικοποίηση».

<sup>2</sup> Κάποιος υποψιασμένος αναγνώστης θα έχει σοβαρές ενστάσεις στο γεγονός αυτό: Εν ολίγης, αν μπορούμε να υπολογίσουμε την  $g$  τότε μπορούμε να αναγνωρίσουμε πότε μία ΤΜ τερματίζει για δοσμένη είσοδο (ελέγχοντας αν η τιμή της  $g$  είναι 1)! Σε αυτόν τον συλλογισμό όμως θεωρούμε δεδομένο ότι αν για κάποια  $i, j$  είναι αληθής η πρόταση  $\forall y \neg \varphi_i(\underline{j}, y)$  τότε θα ισχύει ότι  $P \vdash \forall y \neg \varphi_i(\underline{j}, y)$ , και ο λόγος φυσικά είναι η υπόθεσή μας (προς άτοπο) ότι για κάθε πρόταση  $\varphi$  ισχύει είτε  $P \vdash \varphi$  είτε  $P \vdash \neg \varphi$ . Ας παρακολουθήσουμε όμως τη συνέχεια της απόδειξης για να οδηγηθούμε και επισήμως στο άτοπο...

<sup>3</sup> Εδώ προσθέτουμε και την αυτοαναφορά στο μείγμα της απόδειξης.



**Σχήμα 7.3.2:** Η ΤΜ  $M$  που υπολογίζει τη συνάρτηση  $g$  στην απόδειξη του Θεωρήματος 7.3.7 (με  $\langle \varphi_i \rangle_{\mathbb{N}}$  συμβολίζουμε τον αριθμό Gödel της πρόταση  $\varphi_i$ , δες Παράγραφο Α.5.1).

Θεώρημα Εγκυρότητας) ότι  $\mathfrak{N} \models \varphi_{i_0}(\underline{j}, \underline{n})$ <sup>1</sup>. Συνεπώς ισχύει ότι  $\phi_{i_0}(j) \neq n$  για κάθε  $n \in \mathbb{N}$ , ή αλλιώς ότι  $\phi_{i_0}(j) = \perp$ .

Όμως, αφού  $P \vdash \forall y \neg \varphi_{i_0}(\underline{j}, y)$  έπεται ότι  $g(i_0, j) = 1$  και από την (7.2) έπεται ότι  $\phi_{i_0}(j) = 1$ , που είναι άτοπο.

2. Έστω ότι  $P \vdash \neg \forall y \neg \varphi_{i_0}(\underline{j}, y)$ . Τότε θα είχαμε ότι  $g(i_0, j) = \perp$ <sup>2</sup>. Οπότε λόγω της (7.2) θα ισχύει επίσης ότι  $\phi_{i_0}(j) = \perp$ . Θα δείξουμε, αντίστοιχα με πριν, ότι υπάρχει  $n \in \mathbb{N}$  τέτοιο ώστε  $\phi_{i_0}(j) = n$ , δηλαδή ότι  $\phi_{i_0}(j) \neq \perp$ , που είναι άτοπο.

Επικαλούμενοι το Θεώρημα Εγκυρότητας και εφαρμόζοντας τον ορισμό του Tarski καταλήγουμε ότι υπάρχει  $n \in \mathbb{N}$  τέτοιο ώστε  $\mathfrak{N} \models \varphi_{i_0}(\underline{j}, y/n)$ . Αν ίσχυε ότι  $\phi_{i_0}(j) \neq n$  τότε θα είχαμε  $P \vdash \neg \varphi_{i_0}(\underline{j}, \underline{n})$ , άρα  $\mathfrak{N} \models \neg \varphi_{i_0}(\underline{j}, \underline{n})$ . Συνεπώς υπάρχει  $n \in \mathbb{N}$  τέτοιο ώστε  $\phi_{i_0}(j) = n$ .  $\square$

<sup>1</sup> Το οποίο σημαίνει ότι  $\mathfrak{N} \models \varphi_{i_0}(\underline{j}, y/n)$  αφού το ψηφίο  $\underline{n}$  ερμηνεύεται στη  $\mathfrak{N}$  ως  $n \in \mathbb{N}$ .

<sup>2</sup> Παρατηρήστε ότι αφού  $P \vdash \neg \forall y \neg \varphi_{i_0}(\underline{j}, y)$  και το  $P$  έχει υποτεθεί συνεπές δεν μπορεί να ισχύει παράλληλα ότι  $P \vdash \forall y \neg \varphi_{i_0}(\underline{j}, y)$ .

**Παρατήρηση 7.3.8.** Η απόδειξη του Θεωρήματος 7.3.7 μας δείχνει ότι υπάρχει ΤΜ (ή  $M_{i_0}$ ) για την οποία δεν μπορούμε να αποδείξουμε (στην  $\Gamma_1^{\text{θα}}$ ) ότι για δεδομένη είσοδο τερματίζει, ούτε να αποδείξουμε ότι δεν τερματίζει.

**Παρατήρηση 7.3.9.** Έστω  $\varphi$  η πρόταση του Θεωρήματος 7.3.7. Αφού προφανώς μία εκ των  $\varphi, \neg\varphi$  είναι αληθής στην προτιθέμενη ερμηνεία  $\mathcal{M}$  της  $\Gamma_1^{\text{θα}}$ , το Θεώρημα 7.3.7 αποδεικνύει ότι υπάρχουν αληθείς προτάσεις των μαθηματικών που χρησιμοποιούμε (που φυσικά εμπεριέχουν την αριθμητική Peano) οι οποίες δεν μπορούν να αποδειχτούν. Μία πιθανή λύση σε αυτό το «πρόβλημα» θα ήταν να διαλέξουμε μία εκ των  $\varphi, \neg\varphi$  και να την εντάξουμε ως αξίωμα στο  $P$ . Και πάλι όμως θα μπορούσαμε να επαναλάβουμε την απόδειξη του Θεωρήματος 7.3.7 και να βρούμε άλλη πρόταση με αυτήν την ιδιότητα...

Παρόλο που η πρόταση  $\varphi$  του Θεωρήματος 7.3.7 φαίνεται να είναι «κατασκευασμένη» και δε μοιάζει στις προτάσεις των μαθηματικών που έχουμε συνηθίσει, η Μη-πληρότητα της αριθμητικής Peano (και κατ' επέκταση όλων των μαθηματικών που την περιέχουν) δεν αφορά μόνο κατασκευασμένες προτάσεις. Δυστυχώς υπάρχουν προτάσεις με καθαρά «μαθηματικό περιεχόμενο», όχι προτάσεις που προέκυψαν από μια διαδικασία παρόμοια με την απόδειξη του Θεωρήματος Μη-πληρότητας, που απασχολούσαν τους μαθηματικούς καιρό και τελικά αποδείχθηκαν «μη αποδείξιμες».

**Σημείωση 7.3.10.** Το Θεώρημα 7.3.7 στην ουσία αποδεικνύει ότι το  $P$  (που περιέχει μόνο τα στοιχειώδη αξιώματα της αριθμητικής) δεν είναι τυπικά πλήρες. Σε αυτήν τη διαπίστωση οδηγούμαστε αν υποθέσουμε ότι το  $P$  είναι συνεπές<sup>1</sup>. Είναι όμως το  $P$  τελικά συνεπές; Σε αυτό το ερώτημα ο Kurt Gödel έδωσε (πάλι) μία «δυσάρεστη» απάντηση για τους μαθηματικούς: Το 2<sup>ο</sup> Θεώρημα Μη-πληρότητας δείχνει ότι δεν μπορεί να αποδειχθεί από το  $P$  η συνέπειά του. Αυτό σημαίνει ότι δεν μπορούμε (με στοιχειώδεις μεθόδους) να αποδείξουμε τη συνέπεια του  $P$ .

## 7.4 Μπορούν οι μηχανές να σκέφτονται;

Ο Alan Turing το 1950 πρότεινε το λεγόμενο *τεστ του Turing* ως απάντηση σε αυτό το ερώτημα. Το τεστ αυτό στην ουσία αποτελεί ένα πείραμα που έχει ως σκοπό να αποδείξει αν ένας αλγόριθμος έχει τη δυνατότητα να φέρνει εις πέρας «συλλογισμούς» πέρα από «υπολογισμούς». Συνήθως απαντάτε στη βιβλιογραφία με το πιο περιγραφικό όνομα *παιχνίδι μίμησης*, καθώς η αρχική μορφή του ήταν η ακόλουθη ([13]):

*Το παιχνίδι παίζεται μεταξύ τριών παικτών, όπου: Ο παίκτης Α είναι άντρας, ο παίκτης Β είναι γυναίκα και το φύλλο του παίκτη Γ δεν έχει σημασία. Ο παίκτης Γ (ο «ανακριτής») ανταλλάσσει γραπτά μηνύματα με τους παίκτες Α, Β (οι οποίοι δεν επικοινωνούν μεταξύ τους) θέτοντάς τους ερωτήματα με σκοπό να εξακριβώσει ποιος από τους δύο είναι η γυναίκα<sup>2</sup>. Από την πλευρά τους,*

<sup>1</sup> Αν δεν είναι συνεπές τότε προφανώς είναι τυπικά πλήρες: Αφού θα μπορούμε να αποδείξουμε έναν τύπο και την άρνησή του θα μπορούμε να αποδείξουμε μία αντίφαση και ως συνέπεια θα μπορούμε να αποδείξουμε όλους τους λογικούς τύπους.

<sup>2</sup> Προφανώς ο Γ δεν έχει οπτική επαφή με τους Α και Β.

*οι παίκτες A,B προσπαθούν (και οι δύο) να πείσουν τον Γ ότι είναι η γυναίκα, δίνοντας κατάλληλες απαντήσεις*<sup>1</sup>.

Προφανώς το αν ο παίκτης Γ θα μαντέψει σωστά, ή αν τελικά θα παραπλανηθεί, εξαρτάται άμεσα από την εκάστοτε τριάδα παικτών<sup>2</sup>. Άρα έχει νόημα να κρατήσουμε στατιστικά δεδομένα από ένα ικανοποιητικό δείγμα παρτίδων και να καταλήξουμε σε ένα ποσοστό επιτυχίας.

Ο υπό εξέταση αλγόριθμος συμμετέχει στο τεστ παίρνοντας τη θέση του παίκτη Α. Το πείραμα επαναλαμβάνεται (διατηρώντας όλες τις άλλες συνθήκες ανέπαφες) με σκοπό να παρατηρηθούν οι αλλαγές στα αποτελέσματα και γενικά στο ποσοστό σωστής επιλογής του «ανακριτή». Αν το ποσοστό δεν αυξηθεί τότε μπορούμε με ασφάλεια να συμπεράνουμε ότι ο αλγόριθμος μπορεί να «μιμηθεί» μέσω των απαντήσεών του μία γυναίκα το ίδιο καλά (αν όχι καλύτερα) απ' ότι μπορεί να το κάνει ένας άντρας<sup>3</sup>.

Το παραπάνω τεστ προτάθηκε ως μία εναλλακτική προσέγγιση στο ερώτημα αν οι μηχανές μπορούν να σκέφτονται. Αυτή η προσέγγιση είχε το πλεονέκτημα ότι αποτελούσε ένα σαφώς ορισμένο πείραμα, που μπορούσε να δώσει μετρήσιμα αποτελέσματα. Όπως ήταν αναμενόμενο όμως δέχθηκε έντονη (και εύλογη) κριτική. Προτού αναλύσουμε μερικά από τα καίρια σημεία της κριτικής αυτής ας δούμε μία απλοποιημένη (και πολιτικά ορθή) μορφή του τεστ:

*Οι παίκτες B,Γ είναι άνθρωποι ενώ ο Α αλγόριθμος. Σκοπός του Γ είναι να εξακριβώσει ποιος από τους A,B είναι άνθρωπος.*

Ακόμα απλούστερες μορφές του συναντάμε καθημερινά κατά την περιήγησή μας στο διαδίκτυο, όπου μία ιστοσελίδα (ένας αλγόριθμος δηλαδή) προσπαθεί να εξακριβώσει αν είμαστε άνθρωπος ή ρομπότ (αυτά τα τεστ συχνά αναφέρονται ως *αντεστραμμένα τεστ Turing*)<sup>4</sup>.

Μερικές ενστάσεις στην ορθότητα αυτού του επιστημονικού πειράματος ήταν οι ακόλουθες:

- Το τεστ βασίζεται απόλυτα στην έννοια της *παραπλάνησης*. Οι αλγόριθμοι θα πρέπει να εκπαιδευτούν λοιπόν στο να δίνουν εσκεμμένα λανθασμένες απαντήσεις (κόντρα στην ιδανική εικόνα που είχαμε στο μυαλό περί αλγορίθμων)<sup>5</sup>. Συνεπώς θα πρέπει να υπάρχουν δύο διακριτοί τρόποι λειτουργίας του αλγορίθμου: Ένας «παραπλανητικός» ούτως ώστε να περάσει το τεστ και ένας «κανονικός» για να μπορεί να αξιοποιηθεί στις διάφορες εφαρμογές (αλίμονο αν ο αλγόριθμος συνεχίσει να παραπλανά ενώ του έχει

<sup>1</sup> Να τονίσουμε εδώ ότι ο Α προσπαθεί να παραπλανήσει τον Γ και ως συνέπεια οι απαντήσεις που θα δίνει δεν θα είναι κατ' ανάγκη αληθείς. Ψευδείς απαντήσεις μπορεί να δώσει φυσικά και ο παίκτης Β.

<sup>2</sup> Επίσης μεγάλη σημασία έχει η χρονική διάρκεια της κάθε παρτίδας του παιχνιδιού ή το πλήθος των ερωτήσεων που θα τεθούν.

<sup>3</sup> Η επιλογή των φύλλων προφανώς δεν έχει κάποια ιδιαίτερη σημασία.

<sup>4</sup> Σε αντίθεση με τα αντεστραμμένα τεστ Turing, ένα σημαντικό σημείο σε όλες τις άλλες παραλλαγές είναι η ύπαρξη ενός ατόμου αναφοράς, το οποίο χρησιμοποιείται για να γίνονται συγκρίσεις: Ο παίκτης Γ προσπαθεί να μαντέψει τον σωστό παίκτη συγκρίνοντας τις απαντήσεις που έδωσαν οι δύο παίκτες (όχι αποκλειστικά και μόνο από τις απαντήσεις που έδωσε ένας παίκτης).

<sup>5</sup> Το τεστ θα αποτελούσε απόλυτη αποτυχία αν ο παίκτης Γ ρωτούσε ποιο ήταν το αποτέλεσμα μίας τεράστιας αριθμητικής παράστασης και ο παίκτης Α (ο αλγόριθμος) έδινε σωστή απάντηση ενώ ο Β (ο άνθρωπος) όχι.

ζητηθεί να ελέγξει παραδείγματος χάρη τα συμπτώματα ενός ασθενή για να καταλήξει σε διάγνωση).

- Πολλοί θα ενίστανται στο ότι η ικανότητα ενός αλγορίθμου να παραπλανά αποτελεί απόδειξη της δυνατότητας σκέψης. Το πιο γνωστό επιχείρημα ενάντια σε αυτήν την άποψη είναι το λεγόμενο *κινέζικο δωμάτιο*:

*Ας υποθέσουμε ότι το τεστ διεξάγεται στα κινέζικα. Αν ο αλγόριθμος περάσει το τεστ τότε για πολλούς θα αποτελούσε απόδειξη ότι ο αλγόριθμος υπό μία έννοια καταλαβαίνει κινέζικα. Υποθέστε όμως ότι στη θέση του αλγορίθμου βρισκόταν για παράδειγμα ο υποφαινόμενος (που δεν μπορεί να ξεχωρίσει τα κινέζικα ιδεογράμματα από τις μουντζούρες ενός τριχρόνου παιδιού), ο οποίος με ένα κατάλληλο φωτογραφικό εγχειρίδιο μπορούσε να φέρει εις πέρας το τεστ. Αυτό επ' ουδενί λόγω δεν σημαίνει ότι ο υποφαινόμενος έχει την ικανότητα να κατανοεί κινέζικα. Απλά έχει την ικανότητα (μέσω του εγχειριδίου) να εξαπατά τους ανθρώπους.*

- Ίσως η σοβαρότερη ένσταση έγκειται στο γεγονός ότι η ανθρώπινη σκέψη είναι απόρροια μίας μηχανιστικής διαδικασίας. Δηλαδή, εν ολίγης, με τα κατάλληλα αισθητήρια όργανα (κάμερες, μικρόφωνα, αισθητήρες αφής κ.λπ.), την κατάλληλη μνήμη (σύνολο από διαδέσιμα δεδομένα που ομοιάζουν με τα δεδομένα που βρίσκονται στο μυαλό ενός ανθρώπου) και άπλετους (αλλά πάντα πεπερασμένους) υπολογιστικούς πόρους θα μπορούσε μια μηχανή να σκεφθεί σαν άνθρωπος. Πολλοί υποστηρίζουν ότι τα Θεωρήματα 5.2.1 και 7.3.7 αποτελούν ένδειξη ότι αυτό δεν ισχύει, καθώς αποδεικνύουν ότι υπάρχουν όρια στις δυνατότητες των μηχανών ([15]). Στον αντίποδα, άλλοι (ανάμεσά τους και ο ίδιος ο Turing) αντιτάσσουν σε αυτό το επιχείρημα το γεγονός ότι μάλλον υπάρχουν όρια και στην ανθρώπινη σκέψη!

Δεν θα συζητήσουμε εδώ τις φιλοσοφικές προεκτάσεις που έχει το τεστ του Turing (περισσότερα μπορείτε να βρείτε στο [14]). Σκοπός μας είναι να συνδέσουμε το ερώτημα αν μπορούν οι μηχανές να σκέπτονται με τις πρόσφατες εξελίξεις στο πεδίο της *τεχνητής νοημοσύνης*, που ήδη έχουν προκαλέσει αλλαγές στον τρόπο που λειτουργούμε σε καθημερινή βάση. Το τεστ χρησιμοποιήθηκε συχνά κατά το παρελθόν για να ελέγξει την ισχύ ενός αλγορίθμου τεχνητής νοημοσύνης και για να εκτιμηθεί το κατά πόσον αυτός είναι ικανός να «παράγει σκέψη». Μέχρι πρότινος δεν υπήρξε αλγόριθμος που να έδινε αποτελεσματικά ποσοστά επιτυχίας στο τεστ. Μάλιστα αυτό είχε ως συνέπεια να διαφευσθεί η πρόβλεψη που είχε δώσει ο Turing το 1950 (στο [13]):

*...I believe that in about fifty years' time, it will be possible to programme computers with a storage capacity of about  $10^9$ , to make them play the imitation game so well that an average interrogator will not have more than 70 percent chance of making the right identification after five minutes of questioning...*

Πολλοί θεωρούσαν ότι το τεστ ήταν πολύ δύσκολο και αδικούσε στην ουσία τους αλγόριθμους. Η πραγματικότητα όμως είναι ότι οι τελευταίες εκδόσεις των *Chatbot* έχουν τη

δυνατότητα να περνούν διάφορες μορφές του τεστ του Turing (με πρώτο το *ChatGPT* το έτος 2023 [16, 17]), και πλέον τα τεστ που χρησιμοποιούνται είναι ακόμα πιο απαιτητικά!

Συμπερασματικά, έχουμε φτάσει στην εποχή όπου οι μηχανές όντως μπορούν να συμπεριφέρονται σαν άνθρωποι, ασχέτως του αν αυτό αποτελεί απόδειξη ότι έχουν τη δυνατότητα να παραγάγουν σκέψη ή όχι. Το ανησυχητικό είναι ότι από το έτος 2024 συστήματα τεχνικής νοημοσύνης κατάφεραν να ξεπεράσουν τη λεγόμενη *κόκκινη γραμμή*: Μπόρεσαν να αυτοαναπαραχθούν (υπό την έννοια που μελετήσαμε πρωτύτερα) χωρίς ανθρώπινη διαμεσολάβηση (δες [18]). Αυτό σημαίνει ότι από εδώ και στο εξής υπάρχει το ενδεχόμενο να μεταλλαχθούν ανεξέλεγκτα και να γίνουν τελικά *κακόβουλα* και, ως εκ τούτου, πιθανώς βλαβερά για την ανθρωπότητα.

## Ασκήσεις

**7.1 (★☆☆).** Αποδείξτε τυπικά ότι αν  $L \in \text{RE}$ , υπάρχει TM  $R$  με  $L(R) = L$  που «χρησιμοποιεί» στον υπολογισμό της την  $\langle R \rangle$ . Θα σας φανεί χρήσιμος ο Ορισμός 1.2.19, η Πρόταση 1.2.40 και το Πρόγραμμα 7.2.3.

**7.2 (★☆☆).** Βρείτε δύο διαφορετικές TM  $M$  και  $N$  τέτοιες ώστε για κάθε  $x \in \{0, 1\}^*$  να ισχύει ότι  $\phi_M(x) = \langle N \rangle$  και  $\phi_N(x) = \langle M \rangle$ .

**7.3 (★★☆).** Θεωρήστε τη γλώσσα:

$$L = \{ \langle M \rangle \in \{0, 1\}^* \mid \text{Για κάθε T.M. } M' \text{ ισχύει ότι αν } L(M) = L(M') \text{ τότε } |\langle M \rangle| \leq |\langle M' \rangle| \}$$

Δείξτε ότι δεν υπάρχει άπειρο αναδρομικά απαριθμήσιμο υποσύνολο της  $L$ .

**7.4 (★★☆).** Μια TM  $M$  ονομάζεται *ελαχιστική* αν κάθε TM  $M'$  με  $L(M') = L(M)$  έχει περισσότερες καταστάσεις από την  $M$  (θεωρούμε χωρίς βλάβη της γενικότητας ότι όλες οι TM έχουν ως αλφάβητο ταινίας το  $\{\triangleright, \sqcup, 0, 1\}$ ). Υπάρχει άπειρο, Αναδρομικά Απαριθμήσιμο σύνολο κωδικοποιήσεων ελαχιστικών TM;

**7.5 (★☆☆).** Έστω  $d(x)$  η βραχύτερη λέξη της μορφής  $\langle M, w \rangle$  όπου η TM  $M$  με είσοδο  $w$  τερματίζει γράφοντας  $x$  στην ταινία της. Δείξτε ότι η συνάρτηση  $K : \{0, 1\}^* \rightarrow \mathbb{N}$ , με  $K(x) = |d(x)|$ , δεν είναι υπολογίσιμη.

**7.6 (★★★).** Υπάρχει 1-1 και επί, πλήρης υπολογίσιμος μετασχηματισμός TM  $t : \mathbb{N} \rightarrow \mathbb{N}$  για τον οποίο δεν υπάρχει  $i \in \mathbb{N}$  τέτοιο ώστε  $\phi_{t(i)} = \phi_{t(i+1)} = \phi_{t(i+2)}$ ;

**7.7 (★★☆).** Έστω υπολογίσιμη συνάρτηση  $h : \mathbb{N}^2 \rightarrow \mathbb{N}$  και  $q \in \mathbb{N}$ . Δείξτε χρησιμοποιώντας το Θεώρημα 7.3.6 ότι υπάρχει συνάρτηση που ορίζεται μέσω της αναδρο-

μικής εξίσωσης:

$$\begin{cases} f(0) = q \\ f(y+1) = h(f(y), y) \end{cases}$$

που είναι υπολογίσιμη.

**7.8 (★☆☆).** (Θεώρημα  $S$ - $m$ - $n$  ή Παραμετροποίησης) Δείξτε ότι για κάθε υπολογίσιμη συνάρτηση  $g : \mathbb{N}^{m+n} \rightarrow \mathbb{N}$  και  $x_1, \dots, x_m \in \mathbb{N}$  υπάρχει υπολογίσιμη συνάρτηση  $f : \mathbb{N}^n \rightarrow \mathbb{N}$  τέτοια ώστε:

$$\forall y_1, \dots, y_n \in \mathbb{N} \ (f(y_1, \dots, y_n) = g(x_1, \dots, x_m, y_1, \dots, y_n))$$

Επιπλέον, δείξτε ότι υπάρχει πλήρης και υπολογίσιμη συνάρτηση  $S_n^m : \mathbb{N}^{m+1} \rightarrow \mathbb{N}$  τέτοια ώστε, αν  $\phi_i = g$  τότε:

$$\phi_{S_n^m(i, x_1, \dots, x_m)} = f$$

(Με λόγια: Υπάρχει πλήρης και υπολογίσιμη συνάρτηση  $S_n^m$  τέτοια ώστε αν η  $TM$  με αριθμό Gödel  $i$  υπολογίζει την  $g$  τότε η  $TM$  με αριθμό Gödel  $S_n^m(i, x_1, \dots, x_m)$  υπολογίζει την  $f$ .)

**7.9 (★★★).** Αποδείξτε το Θεώρημα 7.3.4 χωρίς να χρησιμοποιήσετε τα Θεωρήματα 7.2.1 και 7.3.6.

**7.10 (★☆☆).** Αποδείξτε το Θεώρημα 7.1.2 χρησιμοποιώντας το Θεώρημα 7.3.4.

**7.11 (★★☆).** Αποδείξτε το Θεώρημα 7.3.6 χρησιμοποιώντας το Θεώρημα 7.3.4. (Υπόδειξη: Θα χρειαστείτε την Άσκηση 7.8.)



Η απάντηση των ερωτημάτων της Σελίδας 29 μας έδειξε ότι υπάρχουν γλώσσες (ή προβλήματα αν προτιμάτε) τριών κατηγοριών: οι αναδρομικές, οι αναδρομικά απαριθμήσιμες και οι άλλες. Το «οι άλλες» προφανώς δεν μπορεί γίνει ανεκτό σε ένα επιστημονικό κείμενο. Η περιέργειά μας αναπόφευκτα καλλιεργεί την ανάγκη να κατατάξουμε *όλες*<sup>1</sup> τις γλώσσες ως προς τον «βαθμό δυσκολίας» τους. Ας καταπιαστούμε λοιπόν με αυτό το εγχείρημα.

Υπό ποία έννοια «δυσκολίας» όμως θα γίνει αυτή η κατάταξη; Η δυσκολία στο να αποφασίσουμε μία γλώσσα (ή να υπολογίσουμε μία συνάρτηση) δεν θα οφείλεται στο πλήθος των υπολογιστικών πόρων που θα χρειαστεί να δαπανήσουμε προς αυτό, όπως γίνεται π.χ. στη Θεωρία της Υπολογιστικής Πολυπλοκότητας (ούτως ή άλλως έχουμε αποφασίσει ότι έχουμε στη διάθεσή μας οσοδήποτε μεγάλους αλλά πεπερασμένους πόρους). Εμάς μας ενδιαφέρει πόσο «ισχυρές» παραδοχές θα χρειαστεί να κάνουμε για να αποφασίσουμε τη γλώσσα. Για τον λόγο αυτό θα εισάγουμε τον λεγόμενο *σχετικό υπολογισμό*, τον υπολογισμό δηλαδή που εξαρτάται από κάποιες (κατά κανόνα πολύ ισχυρές) παραδοχές.

## 8.1 Σχετικός υπολογισμός

Θα δέσουμε δύο ακόμα υποθετικά ερωτήματα τα οποία θα προσπαθήσουμε να απαντήσουμε:

**Ερώτημα 3:** Ας κάνουμε την υπόθεση εργασίας ότι η γλώσσα  $HP$  (που άνοιξε τον ασκό του Αιόλου) είναι αναδρομική γλώσσα. Είναι τότε και κάθε άλλη γλώσσα αναδρομική ή έστω αναδρομικά απαριθμήσιμη<sup>2</sup>;

<sup>1</sup> Δυστυχώς –στα πλαίσια αυτών των σημειώσεων– δεν θα μπορέσουμε να καθορίσουμε τη δυσκολία όλων των γλωσσών. Η μελέτη μας σταματάει σε μία γλώσσα την οποία αδυνατούμε (μέσω της θεωρία που θα αναπτύξουμε) να την κατατάξουμε σε κάποια κλάση δυσκολίας. Ο φιλομαθής αναγνώστης θα χρειαστεί να συνεχίσει την αναζήτησή του στο πεδίο της *Περιγραφικής Συνολοθεωρίας*.

<sup>2</sup> Προσοχή! Δεν θα δεχθούμε σαν αληθή πρόταση μία αντίφαση γιατί τότε όλες οι προτάσεις θα ήταν αληθείς. Το ερώτημα θα γίνει πιο ξεκάθαρο στη συνέχεια...

Μιλώντας πιο χαλαρά, το ερώτημα θα διατυπωνόταν ως εξής: *Αν ξέραμε για ποιες εισόδους τερματίζει μία ΤΜ και για ποιες όχι θα μπορούσαμε να αποφασίσουμε όλες τις γλώσσες, ή έστω να τις αναγνωρίσουμε;* Ένα πιο γενικό ερώτημα είναι το εξής:

**Ερώτημα 4:** Είναι όλες οι γλώσσες στο  $2^{\{0,1\}^*} \setminus \text{REC}$  το ίδιο «μη αποφάνσιμες»;

Προκειμένου να ορίσουμε ένα μέτρο «μη αποφανσιμότητας» θα εισάγουμε τον *σχετικό υπολογισμό*, δηλαδή τον υπολογισμό μίας συνάρτησης ή την αποφανσιμότητα μίας γλώσσας σε σχέση με κάποια άλλη συνάρτηση ή γλώσσα. Ακολουθώντας την ιδέα του σχετικού υπολογισμού, θα θεωρούμε ότι μία γλώσσα  $B$  είναι «δυσκολότερη» από μία γλώσσα  $A$  αν η (υποθετική στις περισσότερες περιπτώσεις) ύπαρξη ενός αλγόριθμου που αποφασίζει τη  $B$  μπορεί να χρησιμοποιηθεί για να αποφασίσουμε ή να αναγνωρίσουμε την  $A$ <sup>1</sup>.

Κεντρικό ρόλο στον σχετικό υπολογισμό παίζει η έννοια του *μαντείου για μία γλώσσα* και το μοντέλο ΤΜ που μπορεί να αξιοποιήσει τους «χρησμούς» του μαντείου. Ας περάσουμε στις λεπτομέρειες αυτών των εννοιών.

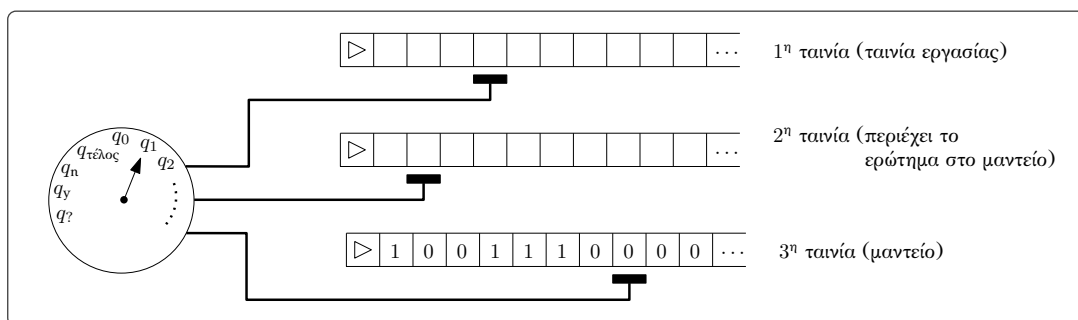
**Ορισμός 8.1.1.** *Χρησμοδότης (ή μαντείο) για μία γλώσσα  $L \subseteq \{0,1\}^*$  είναι μία εξωτερική μηχανή (όχι ΤΜ) που δέχεται σαν είσοδο μία λέξη  $w \in \{0,1\}^*$  και επιστέφει 1 αν  $w \in L$  και 0 αν  $w \notin L$ .*

Ο παραπάνω Ορισμός είναι ο συνηθέστερος στη βιβλιογραφία. Για να μπορέσουμε να συνδέσουμε το ασαφές «εξωτερική μηχανή» με τις αυστηρά ορισμένες ΤΜ οφείλουμε να ορίσουμε τα μαντεία με πιο τυπικό τρόπο. Θα θεωρήσουμε λοιπόν ως μαντείο για τη γλώσσα  $L \subseteq \{0,1\}^*$  μία άπειρη ταινία (από τα δεξιά) που περιέχει τη χαρακτηριστική συνάρτηση της  $L$ . Πιο συγκεκριμένα, τα κελιά αυτής της ταινίας αντιστοιχούν στις λέξεις του  $\{0,1\}^*$  (το αριστερότερο αντιστοιχεί στην  $\epsilon$  και τα υπόλοιπα ακολουθούν τη λεξικογραφική διάταξη του  $\{0,1\}^*$ ) και αναγράφουν 1 αν η λέξη του κελιού ανήκει στη γλώσσα και 0 αν δεν ανήκει. Σύμφωνα με αυτήν τη σύμβαση μπορούμε να ορίσουμε ΤΜ που χρησιμοποιούν μαντεία ως εξής:

**Ορισμός 8.1.2.** Έστω γλώσσα  $L \subseteq \{0,1\}^*$ . *Χρησμοληπτική ΤΜ ως προς την  $L$  (ή ΤΜ με μαντείο για την  $L$  ή, εν συντομία, ΟΤΜ) είναι μία ΤΜ  $M = (Q, \Sigma, \Gamma, \delta, q_0, q_{\text{τέλος}})$  τριών ταινιών, όπου η  $3^{\text{η}}$  ταινία είναι το μαντείο για την  $L$  (δες Σχήμα 8.1.1). Επιπλέον το  $Q$  περιέχει τρεις ειδικές, μη τερματικές καταστάσεις, τις  $q_?$ ,  $q_y$  και  $q_n$ , οι οποίες σταματούν την κανονική ροή του υπολογισμού και ξεκινούν τη διαδικασία «ερώτησης» προς το μαντείο: Η  $M$  όταν μεταβαίνει στην  $q_?$  κάνει τα ακόλουθα:*

1. Υπολογίζει τη σειρά στη λεξικογραφική διάταξη της λέξης που περιέχει η  $2^{\text{η}}$  ταινία, έστω ότι είναι η  $i$ -οστή λέξη,
2. κινεί την κεφαλή της  $3^{\text{ης}}$  ταινίας στο κελί  $i$  και διαβάζει το περιεχόμενό του. Αν αυτό είναι 1 μεταβαίνει στην κατάσταση  $q_y$  και αν αυτό είναι 0 στην κατάσταση  $q_n$ .

<sup>1</sup> Κάτι αντίστοιχο είχαμε κάνει και στο Κεφάλαιο 5 με τις απεικονιστικές αναγωγές. Στην Παράγραφο 8.3 θα γίνει αυτή η συσχέτιση και θα δούμε τις διαφορές που υπάρχουν.



Σχήμα 8.1.1: Σχηματική αναπαράσταση μίας OTM.

Έχοντας πάρει θετική ή αρνητική απάντηση από το μαντείο ο υπολογισμός συνεχίζει κατά τα γνωστά <sup>1</sup>.

**Παρατήρηση 8.1.3.** Κατ' αντιστοιχία με τον Ορισμό 1.2.23, μπορούμε να ορίσουμε τις χρησιμοληπτικές TM με δύο τερματικές καταστάσεις (τις  $q_{\text{ναι}}$  και  $q_{\text{όχι}}$ ), αν το ενδιαφέρον μας στρέφεται προς την αποφανσιμότητα γλωσσών.

Δεν θα ήταν παράλογο κάποιος να ενίσταται στην ύπαρξη OTM. Το πρόβλημα φυσικά είναι ότι το μαντείο μπορεί να είναι οποιαδήποτε γλώσσα (ακόμα και μία γλώσσα που δεν ανήκει στο RE) και η χαρακτηριστική συνάρτηση αυτής της γλώσσας μπορεί να μην είναι υπολογίσιμη. Τα δύο σημεία που θα πρέπει να αναλογιστούμε για να ξεπεράσουμε αυτήν την ανασφάλεια είναι, πρώτον, ότι μία OTM είναι μια καθ' όλα νόμιμη TM με τρεις ταινίες (το μαντείο είναι μια «εξωτερική μηχανή» και όχι κάποια υπορουτίνα της), και κανένας φαντάζομαι δεν αμφισβητεί την ύπαρξη 3-ταινιακών TM. Η δεύτερη και πιο σημαντική σκέψη (που πάντα θα πρέπει να μένει στο πίσω μέρος του μυαλού μας σε αυτό το κεφάλαιο) είναι ότι μελετάμε τον σχετικό υπολογισμό, αναπτύσσουμε δηλαδή μία θεωρία βασισμένη σε υποθέσεις. Για παράδειγμα μπορεί να χρειαστεί να υποθέσουμε ότι η χαρακτηριστική συνάρτηση της  $HP$  είναι υπολογίσιμη και έτσι υπάρχει μαντείο για αυτήν <sup>2</sup>. Οπότε, συνοψίζοντας, η απάντηση είναι ναι υπάρχουν OTM και, όσον αφορά τα μαντεία τους, δεχόμαστε σαν υπόθεση εργασίας ότι η χαρακτηριστική συνάρτησή τους είναι υπολογίσιμη και μελετάμε τις συνέπειες αυτής της παραδοχής.

**Συμβολισμός 8.1.4.** Έστω OTM  $M = (Q, \Sigma, \Gamma, \delta, q_0, q_{\text{τελος}})$  και γλώσσα  $L \subseteq \{0, 1\}^*$ . Θα γράφουμε  $M^L$  όταν θέλουμε να τονίσουμε το μαντείο το οποίο προτιθέμεθα να χρησιμοποιούμε για την  $M$ .

<sup>1</sup> Ο υπολογισμός ναι μεν συνεχίζει «κατά τα γνωστά» αλλά η γνώση που αποκομίζουμε από το μαντείο κάνει τις OTM πολύ πιο «ισχυρές» από τις TM (τυπικά δεν μπορούμε να συγκρίνουμε τη δύναμη αυτών των δύο υπολογιστικών μοντέλων όπως εξηγεί η Παρατήρηση 8.1.15). Ο λόγος φυσικά είναι ότι με το μαντείο μπορούμε να γνωρίζουμε αν μία λέξη ανήκει σε μία γλώσσα ή όχι, ακόμα και για γλώσσες που είναι μη αποφάνσιμες, για τις οποίες δηλαδή δεν θα μπορούσαμε να αποκτήσουμε αυτήν τη γνώση με κάποιον υπολογιστικό τρόπο.

<sup>2</sup> Είναι νομίζω εμφανές ότι δεν μας χρειάζεται η a priori γνώση όλης της χαρακτηριστικής συνάρτησης της γλώσσας μαντείου. Μας χρειάζεται μόνο η τιμή της για το εκάστοτε ερώτημα προς το μαντείο την κάθε φορά.

Στη συνέχεια θα γίνει αντιληπτό ότι ανάλογα με το μαντείο που χρησιμοποιεί η  $M$  θα αλλάζει (συνήθως ριζικά) και η «συμπεριφορά» της. Έτσι, όταν μας ενδιαφέρει η συμπεριφορά της σε σχέση με μία γλώσσα  $L$  θα την τρέχουμε με αυτήν την γλώσσα ως μαντείο.

**Ορισμός 8.1.5.** Έστω γλώσσα  $A \subseteq \{0, 1\}^*$  και συνάρτηση  $f : \{0, 1\}^* \rightarrow \{0, 1\}^*$ . Μία OTM  $M$  που χρησιμοποιεί μαντείο για την  $A$  υπολογίζει την  $f$  ανν:

$$\forall w \in \text{dom}(f) (\triangleright q_0 w \vdash_{M^A}^* q_{\text{τέλος}} f(w)) \text{ και } \forall w \notin \text{dom}(f) (M^A(w) \uparrow)$$

**Ορισμός 8.1.6.** Έστω γλώσσα  $A \subseteq \{0, 1\}^*$  και συνάρτηση  $f : \{0, 1\}^* \rightarrow \{0, 1\}^*$ . Αν υπάρχει OTM  $M$  που υπολογίζει την  $f$  αν χρησιμοποιήσουμε μαντείο για την  $A$  θα λέμε ότι η  $f$  είναι υπολογίσιμη ως προς την  $A$ .

**Ορισμός 8.1.7.** Έστω γλώσσες  $A, B \subseteq \{0, 1\}^*$ . Μία OTM  $M$  που χρησιμοποιεί μαντείο για την  $A$  αναγνωρίζει (ή ημι-αποφασίζει) τη  $B$  ανν:

$$(A) \quad w \in B \Leftrightarrow M^A(w) \downarrow_{q_{\text{ναι}}}$$

**Ορισμός 8.1.8.** Έστω γλώσσες  $A, B \subseteq \{0, 1\}^*$ . Αν υπάρχει OTM  $M$  που ημι-αποφασίζει τη  $B$  αν χρησιμοποιήσουμε μαντείο για την  $A$  θα λέμε ότι η  $B$  είναι αναδρομικά απαριθμήσιμη ως προς την  $A$ .

**Ορισμός 8.1.9.** Έστω γλώσσες  $A, B \subseteq \{0, 1\}^*$ . Μία OTM  $M$  που χρησιμοποιεί μαντείο για την  $A$  αποφασίζει τη  $B$  ανν:

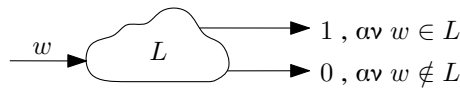
$$(A) \quad w \in B \Leftrightarrow M^A(w) \downarrow_{q_{\text{ναι}}}$$

$$(B) \quad w \notin B \Leftrightarrow M^A(w) \downarrow_{q_{\text{όχι}}}$$

**Ορισμός 8.1.10.** Έστω γλώσσες  $A, B \subseteq \{0, 1\}^*$ . Αν υπάρχει OTM  $M$  που αποφασίζει τη  $B$  αν χρησιμοποιήσουμε μαντείο για την  $A$  θα λέμε ότι η  $B$  είναι αναδρομική ως προς την  $A$ .

**Συμβολισμός 8.1.11 (Κουτάκια, συνέχεια...).**

9. Θα συμβολίζουμε το μαντείο για τη γλώσσα  $L \subseteq \{0, 1\}^*$  ως εξής:

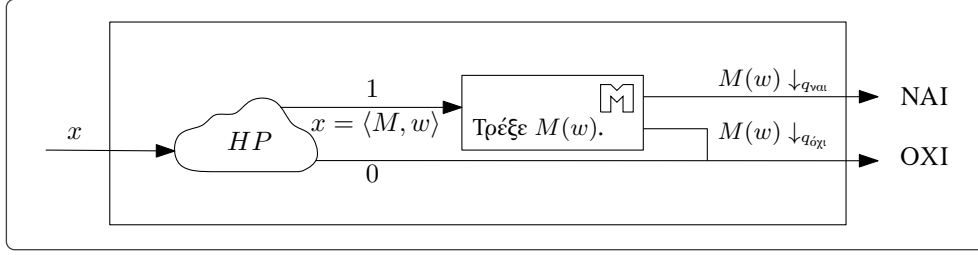


(Στην απεικονιζόμενη περίπτωση γίνεται ερώτημα στο μαντείο για τη λέξη  $w$ .)

**Παράδειγμα 8.1.12.** Η  $L_{\text{Αποδοχής}}$  είναι αναδρομική ως προς την  $HP$  καθώς η OTM του Σχήματος 8.1.2 την αποφασίζει.

**Παρατήρηση 8.1.13.** Παρατηρήστε ότι αν είχαμε εφοδιάσει την OTM του παραπάνω παραδείγματος με μαντείο για την  $\overline{HP}$  (αντί για το μαντείο για την  $HP$ ), τότε θα αποφάσιζε την κενή γλώσσα<sup>1</sup>. Ακόμα και αν η OTM αποφασίζει (ημι-αποφασίζει) μία συγκεκριμένη

<sup>1</sup> Εδώ υποθέτουμε ότι αν δώσουμε στην καθολική TM ως είσοδο λέξη που δεν αποτελεί κωδικοποίηση TM και λέξης, αυτή θα κολλήσει.



Σχήμα 8.1.2: Η OTM που αποφασίζει την  $L_{\text{Αποδοχής}}$ .

γλώσσα (ή υπολογίζει μία συγκεκριμένη συνάρτηση), αν το μαντείο αλλάξει τότε αλλάζει και η γλώσσα που αποφασίζει (ημι-αποφασίζει, ή η συνάρτηση που υπολογίζει). Μπορούμε να αντιστοιχήσουμε σε μία OTM μία γλώσσα (ή μία συνάρτηση) μόνο *εν σχέσει* με τη γλώσσα που χρησιμοποιούμε ως μαντείο <sup>1</sup>.

**Συμβολισμός 8.1.14.** Έστω OTM  $M = (Q, \Sigma, \Gamma, \delta, q_0, q_{\text{τέλος}})$  και γλώσσα  $L \subseteq \{0, 1\}^*$ . Χάριν συντομίας σε όσα ακολουθούν θα γράφουμε «υπάρχει OTM  $M^L \dots$ » αντί για την πρόταση «υπάρχει OTM  $M$  που αν χρησιμοποιήσουμε ως μαντείο την  $L \dots$ ».

**Παρατήρηση 8.1.15.** Οι OTM είναι επέκταση των TM. Θα μπορούσαμε να το φανταστούμε αυτό ως εξής: Μία TM θεωρείται OTM που δεν χρησιμοποιεί ποτέ το μαντείο της <sup>2</sup>. Η επέκταση αυτή, σε αντίθεση με τις επεκτάσεις που είδαμε στην Παράγραφο 1.3, δείχνει (εσφαλμένα) ισχυρότερη από τις TM <sup>3</sup>, καθώς για παράδειγμα η OTM του Παραδείγματος 8.1.12 αποφασίζει μία μη αναδρομική γλώσσα. Εδώ όμως έχουμε να κάνουμε με σχετικό υπολογισμό (καθώς κάνουμε την παραδοχή ότι μπορούμε να γνωρίζουμε αν μια λέξη ανήκει στην HP ή όχι) και όχι με απόλυτο υπολογισμό (όπου δεν κάνουμε καμία παραδοχή).

Ένας πιο τυπικός τρόπος να δούμε ότι οι OTM είναι επέκταση των TM, ή, σωστότερα, ότι οι TM είναι περιορισμός των OTM, δίνεται στη Σύμβαση 8.1.16 που ακολουθεί.

**Σύμβαση 8.1.16.** Για λόγους «συμβατότητας» θα θεωρήσουμε ότι μία TM  $M = (Q, \Sigma, \Gamma, \delta, q_0, q_{\text{τέλος}})$  είναι μία OTM στην οποία έχουμε δέσει τον ακόλουθο έξτρα περιορισμό στη συνάρτηση μετάβασης:

$$\forall a, b \in \Gamma \quad \forall q, p \in Q \quad \forall x \in \{A, \Delta\} (\delta(q, a) = (p, b, x) \rightarrow p \neq q) \quad (8.1)$$

δηλαδή, κατά τη λειτουργία της δεν μεταβαίνουν ποτέ στην κατάσταση  $q$ .

<sup>1</sup> Θυμηθείτε ότι έως τώρα σε κάθε TM αντιστοιχίσαμε ακριβώς μία συνάρτηση και ακριβώς μία γλώσσα. Στον σχετικό υπολογισμό αυτό γενικά δεν ισχύει. Ισχύει μόνο όταν δηλώσουμε ρητά το μαντείο που θα χρησιμοποιήσουμε στην OTM. Υπό μία έννοια ο σχετικός υπολογισμός ταυτίζεται με τον υπολογισμό που μελετούσαμε έως τώρα αν επικεντρωθούμε σε μία συγκεκριμένη γλώσσα μαντείου. Φυσικά η χρήση μαντείου μας οδηγεί σε αποτελέσματα που είναι αντίθετα με αυτά που θεωρούσαμε αλγοριθμικά εφικτά.

<sup>2</sup> Έχει φυσικά τη δυνατότητα να το χρησιμοποιήσει, απλά δεν το κάνει.

<sup>3</sup> Πράγμα που θα κλώνιζε την εμπιστοσύνη μας στη Θέση Church-Turing!

Η παραπάνω σύμβαση μας δίνει εν ολίγης το δικαίωμα να τρέχουμε τις OTM που ικανοποιούν την προϋπόθεση (8.1) «χωρίς να χρησιμοποιούμε μαντείο»<sup>1</sup>, όπως δηλαδή κάναμε έως τώρα.

Συνδυάζοντας τη Σύμβαση 8.1.16 με τους Ορισμούς 1.2.28 και 1.2.29 οδηγούμαστε στην ακόλουθη παρατήρηση.

**Παρατήρηση 8.1.17.** Μία γλώσσα  $L \subseteq \{0,1\}^*$  είναι αναδρομική (ή αναδρομικά απαριθμήσιμη) αν υπάρχει OTM που την αποφασίζει (ημι-αποφασίζει αντίστοιχα) ασχέτως με ποια γλώσσα θα χρησιμοποιήσουμε ως μαντείο. Επομένως, οι κλάσεις REC και RE αφορούν απόλυτο υπολογισμό<sup>2</sup>.

### Χρησμοληπτική Καθολική Μηχανή Turing

Στην Παράγραφο 1.4 κωδικοποιήσαμε τη συνάρτηση μεταβάσεων μίας TM στο  $\{0,1\}$ , με απώτερο σκοπό να ορίσουμε την καθολική TM. Η καθολική TM μπορεί να δεχθεί σαν είσοδο την κωδικοποίηση μίας TM και μίας λέξης και να προσομοιώσει τη λειτουργία της με είσοδο αυτήν τη λέξη. Όσον αφορά τις OTM δεν έχουμε πολλά να προσθέσουμε ως προς την κωδικοποίησή τους, καθώς τις ορίσαμε σαν TM 3-ταινιών και (όπως στις TM δεν κωδικοποιούσαμε το περιεχόμενο της ταινίας, έτσι και για τις OTM) κωδικοποιούμε μόνο τη συνάρτηση μετάβασης (και όχι την «προβληματική» ταινία του μαντείου). Αυτό που δέλει προσοχή είναι το εξής: Δεν θα ήταν σωστό να πάρουμε πρώτα ισοδύναμη μονοταινιακή TM και έπειτα να κωδικοποιήσουμε αυτήν. Ο λόγος είναι ότι σε μία μονοταινιακή OTM θα έπρεπε κάπως να «τοποθετήσουμε» την ταινία του μαντείου στη μοναδική ταινία της (κάτι αντίστοιχο με την απόδειξη του Θεωρήματος 1.3.2) ή, έστω, να χρησιμοποιούμε τη χαρακτηριστική συνάρτηση της γλώσσας μαντείου σαν υπορουτίνα! Αντ' αυτού, κωδικοποιούμε κατευθείαν τη συνάρτηση μεταβάσεων όπως στην Παράγραφο 1.4, μόνο που θα αλλάξουμε τις κωδικοποιήσεις των μεταβάσεων καθώς τώρα έχουμε τρεις ταινίες<sup>3</sup>. Μετά από αυτήν τη διευκρίνιση, μπορούμε πλέον να περάσουμε στον ορισμό της *Χρησμοληπτικής Καθολικής TM*.

**Ορισμός 8.1.18.** Έστω γλώσσα  $L \subseteq \{0,1\}^*$ . *Χρησμοληπτική Καθολική TM ως προς την L*, συμβολισμός  $\mathbb{M}^L$ , είναι μία OTM που δέχεται ως είσοδο την κωδικοποίηση μίας OTM  $M$  και μίας λέξης  $w$  και μπορεί να προσομοιώσει την  $M(w)$  με τον ίδιο τρόπο όπως μία (απλή) Καθολική TM (δες Ορισμό 1.4.15), μόνο που χρησιμοποιεί το μαντείο για την  $L$  όποτε η προσομοίωση της  $M(w)$  πηγαίνει στην κατάσταση  $q?$ .

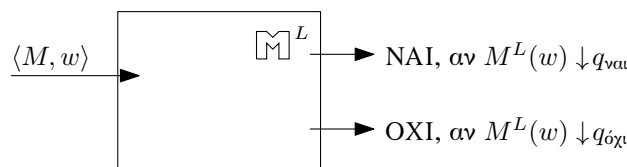
### Συμβολισμός 8.1.19 (Κουτάκια, συνέχεια...).

<sup>1</sup> Αν το κάναμε αυτό σε μία OTM που δεν ικανοποιεί την (8.1) τότε αυτή θα κόλλαγε όταν έφτανε στην κατάσταση  $q?$  καθώς θα περίμενε για πάντα έναν «χρησμό».

<sup>2</sup> Η Σύμβαση 8.1.16 δεν είναι απαραίτητη για να ισχύει αυτή η παρατήρηση (δες Άσκηση 8.2).

<sup>3</sup> Στην ταινία του μαντείου θα χρειάζεται να κάνουμε σε κάθε βήμα υπολογισμού και μία άσκοπη κίνηση της κεφαλής.

10. Έστω γλώσσα  $L \subseteq \{0, 1\}^*$ , OTM  $M$  και  $w \in \{0, 1\}^*$ . Θα γράφουμε:<sup>1</sup>



Παρατηρήστε ότι ανάλογα με το μαντείο που χρησιμοποιεί η καθολική OTM μπορεί να αποδεχθεί ή να απορρίψει την είσοδό της. Για παράδειγμα αν προσομοιώσουμε την OTM του Παραδείγματος 8.1.12 με είσοδο  $\langle M, w \rangle \in L_{\text{Αποδοχής}}$ , χρησιμοποιώντας για μαντείο την  $HP$ , η καθολική OTM θα αποδεχθεί την είσοδο, ενώ αν χρησιμοποιήσουμε για μαντείο την  $\overline{HP}$  θα απορρίψει την είσοδο.

### Κλάσεις σχετικού υπολογισμού

**Ορισμός 8.1.20.** Έστω γλώσσα (αναφοράς)  $A \subseteq \{0, 1\}^*$ . Ορίζουμε τις ακόλουδες κλάσεις γλωσσών ως προς την  $A$ :

- $\text{RE}^A = \{L \subseteq \{0, 1\}^* \mid \text{υπάρχει OTM } M^A \text{ που ημι-αποφασίζει την } L\}$
- $\text{REC}^A = \{L \subseteq \{0, 1\}^* \mid \text{υπάρχει OTM } M^A \text{ που αποφασίζει την } L\}$

**Θεώρημα 8.1.21.** Έστω γλώσσα  $A \subseteq \{0, 1\}^*$ . Αν  $A \in \text{REC}$  τότε  $\text{RE}^A = \text{RE}$  και  $\text{REC}^A = \text{REC}$ .

*Απόδειξη.*<sup>2</sup> Έστω  $M_A$  η TM που αποφασίζει την  $A$  και έστω γλώσσα  $L \in \text{RE}^A$ , δηλαδή υπάρχει OTM  $M_L^A$  που την ημι-αποφασίζει. «Αντικαθιστούμε» το μαντείο για την  $A$  με την  $M_A$  στην  $M_L^A$  και παίρνουμε TM  $M$  ως εξής:

*Η  $M$  προσομοιώνει με μία (απλή) καθολική TM την  $M_L^A$ . Όταν η  $M_L^A$  «ρωτάει» το μαντείο για μία λέξη  $w$  η  $M$  τρέχει την  $M_A$  με είσοδο  $w$  και αν αυτή αποδεχτεί γράφει 1 στην τρίτη ταινία (την ταινία του μαντείου) στο κελί  $|w| + 1$ , ενώ αν απορρίψει γράφει 0<sup>3</sup>.*

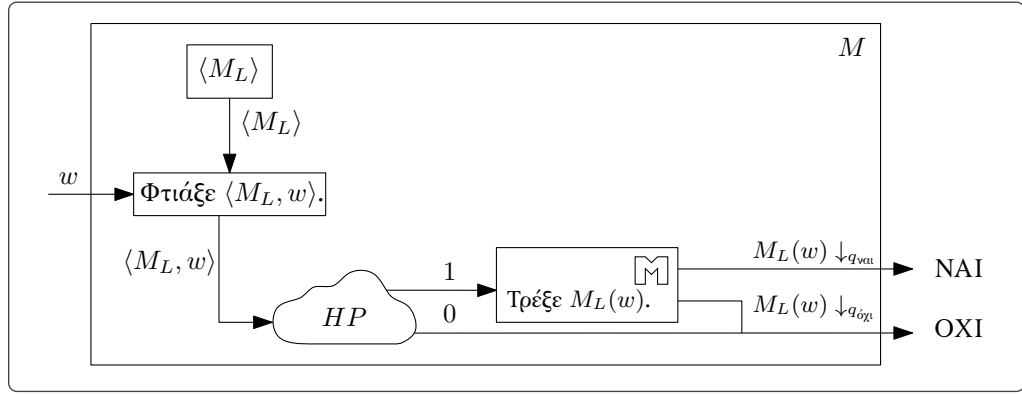
Κατά αυτόν τον τρόπο μπορούμε να «ξεγελάσουμε» την  $M_L^A$  και να λειτουργεί όπως θα έκανε αν χρησιμοποιούσε μαντείο για την  $A$ , αλλά στην ουσία τους «χρησμούς» τους υπολογίζουμε χρησιμοποιώντας την  $M_A$ <sup>4</sup>. Έτσι κατασκευάσαμε μία TM  $M$  που ημι-αποφασίζει την  $L$  και άρα  $L \in \text{RE}$ . Συνεπώς  $\text{RE}^A \subseteq \text{RE}$ .

<sup>1</sup> Γράφουμε  $\boxed{M}^L$  αντί για  $\boxed{M}$  δέλοντας να τονίσουμε το μαντείο που προτιθέμεθα να χρησιμοποιήσουμε στην προσομοίωση. Μην παρεξηγηθεί αυτός ο συμβολισμός και θεωρηθεί ότι η γλώσσα  $L$  έχει συγκεκριμενοποιηθεί. Ανάλογα με τον σκοπό που χρησιμοποιούμε τη χρησμοληπτική καθολική μηχανή η γλώσσα μαντείο μπορεί να αλλάξει.

<sup>2</sup> Θα δείξουμε μόνο την πρώτη περίπτωση. Η δεύτερη είναι εντελώς αντίστοιχη.

<sup>3</sup> Η ταινία του μαντείου δεν χρειάζεται να περιέχει ολόκληρη τη  $\chi_A$ . Αρκεί τα κελιά που αντιστοιχούν στις λέξεις για τις οποίες γίνεται το κάθε ερώτημα να περιέχουν τη σωστή τιμή.

<sup>4</sup> Τυπικά, για να συμμορφωθούμε απόλυτα με τη Σύμβαση 8.1.16, θα πρέπει να παρακάμψουμε την κατάσταση  $q_?$  της  $M_L^A$  έτσι ώστε η TM που κατασκευάζουμε να μην μεταβαίνει ποτέ σε αυτήν.


 Σχήμα 8.1.3: Η OTM  $M$  στην απόδειξη της Πρότασης 8.1.22.

Έστω τώρα γλώσσα  $L \in \text{RE}$  και TM  $M_L$  που την ημι-αποφασίζει. Από τη Σύμβαση 8.1.16 προκύπτει ότι η  $M_L$  αποτελεί OTM που δεν «ρωτάει» ποτέ το μαντείο. Συνεπώς  $L \in \text{RE}^A$  και έτσι  $\text{RE} \subseteq \text{RE}^A$ .  $\square$

Σύμφωνα με το Θεώρημα 8.1.21 η θεωρία του σχετικού υπολογισμού δεν παρουσιάζει «ενδιαφέρον» όταν χρησιμοποιούμε ως μαντείο μία αναδρομική γλώσσα. Ας δούμε λοιπόν τι συμβαίνει όταν χρησιμοποιήσουμε μια αναδρομικά απαριθμήσιμη γλώσσα  $A \subseteq \{0,1\}^*$  που δεν είναι αναδρομική. Από το δεύτερο σκέλος της απόδειξης του Θεωρήματος 8.1.21 προκύπτει ότι  $\text{RE} \subseteq \text{RE}^A$ . Για μερικές γλώσσες-μαντεία ισχύει ότι  $\text{RE} \subseteq \text{REC}^A$ , όπως για παράδειγμα την  $HP$ .

**Πρόταση 8.1.22.** Ισχύει ότι  $\text{RE} \subseteq \text{REC}^{HP}$ .

*Απόδειξη.* Έστω γλώσσα  $L \in \text{RE}$  και έστω  $M_L$  η TM που την ημι-αποφασίζει. Παρατηρούμε ότι η OTM  $M$  του Σχήματος 8.1.3 αποφασίζει την  $L$ , άρα  $L \in \text{REC}^{HP}$ .  $\square$

Συνεπώς η απάντηση στο Ερώτημα 3 (σελίδα 165) είναι καταφατική, αλλά μόνο όσον αφορά τις αναδρομικά απαριθμήσιμες γλώσσες:

**Πρόταση 8.1.23.** Υπάρχει γλώσσα  $L \subseteq \{0,1\}^*$  που δεν ανήκει στο  $\text{REC}^{HP}$ .

*Απόδειξη.* Θεωρούμε τη γλώσσα:

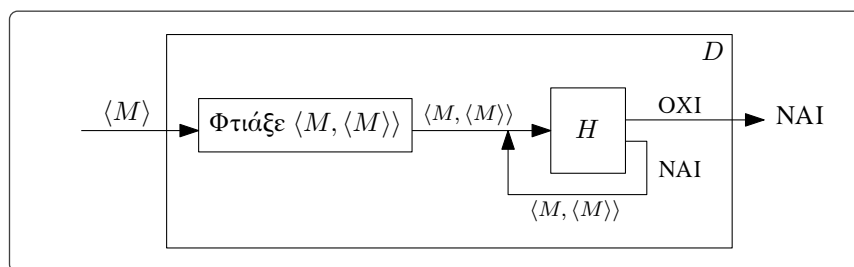
$$HP_2 = \{ \langle M, w \rangle \in \{0,1\}^* \mid M^{HP}(w) \downarrow \}^1$$

Θα δείξουμε ότι  $HP_2 \notin \text{REC}^{HP}$ . Έστω (προς άτοπο) ότι  $HP_2 \in \text{REC}^{HP}$  και έστω ότι η OTM  $H^{HP}$  την αποφασίζει. Θεωρούμε την OTM  $D$  του Σχήματος 8.1.4 και παρατηρούμε ότι:

$$D^{HP}(\langle D \rangle) \downarrow \Leftrightarrow H^{HP}(\langle D, \langle D \rangle \rangle) \downarrow_{q_{\text{όχι}}} \Leftrightarrow \langle D, \langle D \rangle \rangle \notin HP_2 \Leftrightarrow D^{HP}(\langle D \rangle) \uparrow$$

Άτοπο, άρα  $HP_2 \notin \text{REC}^{HP}$ .  $\square$

<sup>1</sup> Το «2» στο  $HP_2$  προκύπτει από τον Ορισμό 8.2.4 που ακολουθεί.



**Σχήμα 8.1.4:** Η OTM  $D$  στην απόδειξη της Πρότασης 8.1.23. Παρατηρήστε ότι είναι ακριβώς ίδια με την TM στην απόδειξη του Θεωρήματος 5.2.1!

Η Πρόταση 8.1.23 ρίχνει λίγο φως στο Ερώτημα 4: Υπάρχουν γλώσσες που ακόμα και η γνώση του πότε ο υπολογισμός μίας TM τερματίζει δεν αρκεί για να τις αποφασίσουμε. Ο «βαθμός» μη αποφανσιμότητάς τους συνεπώς οφείλει να είναι μεγαλύτερος από τον βαθμό π.χ. των γλωσσών στην κλάση RE. Αυτό ισχύει φυσικά αν πάρουμε την  $HP$  ως γλώσσα αναφοράς. Στην επόμενη παράγραφο θα προχωρήσουμε την ιδέα του σχετικού υπολογισμού ακόμα παραπέρα, εξετάζοντας σε γενικότερο πλαίσιο τη μη αποφανσιμότητα λαμβάνοντας ως αναφορά ολόκληρες κλάσεις γλωσσών.

Κλείνουμε αυτήν την παράγραφο αποδεικνύοντας μερικές χρήσιμες ιδιότητες των κλάσεων σχετικού υπολογισμού.

**Θεώρημα 8.1.24.** Έστω γλώσσα  $A \subseteq \{0, 1\}^*$ .  $L \in \text{REC}^A$  ανν  $\bar{L} \in \text{REC}^A$ .

*Απόδειξη.* Η απόδειξη είναι ίδια με την απόδειξη του Θεωρήματος 1.5.3, μόνο που σε αυτήν την περίπτωση έχουμε OTM.  $\square$

**Ορισμός 8.1.25.** Εστω κλάση γλωσσών  $\mathcal{C}$ . Ορίζουμε την κλάση γλωσσών  $\text{co-}\mathcal{C} = \{L \subseteq \{0, 1\}^* \mid \bar{L} \in \mathcal{C}\}$ .

**Θεώρημα 8.1.26.** Έστω γλώσσα  $A \subseteq \{0, 1\}^*$ . Ισχύει ότι  $\text{RE}^A \cap \text{co-RE}^A = \text{REC}^A$ .

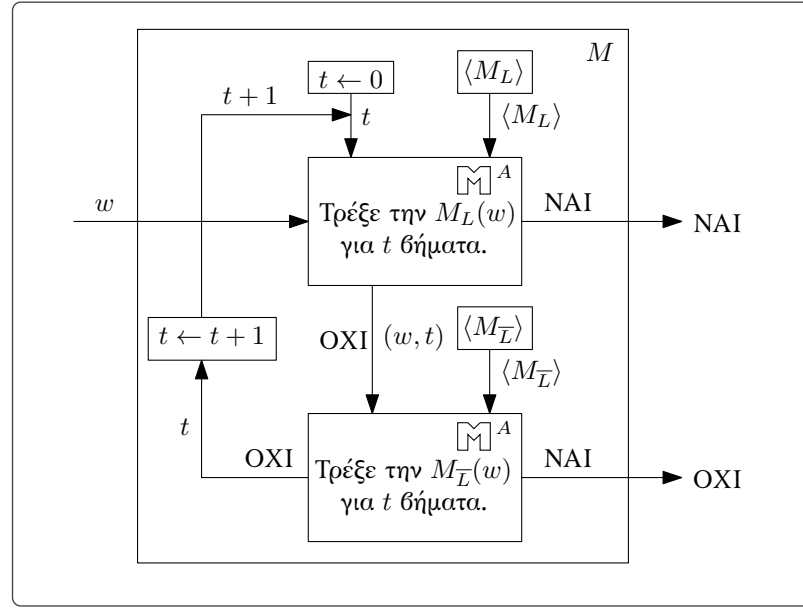
*Απόδειξη.* Έστω γλώσσα  $L \in \text{REC}^A$ . Κατά ήσωνα λόγο ισχύει ότι  $L \in \text{RE}^A$ . Από το Θεώρημα 8.1.24 προκύπτει ότι  $\bar{L} \in \text{REC}^A$  και αντίστοιχα ότι  $\bar{L} \in \text{RE}^A$ . Άρα  $L \in \text{RE}^A \cap \text{co-RE}^A$ .

Έστω τώρα γλώσσα  $L \in \text{RE}^A \cap \text{co-RE}^A$  δηλαδή υπάρχουν OTM  $M_L^A$  και  $M_{\bar{L}}^A$  που ημι-αποφασίζουν τις  $L$  και  $\bar{L}$  αντίστοιχα. Κατασκευάζουμε την OTM  $M$  του Σχήματος 8.1.5 και παρατηρούμε ότι αποφασίζει την  $L$ . Άρα  $L \in \text{REC}^A$ .  $\square$

Το ακόλουθο Θεώρημα είναι πάρα πολύ χρήσιμο καθώς μας δίνει το δικαίωμα να αλλάξουμε τη γλώσσα αναφοράς.

**Θεώρημα 8.1.27.** Έστω γλώσσες  $A, B, C \subseteq \{0, 1\}^*$ . Ισχύει ότι:

- i. Αν  $A \in \text{RE}^B$  και  $B \in \text{REC}^C$  τότε  $A \in \text{RE}^C$ .
- ii. Αν  $A \in \text{REC}^B$  και  $B \in \text{REC}^C$  τότε  $A \in \text{REC}^C$ .



**Σχήμα 8.1.5:** Η ΤΜ  $M$  που αποφασίζει την  $L$  όταν  $L \in \text{RE}^A \cap \text{co-RE}^A$  (ο λόγος που χρησιμοποιούμε τον συμβολισμό  $\mathbb{M}^A$  αναφέρεται στην Υποσημείωση 1 στη Σελίδα 171).

**Απόδειξη.** <sup>1</sup> i. Έστω  $M_A^B$  η ΤΜ που ημι-αποφασίζει την  $A$  και  $M_B^C$  η ΤΜ που αποφασίζει την  $B$ . Αρκεί να «αντικαταστήσουμε» το μαντείο για τη  $B$  στην  $M_A$  με την  $M_B$  (όπως κάναμε στην απόδειξη του Θεωρήματος 8.1.21). Η «αντικατάσταση» θα γίνει ως εξής:

Προσμοιώνουμε με μία χρησιμοληπτική καθολική ΤΜ την  $M_A$  και όταν η  $M_A$  «ρωτάει» το μαντείο αν μία λέξη  $w$  ανήκει στη γλώσσα  $B$ , αντί αυτού τρέχουμε την  $M_B$  με είσοδο  $w$ .

Έτσι παίρνουμε μία ΟΤΜ που, αν χρησιμοποιήσουμε μαντείο για τη  $C$ , θα ημι-αποφασίζει την  $A$ . □

**Θεώρημα 8.1.28.** Έστω γλώσσες  $A, B, C \subseteq \{0, 1\}^*$ . Αν  $A \leq_m B$  και  $B \in \text{REC}^C$  ( $B \in \text{RE}^C$ ) τότε  $A \in \text{REC}^C$  ( $A \in \text{RE}^C$  αντίστοιχα).

**Απόδειξη.** Η απόδειξη είναι εντελώς αντίστοιχη με την απόδειξη του Θεωρήματος 5.2.7. □

Στο πλαίσιο του σχετικού υπολογισμού γίνεται πιο εύκολα αντιληπτό ότι η σχέση που ορίζει η αναγωγή ισχύει γενικότερα και μπορεί να χρησιμοποιηθεί για τη διερεύνηση του αν μια γλώσσα ανήκει σε πιο ευρείες κλάσεις από τις  $\text{REC}$  και  $\text{RE}$ . Παρατηρήστε επίσης ότι το Θεώρημα 8.1.28 ισχύει ακόμα και αν η συνάρτηση της αναγωγής είναι υπολογίσιμη ως προς τη γλώσσα  $C$ .

<sup>1</sup> Θα δείξουμε μόνο το i., η απόδειξη για το ii. είναι εντελώς αντίστοιχη.

## 8.2 Αριθμητική Ιεραρχία

**Ορισμός 8.2.1.** Έστω μία κλάση γλωσσών  $\mathcal{C} \subseteq 2^{\{0,1\}^*}$ . Ορίζουμε τις ακόλουθες κλάσεις γλωσσών ως προς τη  $\mathcal{C}$ :

- $RE^{\mathcal{C}} = \bigcup_{A \in \mathcal{C}} RE^A$
- $REC^{\mathcal{C}} = \bigcup_{A \in \mathcal{C}} REC^A$

**Παρατήρηση 8.2.2.** Από το Θεώρημα 8.1.21 προκύπτει ότι  $REC^{REC} = REC$  και  $RE^{REC} = RE$ .

Οι κλάσεις που απαρτίζουν την *Αριθμητική Ιεραρχία* δίνονται στον ακόλουθο Ορισμό.

**Ορισμός 8.2.3** (Αριθμητική Ιεραρχία). Ορίζουμε αναδρομικά για κάθε  $n \geq 1$  τις κλάσεις γλωσσών:

$$\begin{aligned}\Sigma_1^0 &= RE \\ \Delta_1^0 &= REC \\ \Sigma_{n+1}^0 &= RE^{\Sigma_n^0} \\ \Delta_{n+1}^0 &= REC^{\Sigma_n^0}\end{aligned}$$

και τις κλάσεις γλωσσών:

$$\Pi_n^0 = co\text{-}\Sigma_n^0$$

Οι κλάσεις αυτές αποτελούν μία κατάταξη (μερικών) γλωσσών του  $2^{\{0,1\}^*}$  ως προς τον βαθμό μη αποφανσιμότητας τους καθώς, όπως θα δούμε στο Θεώρημα 8.2.10, για κάθε  $n \geq 2$  υπάρχει γλώσσα που ανήκει στην κλάση  $\Sigma_{n+1}^0 \setminus \Sigma_n^0$ , ή αλλιώς, γλώσσα που δεν αρκεί να χρησιμοποιήσουμε μαντείο «επιπέδου»  $\Sigma_{n-1}^0$  για να την ημι-αποφασίσουμε, αλλά πρέπει να χρησιμοποιήσουμε μαντείο επιπέδου  $\Sigma_n^0$ .

Προκειμένου να έχουν νόημα οι παραπάνω κλάσεις θα πρέπει να δείξουμε ότι οι μεταξύ τους εγκλεισμοί είναι γνήσιοι. Το αποτέλεσμα αυτό είναι γνωστό ως *Θεώρημα Αριθμητικής Ιεραρχίας* (Θεώρημα 8.2.10) και για να το αποδείξουμε θα χρειαστεί πρώτα να κάνουμε αρκετή προεργασία.

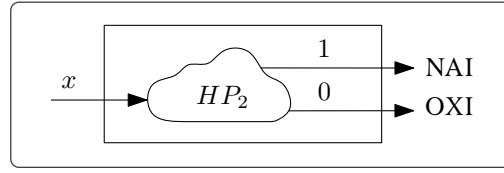
**Ορισμός 8.2.4.** Ορίζουμε αναδρομικά για κάθε  $n \geq 1$  τις γλώσσες:

$$\begin{aligned}HP_1 &= HP \\ HP_{n+1} &= \{ \langle M, w \rangle \in \{0,1\}^* \mid M^{HP_n}(w) \downarrow \}\end{aligned}$$

**Πρόταση 8.2.5.** Για κάθε  $n \geq 1$  ισχύει ότι  $HP_n \in REC^{HP_{n+1}}$ .

*Απόδειξη.* Θα το δείξουμε κάνοντας επαγωγή στο  $n$ .

Βάση: Για  $n = 1$  πρέπει να δείξουμε ότι  $HP \in REC^{HP_2}$ . Παρατηρήστε ότι μπορούμε να θεωρήσουμε ότι μία ΤΜ είναι ΟΤΜ που χρησιμοποιεί μαντείο για την  $HP$  (απλά δεν «ρωτάει» ποτέ αυτό το μαντείο, δεξ Σύμβαση 8.1.16). Συνεπώς η ΟΤΜ του Σχήματος 8.2.1 αποφασίζει την  $HP$  καθώς:



**Σχήμα 8.2.1:** Η ΤΜ που αποφασίζει την  $HP$  χρησιμοποιώντας μαντείο για την  $HP_2$ .

- Αν υπάρχει ΤΜ  $M$  και λέξη  $w \in \{0,1\}^*$  τέτοιες ώστε  $x = \langle M, w \rangle$  και το μαντείο για την  $HP_2$  επιστρέφει 1 τότε  $\langle M, w \rangle \in HP_2$ , δηλαδή  $M^{HP}(w) \downarrow$ . Όμως θεωρούμε ότι η ΤΜ  $M$ , παρόλο που την αντιμετωπίζουμε σαν ΟΤΜ, δεν ρωτάει ποτέ το μαντείο της, συνεπώς  $M(w) \downarrow$ <sup>1</sup>. Οπότε  $x \in HP$ .
- Αν είτε δεν υπάρχουν ΤΜ  $M$  και λέξη  $w \in \{0,1\}^*$  τέτοιες ώστε  $x = \langle M, w \rangle$ , είτε υπάρχουν αλλά το μαντείο για την  $HP_2$  επιστρέφει 0, εύκολα καταλήγουμε ότι  $x \notin HP$ .

Επαγωγική υπόθεση: Υποθέτουμε ότι  $HP_n \in \text{REC}^{HP_{n+1}}$ .

Επαγωγικό βήμα: Αρκεί να δείξουμε ότι  $HP_{n+1} \leq_m HP_{n+2}$  καθώς (προφανώς) ισχύει ότι  $HP_{n+2} \in \text{REC}^{HP_{n+2}}$  και έτσι, από το Θεώρημα 8.1.28, έπεται ότι  $HP_{n+1} \in \text{REC}^{HP_{n+2}}$ .

Από την επαγωγική υπόθεση έχουμε ότι υπάρχει ΟΤΜ  $M_{HP_n}^{HP_{n+1}}$  που αποφασίζει την  $HP_n$ . Θεωρούμε τη συνάρτηση  $\phi : \{0,1\}^* \rightarrow \{0,1\}^*$  με:

$$\phi(x) = \begin{cases} \langle M_1, w \rangle & , \text{αν υπάρχει ΟΤΜ } M \text{ και } w \in \{0,1\}^* \text{ τέτοια ώστε } x = \langle M, w \rangle \\ x & , \text{αλλιώς} \end{cases}$$

όπου η ΟΤΜ  $M_1$  απεικονίζεται στο Σχήμα 8.2.2, και παρατηρούμε ότι:

1.  $\phi$  πλήρης και υπολογίσιμη.
2.  $\langle M, w \rangle \in HP_{n+1} \Leftrightarrow M^{HP_n}(w) \downarrow \Leftrightarrow M_1^{HP_{n+1}}(w) \downarrow \Leftrightarrow \langle M_1, w \rangle \in HP_{n+2}$

Επομένως η  $\phi$  είναι αναγωγή της  $HP_{n+1}$  στην  $HP_{n+2}$ . □

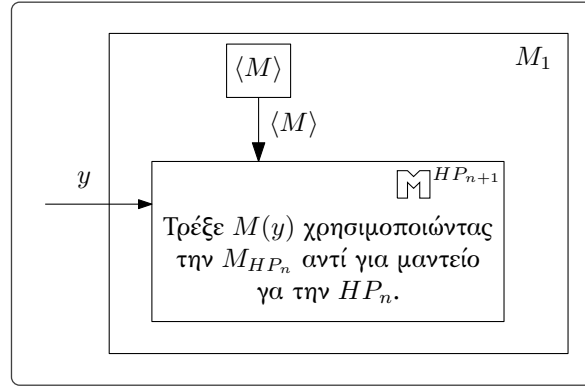
**Λήμμα 8.2.6.** Για κάθε  $n \geq 1$  ισχύει ότι  $HP_{n+1} \notin \text{REC}^{HP_n}$ .

*Απόδειξη.* Η απόδειξη είναι αντίστοιχη με την απόδειξη της Πρότασης 8.1.23<sup>2</sup>. □

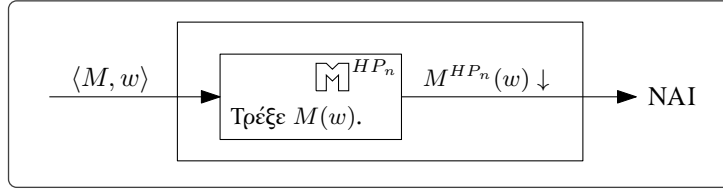
**Λήμμα 8.2.7.** Για κάθε  $n \geq 1$  ισχύει ότι  $HP_n \in \Sigma_n^0$ .

<sup>1</sup> Το γεγονός ότι τερματίζει δεν οφείλεται στους «χρησμούς» του μαντείου, αλλά στην σχεδίασή της και (φυσικά) στη λέξη εισόδου  $w$ . Για να είμαστε απολύτως τυπικοί θα πρέπει να ελέγξουμε τι γίνεται με την περίπτωση όπου  $x = \langle M, w \rangle$  και η  $M$  είναι ΟΤΜ (και όχι απλή ΤΜ) και ισχύει ότι  $M^{HP}(w) \downarrow$ , αλλά ο τερματισμός της  $M^{HP}(w)$  βασίζεται στους «χρησμούς» του μαντείου. Στην περίπτωση αυτή η ΟΤΜ του Σχήματος 8.2.1 θα επιστρέφει ΝΑΙ αλλά θα έπρεπε να επιστρέφει ΟΧΙ (καθώς η  $M$  δεν είναι απλή ΤΜ). Για να αποφύγουμε τη λάθος απάντηση της ΟΤΜ του Σχήματος 8.2.1 θα πρέπει πρώτα να ελέγξουμε αν η  $M$  είναι απλή ΤΜ ή όχι (ελέγχοντας την κωδικοποίησή της για να δούμε αν ικανοποιεί την ιδιότητα της Σύμβασης 8.1.16).

<sup>2</sup> Για την ακρίβεια, στην Πρόταση 8.1.23 δείξαμε ότι  $HP_2 \notin \text{REC}^{HP_1}$ .



**Σχήμα 8.2.2:** Η OTM  $M_1$  στην αναγωγή της  $HP_{n+1}$  στην  $HP_{n+2}$ .



**Σχήμα 8.2.3:** Η OTM στην απόδειξη του Λήμματος 8.2.7.

**Απόδειξη.** Θα το δείξουμε κάνοντας επαγωγή στο  $n$ .

**Βάση:** Για  $n = 1$  στην απόδειξη του Θεωρήματος 5.2.1 δείξαμε ότι  $HP \in \text{RE}$  (δηλαδή ότι  $HP_1 \in \Sigma_1^0$ ).

**Επαγωγική υπόθεση:** Υποθέτουμε ότι  $HP_n \in \Sigma_n^0$ .

**Επαγωγικό βήμα:** Παρατηρούμε ότι η OTM του Σχήματος 8.2.3 ημι-αποφασίζει την  $HP_{n+1}$  χρησιμοποιώντας για μαντείο την  $HP_n$ . Από την επαγωγική υπόθεση έχουμε ότι  $HP_n \in \Sigma_n^0$ , άρα  $HP_{n+1} \in \Sigma_{n+1}^0$ .  $\square$

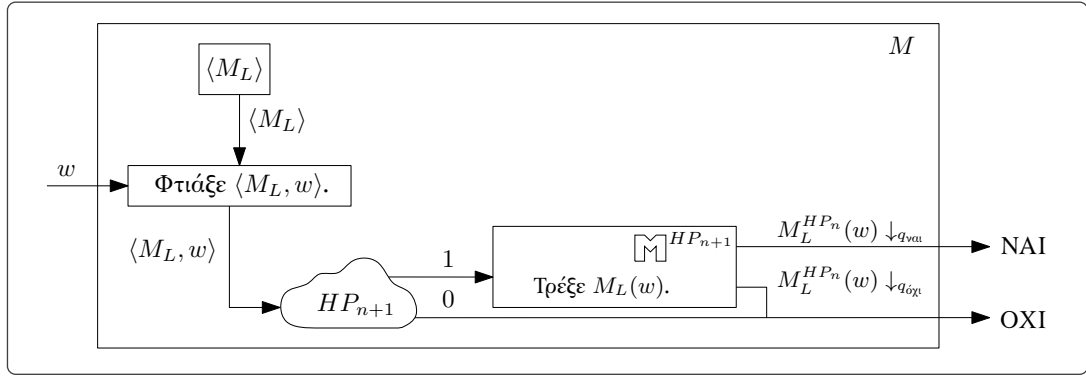
**Λήμμα 8.2.8.** Για κάθε  $n \geq 1$  ισχύει ότι  $\Sigma_n^0 \subseteq \text{REC}^{HP_n}$ .

**Απόδειξη.** Θα το δείξουμε κάνοντας επαγωγή στο  $n$ .

**Βάση:** Για  $n = 1$  πρέπει να δείξουμε ότι  $\Sigma_1^0 \subseteq \text{REC}^{HP_1}$  ή αλλιώς ότι  $\text{RE} \subseteq \text{REC}^{HP}$  το οποίο ισχύει από την Πρόταση 8.1.22.

**Επαγωγική υπόθεση:** Υποθέτουμε ότι  $\Sigma_n^0 \subseteq \text{REC}^{HP_n}$ .

**Επαγωγικό βήμα:** Έστω  $L \in \Sigma_{n+1}^0$ , δηλαδή υπάρχει γλώσσα  $A \in \Sigma_n^0$  τέτοια ώστε  $L \in \text{RE}^A$ . Από την επαγωγική υπόθεση προκύπτει ότι  $A \in \text{REC}^{HP_n}$ , συνεπώς από το Θεώρημα 8.1.27 έπεται ότι  $L \in \text{RE}^{HP_n}$ , άρα υπάρχει OTM  $M_L^{HP_n}$  που την ημι-αποφασίζει. Θεωρούμε την OTM  $M$  του Σχήματος 8.2.4. Η χρησιμοληπτική καθολική ΤΜ του Σχήματος 8.2.4 χρησιμοποιεί μαντείο για την  $HP_{n+1}$  και όχι για την  $HP_n$ . Για να προσομοιώσουμε όμως την λειτουργία


 Σχήμα 8.2.4: Η OTM  $M$  στην απόδειξη του Λήμματος 8.2.8.

της  $M_L^{HP_n}$  χρειαζόμαστε μαντείο για την  $HP_n$  αντ' αυτής όμως χρησιμοποιούμε την  $HP_{n+1}$ . Αυτό είναι εφικτό καθώς στην Πρόταση 8.2.5 δείξαμε ότι  $HP_n \in \text{REC}^{HP_{n+1}}$ , άρα μπορούμε να χρησιμοποιήσουμε στη θέση του μαντείου για την  $HP_n$  την OTM που αποφασίζει την  $HP_n$  και χρησιμοποιεί μαντείο για την  $HP_{n+1}$ .

Παρατηρούμε ότι η OTM  $M^{HP_{n+1}}$  του Σχήματος 8.2.4 αποφασίζει την  $L$ , άρα  $L \in \text{REC}^{HP_{n+1}}$ .  $\square$

**Παρατήρηση 8.2.9.** Έστω γλώσσα  $L \subseteq \{0,1\}^*$ . Για κάθε  $n \geq 2$  αν  $L \in \Sigma_n^0$  ( $L \in \Delta_n^0$ ) τότε  $L \in \text{RE}^{HP_{n-1}}$  ( $L \in \text{REC}^{HP_{n-1}}$  αντίστοιχα).

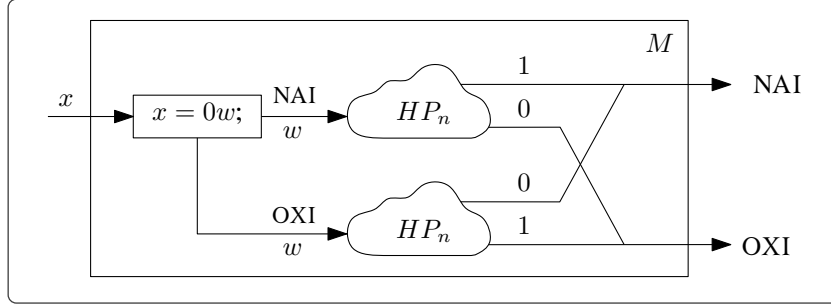
Πράγματι, αν  $L \in \Sigma_n^0$  τότε υπάρχει γλώσσα  $A \in \Sigma_{n-1}^0$  τέτοια ώστε  $L \in \text{RE}^A$ . Από το Λήμμα 8.2.8 ισχύει ότι  $\Sigma_{n-1}^0 \subseteq \text{REC}^{HP_{n-1}}$ , άρα  $A \in \text{REC}^{HP_{n-1}}$ , οπότε, από το Θεώρημα 8.1.27, προκύπτει ότι  $L \in \text{RE}^{HP_{n-1}}$ .

Πλέον είμαστε σε θέση να αποδείξουμε ότι ο Ορισμός 8.2.3 δεν ήταν εις μάτην, καθώς καμία από τις κλάσεις  $\Sigma_n^0$ ,  $\Pi_n^0$  και  $\Delta_n^0$  δεν «καταρρέει» μέσα σε κάποια άλλη. Η απόδειξη αυτού του ισχυρισμού δίνεται στο ακόλουθο Θεώρημα.

**Θεώρημα 8.2.10** (Θεώρημα Αριθμητικής Ιεραρχίας, Kleene-Turing). Για κάθε  $n \geq 1$  ισχύει ότι:

- i.  $\Sigma_n^0 \subset \Sigma_{n+1}^0$  και  $\Pi_n^0 \subset \Pi_{n+1}^0$
- ii.  $\Sigma_n^0 \not\subset \Pi_n^0$  και  $\Pi_n^0 \not\subset \Sigma_n^0$
- iii.  $\Sigma_n^0 \cup \Pi_n^0 \subset \Delta_{n+1}^0$
- iv.  $\Sigma_n^0 \cap \Pi_n^0 = \Delta_n^0$
- v.  $\Delta_n^0 \subset \Sigma_n^0$  και  $\Delta_n^0 \subset \Pi_n^0$

**Απόδειξη.** i. Από το Λήμμα 8.2.8 ξέρουμε ότι  $\Sigma_n^0 \subseteq \text{REC}^{HP_n}$ , άρα και ότι  $\Sigma_n^0 \subseteq \text{RE}^{HP_n}$ . Από το Λήμμα 8.2.7 ξέρουμε ότι  $HP_n \in \Sigma_n^0$ . Συνεπώς  $\Sigma_n^0 \subseteq \Sigma_{n+1}^0$ . Επίσης, αν  $L \in \Pi_n^0$  τότε  $\bar{L} \in \Sigma_n^0 \subseteq \Sigma_{n+1}^0$ , άρα  $L \in \Pi_{n+1}^0$ . Συνεπώς  $\Pi_n^0 \subseteq \Pi_{n+1}^0$ .



**Σχήμα 8.2.5:** Η OTM  $M$  που αποφασίζει την  $0HP_n \cup 1\overline{HP}_n$  αν χρησιμοποιήσουμε μαντείο για την  $HP_n$  (τυπικά πρέπει πρώτα να ελέγξουμε αν  $x = \epsilon$ ).

Ας δείξουμε τώρα ότι οι εγκλεισμοί είναι γνήσιοι. Από το Λήμμα 8.2.7 ξέρουμε ότι  $HP_{n+1} \in \Sigma_{n+1}^0$ , από το Λήμμα 8.2.8 ότι  $\Sigma_n^0 \subseteq \text{REC}^{HP_n}$  και από το Λήμμα 8.2.6 ότι  $HP_{n+1} \notin \text{REC}^{HP_n}$ , άρα  $HP_{n+1} \notin \Sigma_n^0$ . Επίσης,  $\overline{HP}_{n+1} \in \Pi_{n+1}^0$ , αφού  $HP_{n+1} \in \Sigma_{n+1}^0$ , αλλά  $\overline{HP}_{n+1} \notin \Pi_n^0$  καθώς τότε θα ίσχυε ότι  $HP_{n+1} \in \Sigma_n^0$ .

ii. Από το Λήμμα 8.2.7 ξέρουμε ότι  $HP_n \in \Sigma_n^0$  και από την Παρατήρηση 8.2.9 ότι  $\Sigma_n^0 \subseteq \text{RE}^{HP_{n-1}}$  για  $n \geq 2$ <sup>1</sup>. Συνεπώς  $HP_n \in \text{RE}^{HP_{n-1}}$ . Αν ίσχυε ότι  $\Sigma_n^0 \subseteq \Pi_n^0$  τότε  $HP_n \in \Pi_n^0$ , οπότε  $\overline{HP}_n \in \Sigma_n^0$ . Όπως πριν μπορούμε να δείξουμε ότι  $\overline{HP}_n \in \text{RE}^{HP_{n-1}}$ . Συνεπώς, από το Θεώρημα 8.1.26 θα ίσχυε ότι  $HP_n \in \text{REC}^{HP_{n-1}}$  πράγμα που αντιβαίνει στο Λήμμα 8.2.6.

Με αντίστοιχο τρόπο (χρησιμοποιώντας την  $\overline{HP}_n$ ) δείχνουμε ότι  $\Pi_n^0 \not\subseteq \Sigma_n^0$ .

iii. Από το Λήμμα 8.2.8 ξέρουμε ότι  $\Sigma_n^0 \subseteq \text{REC}^{HP_n}$ . Από το Λήμμα 8.2.7 ξέρουμε ότι  $HP_n \in \Sigma_n^0$ . Συνεπώς  $\Sigma_n^0 \subseteq \Delta_{n+1}^0$ . Επίσης, αν  $L \in \Pi_n^0$  τότε  $\overline{L} \in \Sigma_n^0 \subseteq \text{REC}^{HP_n}$ . Από το Θεώρημα 8.1.24 έπεται ότι και  $L \in \text{REC}^{HP_n}$ , άρα, όπως πριν,  $\Pi_n^0 \subseteq \Delta_{n+1}^0$ .

Ας δείξουμε τώρα ότι οι εγκλεισμοί είναι γνήσιοι. Θεωρούμε τη γλώσσα:

$$0HP_n \cup 1\overline{HP}_n = \{0w \in \{0,1\}^* \mid w \in HP_n\} \cup \{1w \in \{0,1\}^* \mid w \notin HP_n\}$$
<sup>2</sup>

Παρατηρούμε ότι  $0HP_n \cup 1\overline{HP}_n \in \text{REC}^{HP_n}$  καθώς η OTM  $M^{HP_n}$  του Σχήματος 8.2.5 την αποφασίζει. Άρα  $0HP_n \cup 1\overline{HP}_n \in \Delta_{n+1}^0$  (καθώς από το Λήμμα 8.2.7 ισχύει ότι  $HP_n \in \Sigma_n^0$ ).

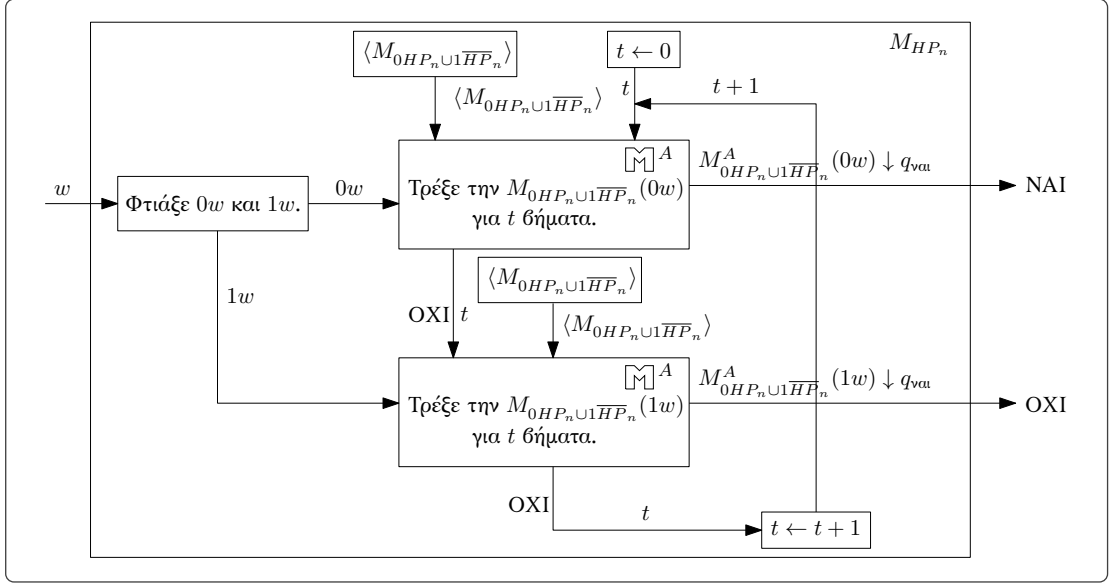
Έστω (προς άτοπο) ότι  $0HP_n \cup 1\overline{HP}_n \in \Sigma_n^0$  για  $n \geq 2$ <sup>3</sup>, δηλαδή υπάρχει γλώσσα  $A \in \Sigma_{n-1}^0$  και OTM, έστω  $M_{0HP_n \cup 1\overline{HP}_n}^A$ , που την ημι-αποφασίζει. Η OTM  $M_{HP_n}^A$  του Σχήματος 8.2.6 αποφασίζει την  $HP_n$ , συνεπώς  $HP_n \in \text{REC}^A$ . Καθώς  $A \in \Sigma_{n-1}^0$  και (λόγω του Λήμματος 8.2.8)  $\Sigma_{n-1}^0 \subseteq \text{REC}^{HP_{n-1}}$ , έπεται ότι  $HP_n \in \text{REC}^{HP_{n-1}}$  (λόγω του Θεωρήματος 8.1.27) πράγμα που αντιβαίνει στο Λήμμα 8.2.6.

Μένει να δείξουμε ότι  $0HP_n \cup 1\overline{HP}_n \notin \Pi_n^0$ , ή αλλιώς ότι  $\overline{0HP_n \cup 1\overline{HP}_n} \notin \Sigma_n^0$ . Παρατη-

<sup>1</sup> Για  $n = 1$  το ζητούμενο προκύπτει άμεσα από το γεγονός ότι  $\overline{HP} \notin \text{RE}$ .

<sup>2</sup> Θυμηθείτε τον Ορισμό 0.2.19.

<sup>3</sup> Για  $n = 1$  είναι προφανές ότι  $0HP \cup 1\overline{HP} \notin \text{RE}$  (εύκολα αποδεικνύουμε ότι  $\overline{HP} \leq_m 0HP \cup 1\overline{HP}$ ).



**Σχήμα 8.2.6:** Η OTM  $M_{HP_n}$  που (υποθετικά) αποφασίζει την  $HP_n$  αν χρησιμοποιήσει μαντείο για την  $A \in \Sigma_{n-1}^0$ .

ρούμε ότι:

$$\begin{aligned} \overline{0HP_n \cup 1\overline{HP}_n} &= \overline{0HP_n} \setminus \overline{1HP_n} \\ &= (\{x \in \{0,1\}^* \mid \exists w \in \{0,1\}^* (x = 1w)\} \cup \overline{0HP_n} \cup \{\epsilon\}) \setminus \overline{1HP_n} \\ &= 1HP_n \cup \overline{0HP_n} \cup \{\epsilon\} \end{aligned}$$

Επαναλαμβάνοντας την παραπάνω απόδειξη, με το 0 και το 1 στην αρχή των λέξεων αντεστραμμένα (λαμβάνοντας υπόψιν και την  $\epsilon$ ), αποδεικνύουμε ότι  $1HP_n \cup \overline{0HP_n} \cup \{\epsilon\} \notin \Sigma_n^0$  από το οποίο άμεσα προκύπτει το ζητούμενο.

iv. Έστω γλώσσα  $L \in \Delta_n^0$  για  $n \geq 2$ <sup>1</sup>, δηλαδή υπάρχει  $A \in \Sigma_{n-1}^0$  τέτοια ώστε  $L \in \text{REC}^A$ . Από το Θεώρημα 8.1.24 έπεται ότι  $\overline{L} \in \text{REC}^A$  επίσης. Άρα:

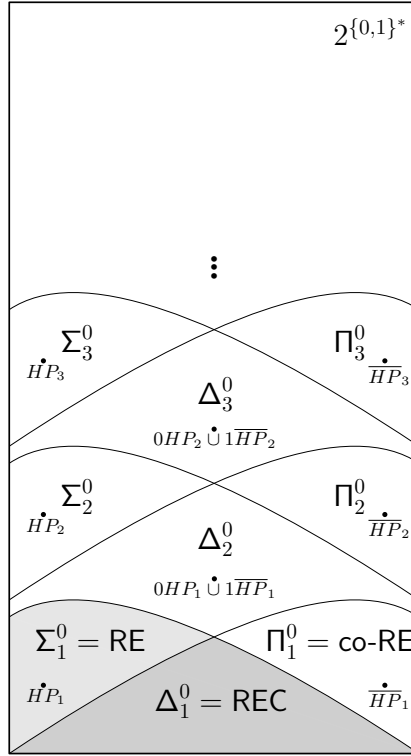
$$\left. \begin{aligned} L \in \text{REC}^A &\Rightarrow L \in \text{RE}^A \Rightarrow L \in \Sigma_n^0 \\ \overline{L} \in \text{REC}^A &\Rightarrow \overline{L} \in \text{RE}^A \Rightarrow \overline{L} \in \Sigma_n^0 \end{aligned} \right\} \Rightarrow L \in \Sigma_n^0 \cap \Pi_n^0$$

Έστω τώρα γλώσσα  $L \in \Sigma_n^0 \cap \Pi_n^0$ , δηλαδή οι  $L$  και  $\overline{L}$  ανήκουν στην κλάση  $\Sigma_n^0$ . Σύμφωνα με την Παρατήρηση 8.2.9 έπεται ότι  $L, \overline{L} \in \text{RE}^{HP_{n-1}}$ , ή αλλιώς ότι  $L \in \text{RE}^{HP_{n-1}} \cap \text{co-RE}^{HP_{n-1}}$ . Τέλος, από το Θεώρημα 8.1.26 έπεται ότι  $L \in \text{REC}^{HP_{n-1}}$  και από το Λήμμα 8.2.7 ότι  $HP_{n-1} \in \Sigma_{n-1}^0$ , άρα  $L \in \Delta_n^0$ .

v. Εξ ορισμού  $\Delta_n^0 \subseteq \Sigma_n^0$  και  $\Delta_n^0 \subseteq \Pi_n^0$  (για το δεύτερο χρειαζόμαστε και το Θεώρημα 8.1.24). Έστω (προς άτοπο) ότι  $HP_n \in \Delta_n^0$  για  $n \geq 2$ <sup>2</sup>. Από την Παρατήρηση 8.2.9 έπεται ότι

<sup>1</sup> Για  $n = 1$  το ζητούμενο προκύπτει από τα Θεωρήματα 1.5.3 και 1.5.4.

<sup>2</sup> Για  $n = 1$  στο Κεφάλαιο 5 δείξαμε ότι  $HP, \overline{HP} \notin \text{REC}$ .



Σχήμα 8.2.7: Η Αριθμητική Ιεραρχία.

$HP_n \in \text{REC}^{HP_{n-1}}$ , πράγμα που αντιβαίνει στο Λήμμα 8.2.6. Αντίστοιχα αποδεικνύεται ότι  $\overline{HP_n} \notin \Delta_n^0$ .  $\square$

Οι κλάσεις γλωσσών της Αριθμητικής Ιεραρχίας φαίνονται στο Σχήμα 8.2.7.

### 8.3 Αλγοριθμικές Αναγωγές

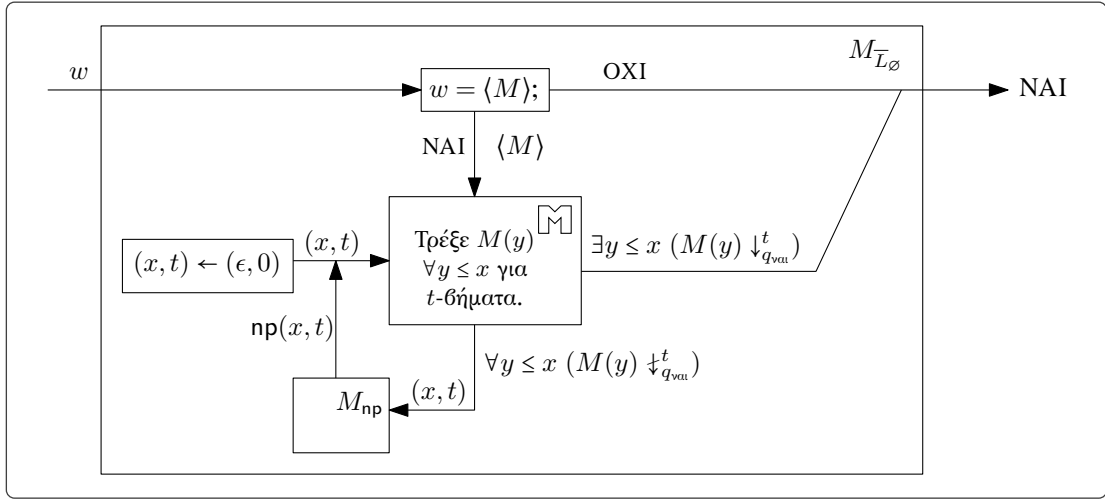
Οι χρησμοληπτικές ΤΜ και τα μαντεία χρησιμοποιούνται επίσης για να ορίσουμε μία ακόμα μορφή αναγωγής μεταξύ γλωσσών. Οι αναγωγές αυτές μπορεί να θεωρηθούν γενίκευση των απεικονιστικών αναγωγών για λόγους που θα συζητηθούν στη συνέχεια.

**Ορισμός 8.3.1.** Έστω γλώσσες  $A, B \subseteq \{0, 1\}^*$ . Η  $A$  ανάγεται αλγοριθμικά (ή κατά Turing) στη  $B$ , συμβολισμός  $A \leq_T B$ , αν  $A \in \text{REC}^B$ .

Στο Παράδειγμα 8.1.12 είδαμε ότι  $L_{\text{Αποδοχής}} \leq_T HP$ . Ας δούμε ένα ακόμα παράδειγμα.

**Παράδειγμα 8.3.2.** Θα δείξουμε ότι η γλώσσα  $L_\emptyset$  του Παραδείγματος 5.2.20 ανάγεται αλγοριθμικά στην  $HP$ . Πρώτα θα δείξουμε ότι  $L_\emptyset \in \text{co-RE}$ , δηλαδή ότι  $\overline{L_\emptyset} \in \text{RE}$ . Παρατηρούμε ότι:

$$\overline{L_\emptyset} = \{w \in \{0, 1\}^* \mid (\exists \text{ TM } M (w = \langle M \rangle)) \rightarrow (L(M) \neq \emptyset)\}$$



**Σχήμα 8.3.1:** Η ΤΜ που ημι-αποφασίζει την  $\bar{L}_\emptyset$ , όπου  $M_{np}$  η ΤΜ της Παρατήρησης 1.4.19.

και ότι η ΤΜ  $M_{\bar{L}_\emptyset}$  του Σχήματος 8.3.1 την ημι-αποφασίζει. Από το Θεώρημα 8.2.10 (το ii.), αφού  $L_\emptyset \in \Pi_1^0$ , προκύπτει ότι  $L_\emptyset \in \Delta_2^0$ . Από την Παρατήρηση 8.2.9 έπεται ότι  $L_\emptyset \in \text{REC}^{HP}$ . Επομένως  $L_\emptyset \leq_T HP$ .

Επιπλέον, αφού  $L_\emptyset \notin \text{REC}$  (δες Παράδειγμα 5.2.20), μπορούμε να κατατάξουμε την  $L_\emptyset$  στην Αριθμητική Ιεραρχία. Έπεται ότι  $L_\emptyset \in \Pi_1^0 \setminus \Delta_1^0$ .

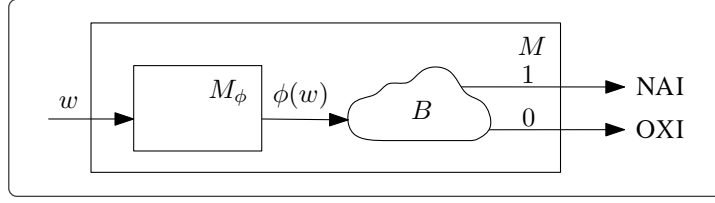
Διαισθητικά ο ορισμός της αλγοριθμικής αναγωγής μας λέει ότι αν η ύπαρξη ενός αλγορίθμου για τη γλώσσα  $B$  μπορεί να χρησιμοποιηθεί, έστω και με μη «σαφώς ορισμένο» τρόπο (μέσω ενός μαντείου για τη  $B$ <sup>1</sup>), για να αποφασίσουμε την  $A$ , τότε  $A \leq_T B$ . Αν έχουμε έναν σαφώς ορισμένο τρόπο (μέσω μίας υπολογίσιμης συνάρτησης<sup>2</sup>) να εκμεταλλευτούμε την ύπαρξη αλγορίθμου για την  $B$  τότε η  $A$  ανάγεται απεικονιστικά στη  $B$ .

Μία πιο ουσιαστική διαφορά μεταξύ των δύο μορφών αναγωγής προκύπτει όταν ενδιαφερόμαστε και για τον χρόνο υπολογισμού. Προφανώς αν  $A \leq_T B$  και υπάρχει αλγόριθμος που αποφασίζει τη  $B$  τότε υπάρχει αλγόριθμος που αποφασίζει την  $A$ <sup>3</sup>. Καθώς όμως μπορεί να γίνουν πολλά ερωτήματα προς το μαντείο, αυτός ο αλγόριθμος για την  $A$  πιθανώς να χρειάζεται παραπάνω χρόνο από τον αλγόριθμο για τη  $B$  (περισσότερο και από την ΟΤΜ που αποφασίζει την  $A$  ως προς τη  $B$ , αν δεν μετρήσουμε στον χρόνο αυτόν τα ερωτήματα προς το μαντείο). Στις απεικονιστικές αναγωγές όμως ο χρόνος του αλγορίθμου για την  $A$  είναι πάντα ο χρόνος που χρειαζόμαστε για να υπολογίσουμε τη συνάρτηση της αναγωγής συν τον χρόνο που χρειάζεται ο αλγόριθμος για τη  $B$  (με είσοδο την εικόνα της αναγωγής). Στην Υπολογιστική Πολυπλοκότητα οι αλγοριθμικές αναγωγές είναι γνωστές και ως αναγω-

<sup>1</sup> Τα εκάστοτε ερωτήματα του μαντείου δεν προκύπτουν κατά ανάγκη με τον ίδιο τρόπο.

<sup>2</sup> Εδώ τα ερωτήματα πάντα προκύπτουν με τον ίδιο τρόπο.

<sup>3</sup> Αντικαθιστούμε κάθε αλληλεπίδραση με το μαντείο με μία εκτέλεση του αλγορίθμου για τη  $B$ , με είσοδο τη λέξη για την οποία έγινε το ερώτημα προς το μαντείο.



Σχήμα 8.3.2: Η OTM  $M$  στην απόδειξη της Πρότασης 8.3.3.

γές Cook<sup>1</sup> (προς τιμήν του Stephen Cook), ενώ οι απεικονιστικές αναγωγές ως αναγωγές Karp<sup>2</sup> (προς τιμήν του Richard Karp).

Παρατηρήστε ότι μπορούμε να θεωρήσουμε ότι οι απεικονιστικές αναγωγές είναι στην ουσία αλγοριθμικές αναγωγές, μόνο που έχουμε το δικαίωμα να κάνουμε ένα και μόνο ερώτημα στο μαντείο (για τη λέξη που προκύπτει εφαρμόζοντας τη συνάρτηση αναγωγής πάνω στη λέξη εισόδου) και η απάντηση που θα επιστρέψει η μηχανή μας είναι ακριβώς η απάντηση του μαντείου. Αυτή είναι η ιδέα της απόδειξης της πρότασης που ακολουθεί.

**Πρόταση 8.3.3.** Έστω γλώσσες  $A, B \subseteq \{0, 1\}^*$ . Αν  $A \leq_m B$  τότε  $A \leq_T B$ .

*Απόδειξη.* Έστω  $\phi$  η αναγωγή της  $A$  στη  $B$  και  $M_\phi$  η TM που την υπολογίζει. Παρατηρούμε ότι η OTM  $M^B$  του Σχήματος 8.3.2 αποφασίζει την  $A$ , καθώς:

- $w \in A \Leftrightarrow \phi(w) \in B \Leftrightarrow$  Το μαντείο θα επιστρέψει 1  $\Leftrightarrow M^B(w) \downarrow_{q_{\text{ναι}}}$
- $w \notin A \Leftrightarrow \phi(w) \notin B \Leftrightarrow$  Το μαντείο θα επιστρέψει 0  $\Leftrightarrow M^B(w) \downarrow_{q_{\text{όχι}}}$

Συνεπώς  $A \leq_T B$ . □

Συνεπώς οι αλγοριθμικές αναγωγές αποτελούν γενίκευση των απεικονιστικών. Η γενίκευση αυτή είναι ουσιαστική, καθώς, όπως μας δείχνει η ακόλουθη Παρατήρηση, το αντίστροφο της Πρότασης 8.3.3 δεν ισχύει.

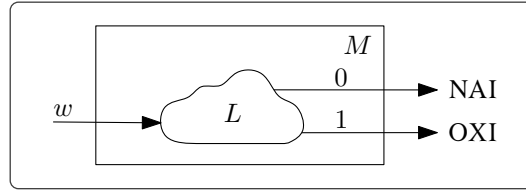
**Παρατήρηση 8.3.4.** Έστω γλώσσα  $L \subseteq \{0, 1\}^*$ . Παρατηρούμε ότι  $\bar{L} \leq_T L$  καθώς η OTM  $M^L$  του Σχήματος 8.3.3 την αποφασίζει. Αυτό φυσικά δεν ισχύει με τις απεικονιστικές αναγωγές, καθώς η γλώσσα  $\overline{HP}$  δεν ανάγεται απεικονιστικά στην  $HP$ , καθώς τότε θα ίσχυε ότι  $\overline{HP} \in \text{RE}$ .

Μία άλλη σημαντική διαφορά μεταξύ των δύο αναγωγών περιγράφεται στις Ασκήσεις 8.6 και 8.7.

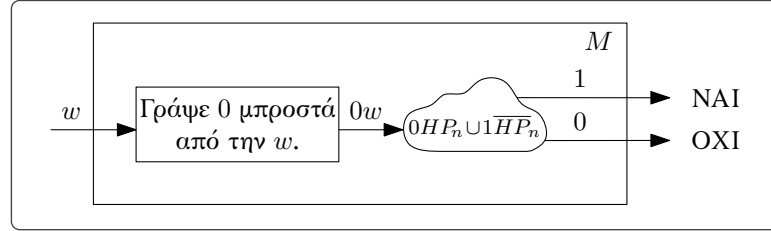
**Παρατήρηση 8.3.5.** Η σχέση  $\leq_T$  είναι μεταβατική λόγω του Θεωρήματος 8.1.27 (το ii.).

<sup>1</sup> Εκεί μπορούμε να κάνουμε μόνο ένα πολυωνυμικό πλήθος ερωτημάτων προς το μαντείο και, φυσικά, η OTM χρειάζεται πολυωνυμικό πλήθος βημάτων για να τερματίσει.

<sup>2</sup> Η συνάρτηση της αναγωγής πρέπει να είναι υπολογίσιμη σε πολυωνυμικό χρόνο.



Σχήμα 8.3.3: Η OTM  $M$  που αποφασίζει την  $\bar{L}$  αν χρησιμοποιήσει μαντείο για την  $L$ .



Σχήμα 8.4.1: Η OTM  $M$  στην απόδειξη της Πρότασης 8.4.3.

## 8.4 Πληρότητα γλωσσών ως προς σχέση αναγωγής

Μία ακόμα έννοια (ενδεχομένως) γνωστή από την Υπολογιστική Πολυπλοκότητα είναι η έννοια της πληρότητας μίας γλώσσα σε μία κλάση γλωσσών.

**Ορισμός 8.4.1.** Έστω κλάση γλωσσών  $\mathcal{C} \subseteq 2^{\{0,1\}^*}$  και γλώσσα  $B \subseteq \{0,1\}^*$ . Η  $B$  καλείται  $\mathcal{C}$ -δύσκολη ως προς τη σχέση αναγωγής  $\leq \in \{\leq_m, \leq_T\}$  αν για κάθε  $A \in \mathcal{C}$  ισχύει ότι  $A \leq B$ . Αν επιπλέον ισχύει ότι  $B \in \mathcal{C}$ , τότε η  $B$  καλείται  $\mathcal{C}$ -πλήρης ως προς τη  $\leq$ .

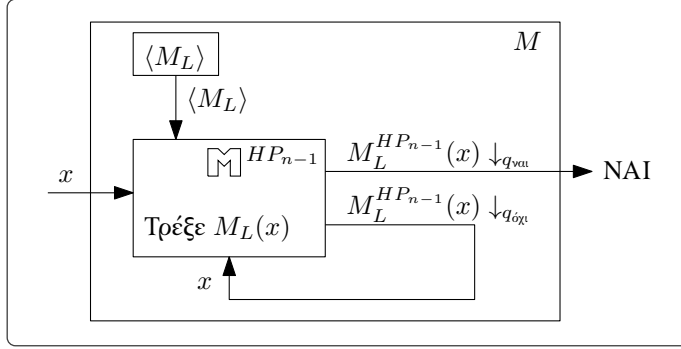
**Παρατήρηση 8.4.2.** Από το Λήμμα 8.2.8 προκύπτει ότι για κάθε  $n \geq 1$  η  $HP_n$  είναι  $\Sigma_n^0$ -δύσκολη ως προς τη  $\leq_T$  και από το Λήμμα 8.2.7 ότι είναι και  $\Sigma_n^0$ -πλήρης ως προς τη  $\leq_T$ . Αναλόγως προκύπτει ότι η  $\overline{HP}_n$  είναι  $\Pi_n^0$ -πλήρης ως προς τη  $\leq_T$ .

Παρατηρήστε όμως και το εξής: Ως προς την  $\leq_T$  η  $HP_n$  είναι  $\Pi_n^0$ -δύσκολη και η  $\overline{HP}_n$  είναι  $\Sigma_n^0$ -δύσκολη, όπως επίσης η  $HP_n$  είναι  $\Delta_{n+1}^0$ -πλήρης<sup>1</sup>!

**Πρόταση 8.4.3.** Για κάθε  $n \geq 1$  η γλώσσα  $0HP_n \cup 1\overline{HP}_n$  είναι  $\Delta_{n+1}^0$ -πλήρης ως προς τη  $\leq_T$ .

**Απόδειξη.** Στο ii. της απόδειξης του Θεωρήματος 8.2.10 δείξαμε ότι  $0HP_n \cup 1\overline{HP}_n \in \Delta_{n+1}^0$ , συνεπώς αρκεί να δείξουμε ότι είναι  $\Delta_{n+1}^0$ -δύσκολη ως προς τη  $\leq_T$ . Έστω  $L \in \Delta_{n+1}^0$ . Από την Παρατήρηση 8.2.9 έπεται ότι  $L \in \text{REC}^{HP_n}$ , άρα  $L \leq_T HP_n$ . Παρατηρούμε ότι η OTM  $M^{0HP_n \cup 1\overline{HP}_n}$  του Σχήματος 8.4.1 αποφασίζει την  $HP_n$ , άρα  $HP_n \leq_T 0HP_n \cup 1\overline{HP}_n$  και από τη μεταβατικότητα της  $\leq_T$  έπεται ότι  $L \leq_T 0HP_n \cup 1\overline{HP}_n$ .  $\square$

<sup>1</sup> Αυτός είναι ο βασικός λόγος που αποφεύγουμε να χρησιμοποιούμε αλγοριθμικές αναγωγές στην υπολογιστική πολυπλοκότητα: Δεν είναι αρκετά «ευαίσθητες» στη διαφορετικότητα των κλάσεων πολυπλοκότητας (π.χ. κάθε NP-πλήρης γλώσσα είναι co-NP-δύσκολη ως προς  $\leq_T$ ).


 Σχήμα 8.4.2: Η OTM  $M$  στην απόδειξη του Θεωρήματος 8.4.4.

Ας δούμε τι συμβαίνει όσον αφορά την πληρότητα των κλάσεων της Αριθμητικής Ιεραρχίας ως προς τη σχέση  $\leq_m$ .

**Θεώρημα 8.4.4.** Για κάθε  $n \geq 1$  ισχύει ότι:

- i. Η γλώσσα  $HP_n$  είναι  $\Sigma_n^0$ -πλήρης ως προς τη  $\leq_m$ .
- ii. Η γλώσσα  $\overline{HP}_n$  είναι  $\Pi_n^0$ -πλήρης ως προς τη  $\leq_m$ .

*Απόδειξη.* <sup>1</sup> i. Από το Λήμμα 8.2.7 προκύπτει ότι  $HP_n \in \Sigma_n^0$ . Μένει να δείξουμε ότι η  $HP_n$  είναι  $\Sigma_n^0$ -δύσκολη ως προς τη  $\leq_m$ . Έστω γλώσσα  $L \in \Sigma_n^0$ . Από την Παρατήρηση 8.2.9 έπεται ότι  $L \in \text{RE}^{HP_{n-1}}$ , άρα υπάρχει OTM  $M_L^{HP_{n-1}}$  που την ημι-αποφασίζει. Θεωρούμε συνάρτηση  $\phi : \{0, 1\}^* \rightarrow \{0, 1\}^*$  με  $\phi(w) = \langle M, w \rangle$  όπου  $M$  η OTM του Σχήματος 8.4.2 και παρατηρούμε ότι:

1.  $\phi$  πλήρης και υπολογίσιμη.
2. -  $w \in L \Rightarrow M_L^{HP_{n-1}}(w) \downarrow_{q_{\text{ναι}}} \Rightarrow M^{HP_{n-1}}(w) \downarrow \Rightarrow \langle M, w \rangle \in HP_n$   
 -  $w \notin L \Rightarrow M_L^{HP_{n-1}}(w) \not\downarrow_{q_{\text{ναι}}} \Rightarrow M^{HP_{n-1}}(w) \uparrow \Rightarrow \langle M, w \rangle \notin HP_n$

Συνεπώς  $L \leq_m HP_n$ .

ii. Από το Λήμμα 8.2.7 προκύπτει ότι  $HP_n \in \Sigma_n^0$ , άρα  $\overline{HP}_n \in \Pi_n^0$ . Μένει να δείξουμε ότι η  $\overline{HP}_n$  είναι  $\Pi_n^0$ -δύσκολη ως προς τη  $\leq_m$ . Έστω γλώσσα  $L \in \Pi_n^0$ , δηλαδή  $\bar{L} \in \Sigma_n^0$ . Από το i. έπεται ότι  $\bar{L} \leq_m HP_n$  και την Πρόταση 5.2.22 ότι  $L \leq_m \overline{HP}_n$ .  $\square$

Η απόδειξη του παρακάτω θεωρήματος αφήνεται ως άσκηση.

**Θεώρημα 8.4.5.** Για κάθε  $n \geq 1$  ισχύει ότι η γλώσσα  $0HP_n \cup 1\overline{HP}_n$  είναι  $\Delta_{n+1}^0$ -πλήρης ως προς τη  $\leq_m$ .

<sup>1</sup> Θα αποδείξουμε το θεώρημα για  $n \geq 2$ . Η περίπτωση όπου  $n = 1$  αφήνεται ως άσκηση.

## 8.5 Πέρα από την Αριθμητική Ιεραρχία

Σε αυτήν την παράγραφο θα δώσουμε έναν εναλλακτικό ορισμό των κλάσεων της Αριθμητικής Ιεραρχίας, αυτήν τη φορά χωρίς τη χρήση των μαντειών.

**Ορισμός 8.5.1.** Ένα  $n$ -μελές κατηγορήμα, για  $n \in \mathbb{N}$ , είναι μία σχέση του  $(\{0, 1\}^*)^n$ .

**Συμβολισμός 8.5.2.** Έστω  $n$ -μελές κατηγορήμα  $R$ . Αντί για  $(x_1, \dots, x_n) \in R$  θα γράφουμε  $R(x_1, \dots, x_n)$ .

**Ορισμός 8.5.3.** Ένα  $n$ -μελές κατηγορήμα  $R$  είναι αποφάνσιμο αν η γλώσσα:

$$L_R = \{(x_1, \dots, x_n) \in \{0, 1\}^* \mid R(x_1, \dots, x_n)\}$$

είναι αναδρομική.

Το παρακάτω Θεώρημα-Ορισμός δίνεται χωρίς απόδειξη.

**Θεώρημα 8.5.4** (Ποσοδεικτικός ορισμός Αριθμητικής Ιεραρχίας). Έστω μία γλώσσα  $L \subseteq \{0, 1\}^*$ . Ισχύει ότι:

- i.  $L \in \Sigma_n^0$  αν υπάρχει αποφάνσιμο  $(n+1)$ -μελές κατηγορήμα  $R$  τέτοιο ώστε:

$$L = \{x \in \{0, 1\}^* \mid \exists y_1 \forall y_2 \dots * y_n R(x, y_1, \dots, y_n)\}$$

$$\text{όπου } * = \begin{cases} \exists & , \text{ αν το } n \text{ είναι περιττό} \\ \forall & , \text{ αλλιώς} \end{cases}.$$

- ii.  $L \in \Pi_n^0$  αν υπάρχει αποφάνσιμο  $(n+1)$ -μελές κατηγορήμα  $R$  τέτοιο ώστε:

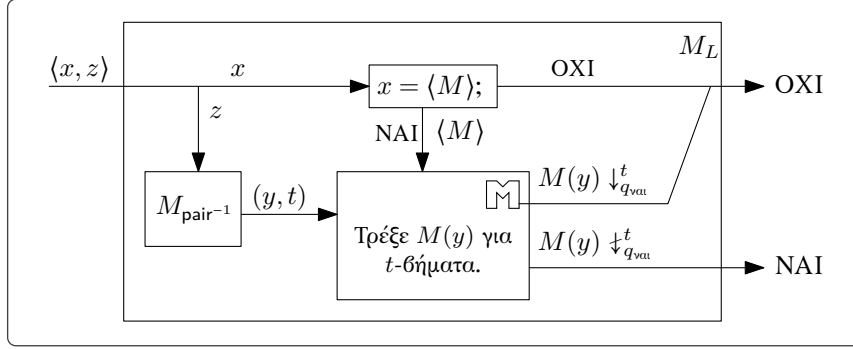
$$L = \{x \in \{0, 1\}^* \mid \forall y_1 \exists y_2 \dots * y_n R(x, y_1, \dots, y_n)\}$$

$$\text{όπου } * = \begin{cases} \forall & , \text{ αν το } n \text{ είναι περιττό} \\ \exists & , \text{ αλλιώς} \end{cases}.$$

**Παρατήρηση 8.5.5.** Παρατηρήστε ότι ο ποσοδεικτικός ορισμός των κλάσεων της Αριθμητικής Ιεραρχίας επεκτείνει τον ορισμό της κλάσης RE που είδαμε στην Άσκηση 1.14.

**Παρατήρηση 8.5.6.** Το πως εναλλάσσονται οι ποσοδείκτες είναι αυτό που διαχωρίζει τις γλώσσες σε αυτές που ανήκουν στη  $\Sigma_n^0$  και σε αυτές που ανήκουν στην  $\Pi_n^0$ . Το πλήθος των εναλλαγών είναι εξίσου σημαντικό καθώς από το Θεώρημα 8.2.10 προκύπτει ότι υπάρχουν γλώσσες που ορίζονται με  $n$ -εναλλαγές ποσοδεικτών αλλά όχι με  $n-1$ . Τέλος, οι κλάσεις  $\Delta_n^0$  είναι ακριβώς οι τομές  $\Sigma_n^0 \cap \Pi_n^0$  (σύμφωνα με το Θεώρημα 8.2.10).

Ο ορισμός αυτός είναι πολύ χρήσιμος για να κατατάσσουμε τις γλώσσες στην Αριθμητική Ιεραρχία. Ας δούμε μερικά παραδείγματα.



Σχήμα 8.5.1: Η ΤΜ του Παραδείγματος 8.5.7.

**Παράδειγμα 8.5.7.** Θα δείξουμε ότι η γλώσσα  $L_\emptyset$  του Παραδείγματος 5.2.20 ανήκει στο  $\Pi_1^0$  χρησιμοποιώντας τον ποσοδεικτικό ορισμό της Αριθμητικής Ιεραρχίας<sup>1</sup>. Παρατηρούμε ότι:

$$\begin{aligned} L_\emptyset &= \{ \langle M \rangle \in \{0, 1\}^* \mid L(M) = \emptyset \} \\ &= \{ \langle M \rangle \in \{0, 1\}^* \mid \forall y \forall t (M(y) \not\downarrow_{q_{\text{vac}}}^t) \}^2 \\ &= \{ x \in \{0, 1\}^* \mid \forall y \forall t (x = \langle M \rangle \wedge M(y) \not\downarrow_{q_{\text{vac}}}^t) \} \end{aligned}$$

Μπορούμε να «συνδυάσουμε» τους δύο καθολικούς ποσοδείκτες σε έναν χρησιμοποιώντας την 1-1 και επί συνάρτηση  $\text{pair} : (\{0, 1\}^*)^2 \rightarrow \{0, 1\}^*$ , με  $\text{pair}(y, t) = \langle \binom{i+j+1}{2} + i \rangle$ -οστή λέξη στη λεξικογραφική διάταξη», όπου  $i$  και  $j$  η σειρά εμφάνισης της  $y$  και  $t$  στη λεξικογραφική διάταξη. Συνεπώς μπορούμε να γράψουμε:

$$L_\emptyset = \{ x \in \{0, 1\}^* \mid \forall z (x = \langle M \rangle \wedge \text{pair}^{-1}(z) = (y, t) \wedge M(y) \not\downarrow_{q_{\text{vac}}}^t) \}$$

Η γλώσσα  $L = \{ \langle x, z \rangle \in \{0, 1\}^* \mid x = \langle M \rangle \wedge z = \text{pair}^{-1}(y, t) \wedge M(y) \not\downarrow_{q_{\text{vac}}}^t \}$  είναι αναδρομική, καθώς η ΤΜ του Σχήματος 8.5.1 την αποφασίζει ( $M_{\text{pair}^{-1}}$  είναι η ΤΜ που υπολογίζει την  $\text{pair}^{-1}$ <sup>3</sup>). Άρα, από το Θεώρημα 8.5.4 έπεται ότι  $L_\emptyset \in \Pi_1^0$ .

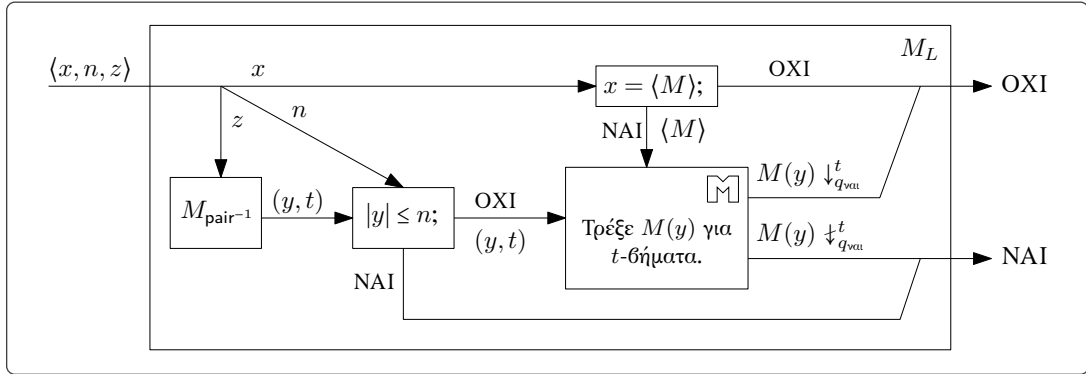
**Παράδειγμα 8.5.8.** Θα δείξουμε ότι η γλώσσα  $L_{\mathbb{N}}$  του Παραδείγματος 6.1.2 είναι  $\Sigma_2^0$ -πλήρης ως προς τη  $\leq_m$ . Πρώτα θα δείξουμε ότι ανήκει στο  $\Sigma_2^0$ . Παρατηρούμε ότι:

$$\begin{aligned} L_{\mathbb{N}} &= \{ \langle M \rangle \in \{0, 1\}^* \mid |L(M)| \in \mathbb{N} \} \\ &= \{ \langle M \rangle \in \{0, 1\}^* \mid \exists n \forall y (y > n \rightarrow y \notin L(M)) \} \\ &= \{ \langle M \rangle \in \{0, 1\}^* \mid \exists n \forall y \forall t (y \leq n \vee M(y) \not\downarrow_{q_{\text{vac}}}^t) \} \\ &= \{ x \in \{0, 1\}^* \mid \exists n \forall z (x = \langle M \rangle \wedge \text{pair}^{-1}(z) = (y, t) \wedge (y \leq n \vee M(y) \not\downarrow_{q_{\text{vac}}}^t)) \} \end{aligned}$$

<sup>1</sup> Έχουμε ήδη δείξει ότι  $L_\emptyset \in \Pi_1^0$  στο Παράδειγμα 8.3.2.

<sup>2</sup> Εδώ «ταυτίζουμε» τη λέξη  $t$  με τη σειρά εμφάνισής της στη λεξικογραφική διάταξη προκειμένου να τη «χρησιμοποιήσουμε» ως αριθμό.

<sup>3</sup> Η  $\text{pair}^{-1}$  είναι υπολογίσιμη συνάρτηση καθώς η  $\text{pair}$  είναι υπολογίσιμη συνάρτηση (δες Πρόταση 1.2.37, για να είμαστε τυπικοί, σε αυτή την περίπτωση θα πρέπει η ΤΜ του Σχήματος 1.2.14 να «δοκιμάζει» ζευγάρια και όχι μεμονωμένες λέξεις).



Σχήμα 8.5.2: Η ΤΜ  $M_L$  του Παραδείγματος 8.5.8.

Η γλώσσα  $L = \{\langle x, n, z \rangle \in \{0, 1\}^* \mid x = \langle M \rangle \wedge \text{pair}^{-1}(z) = (y, t) \wedge (y \leq n \vee M(y) \nmid_{q_{\text{vui}}}^t)\}$  είναι αναδρομική, καθώς η ΤΜ του Σχήματος 8.5.2 την αποφασίζει. Άρα, από το Θεώρημα 8.5.4 έπεται ότι  $L_{\mathbb{N}} \in \Sigma_2^0$ .

Έστω τώρα γλώσσα  $L \in \Sigma_2^0$ , δηλαδή υπάρχει αποφάνσιμο 3-μελές κατηγορήμα  $R$  τέτοιο ώστε:

$$L = \{x \in \{0, 1\}^* \mid \exists y \forall z R(x, y, z)\}$$

Έστω επίσης ότι η ΤΜ  $M_R$  αποφασίζει την  $L_R$ . Θεωρούμε τη συνάρτηση  $\phi : \{0, 1\}^* \rightarrow \{0, 1\}^*$  με  $\phi(x) = \langle M_x \rangle$  όπου  $M_x$  η ΤΜ του Σχήματος 8.5.3. Παρατηρούμε ότι:

1.  $\phi$  πλήρης και υπολογίσιμη.
2. -  $x \in L \Rightarrow \exists y_0 \forall z (M_R(x, y_0, z) \downarrow_{q_{\text{vui}}}) \Rightarrow \text{Αν } w \geq y_0 \text{ τότε } M_x(w) \uparrow \text{ καθώς ισχύει ότι } M_R(x, y_0, z) \downarrow_{q_{\text{vui}}} \text{ για κάθε } z \Rightarrow L(M_x) \subseteq \{w \in \{0, 1\}^* \mid w < y_0\} \Rightarrow |L(M_x)| \in \mathbb{N} \Rightarrow \langle M_x \rangle \in L_{\mathbb{N}}$
- $x \notin L \Rightarrow \forall y \exists z (M_R(x, y, z) \downarrow_{q_{\text{vui}}}) \Rightarrow \forall w (\forall y \leq w \exists z (M_R(x, y, z) \downarrow_{q_{\text{vui}}})) \Rightarrow \forall w (M_x(w) \downarrow_{q_{\text{vui}}}) \Rightarrow L(M_x) = \{0, 1\}^* \Rightarrow |L(M_x)| = \aleph_0 \Rightarrow \langle M_x \rangle \notin L_{\mathbb{N}}$

Συνεπώς,  $L \leq_m L_{\mathbb{N}}$ .

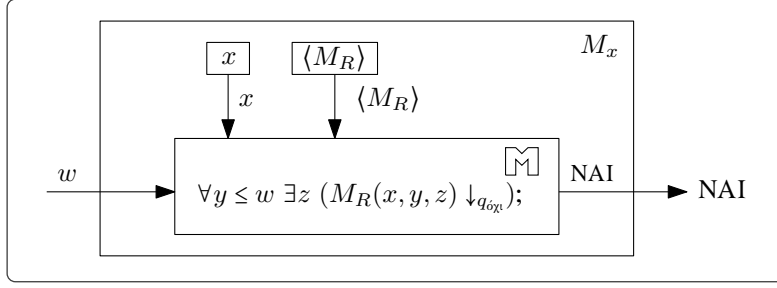
**Ορισμός 8.5.9.** <sup>1</sup> Για κάθε  $n \geq 1$  ορίζουμε τη γλώσσα:

$$T_n = \{\langle \varphi \rangle \in \{0, 1\}^* \mid \varphi = \exists y_1 \forall y_2 \cdots * y_n \psi(y_1, \dots, y_n) \text{ και } \mathfrak{N} \models \varphi\}$$

όπου  $\psi$  τύπος της  $\Gamma_1^{\text{θα}}$ ,  $*$  =  $\begin{cases} \exists & , \text{ αν το } n \text{ είναι περιττό} \\ \forall & , \text{ αλλιώς} \end{cases}$  και  $\langle \varphi \rangle$  είναι η λέξη του  $\{0, 1\}^*$  που αντιστοιχούμε στον φυσικό αριθμό που κωδικοποιεί την πρόταση  $\varphi$  σύμφωνα με την Παράγραφο Α.5.1.

**Θεώρημα 8.5.10.** Για κάθε  $n \geq 1$  η  $T_n$  είναι  $\Sigma_n^0$ -δύσκολη γλώσσα ως προς τη  $\leq_m$ .

<sup>1</sup> Δες Ορισμούς Α.2.5, Α.5.1 και Α.5.2



**Σχήμα 8.5.3:** Η ΤΜ  $M_x$  του Παραδείγματος 8.5.8. Να τονίσουμε ότι μέσα στην καθολική ΤΜ ο έλεγχος για την ύπαρξη του  $z$  γίνεται χωρίς κάποια επιπλέον φροντίδα. Δοκιμάζουμε όλα τα  $z \in \{0, 1\}^*$  ακολουθώντας όποια σειρά μας αρέσει (τη λεξικογραφική διάταξη π.χ.).

**Απόδειξη.** Έστω γλώσσα  $L \in \Sigma_n^0$ , δηλαδή υπάρχει αποφάνσιμο  $(n+1)$ -μελές κατηγορήμα  $R$  τέτοιο ώστε:

$$L = \{x \in \{0, 1\}^* \mid \exists y_1 \forall y_2 \cdots * y_n R(x, y_1, \dots, y_n)\}$$

όπου  $*$  =  $\begin{cases} \exists & , \text{ αν το } n \text{ είναι περιττό} \\ \forall & , \text{ αλλιώς} \end{cases}$ .

Αφού το  $R$  είναι αποφάνσιμο από το Θεώρημα Α.5.11 έπεται ότι είναι αναπαραστάσιμο στο  $P$  έστω από τον τύπο  $\varphi_R(x, y_1, \dots, y_n)$ . Θεωρούμε συνάρτηση  $\phi : \{0, 1\}^* \rightarrow \{0, 1\}^*$  με  $\phi(x) = \langle \varphi_x \rangle$  όπου:

$$\varphi_x = \exists y_1 \forall y_2 \cdots * y_n \varphi_R(\underline{x}, y_1, \dots, y_n)$$

και παρατηρούμε ότι:

1.  $\phi$  πλήρης και υπολογίσιμη.
2. - Αν  $x \in L$  τότε:

Υπάρχει  $y_1$ , για κάθε  $y_2, \dots$ , υπάρχει (ή για κάθε)  $y_n$  ισχύει  $R(x, y_1, \dots, y_n)$ .

Αφού ο  $\varphi_R(x, y_1, \dots, y_n)$  αναπαριστά το  $R$  στο  $P$  προκύπτει ότι:

Υπάρχει  $y_1$ , για κάθε  $y_2, \dots$ , υπάρχει (ή για κάθε)  $y_n$  ισχύει  $P \vdash \varphi_R(\underline{x}, \underline{y_1}, \dots, \underline{y_n})$ .

Από το Θεώρημα Εγκυρότητας (λόγω και του ότι  $\mathfrak{N} \models P$ ) έπεται ότι:

Υπάρχει  $y_1$ , για κάθε  $y_2, \dots$ , υπάρχει (ή για κάθε)  $y_n$  ισχύει  $\mathfrak{N} \models \varphi_R(\underline{x}, \underline{y_1}, \dots, \underline{y_n})$ .

Οπότε από τον Ορ. Tarski έχουμε  $\mathfrak{N} \models \exists y_1 \forall y_2 \cdots * y_n \varphi_R(\underline{x}, y_1, \dots, y_n)$ . Άρα  $\mathfrak{N} \models \varphi_x$  και τελικά  $\langle \varphi_x \rangle \in T_n$ .

- Αν  $x \notin L$  με αντίστοιχο τρόπο καταλήγουμε ότι  $\langle \varphi_x \rangle \notin T_n$ .

Συνεπώς  $L \leq_m T_n$ . □

**Ορισμός 8.5.11.** Ορίζουμε τη γλώσσα:

$$Truth = \{\langle \varphi \rangle \in \{0, 1\}^* \mid \varphi \text{ πρόταση και } \mathfrak{N} \models \varphi\}$$

**Θεώρημα 8.5.12** (Θεώρημα Tarski). Η γλώσσα  $Truth$  δεν ανήκει στην Αριθμητική Ιεραρχία.

*Απόδειξη.* Έστω (προς άτοπο) ότι η  $Truth$  ανήκει στην Αριθμητική Ιεραρχία, δηλαδή υπάρχει  $n \in \mathbb{N}$  τέτοιο ώστε  $Truth \in \Sigma_n^0$ . Παρατηρούμε ότι  $T_{n+1} \leq_m Truth$ <sup>1</sup>. Από το Θεώρημα 8.5.10 η  $T_{n+1}$  είναι  $\Sigma_{n+1}^0$ -δύσκολη ως προς τη  $\leq_m$ , άρα έπεται ότι  $HP_{n+1} \leq_m T_{n+1}$ . Από τη μεταβατικότητα της  $\leq_m$  έπεται ότι  $HP_{n+1} \leq_m Truth$ . Τέλος, από την Πρόταση 8.3.3 προκύπτει ότι  $HP_{n+1} \leq_T Truth$ , δηλαδή ότι  $HP_{n+1} \in REC^{Truth} \subseteq REC^{\Sigma_n^0} = \Delta_{n+1}^0$ . Όμως, από την Παρατήρηση 8.2.9, γνωρίζουμε ότι  $\Delta_{n+1}^0 \subseteq REC^{HP_n}$ , οπότε  $HP_{n+1} \in REC^{HP_n}$  πράγμα που φυσικά αντιβαίνει στο Λήμμα 8.2.6.  $\square$

Το παραπάνω θεώρημα μας αποδεικνύει ότι υπάρχουν γλώσσες που δεν ανήκουν σε καμία κλάση της αριθμητικής ιεραρχίας. Μία επέκταση της Αριθμητικής Ιεραρχίας είναι η *Αναλυτική Ιεραρχία* η οποία ορίζεται πάνω σε λογικούς τύπους της δευτεροβάθμιας λογικής.

## Ασκήσεις

**8.1 (★☆☆).** Δείξτε ότι η συνάρτηση  $K$  της Άσκησης 7.5 είναι υπολογίσιμη χρησιμοποιώντας μαντείο για τη γλώσσα  $L_{\text{Αποδοχής}}$ .

**8.2 (☆☆☆).** Δείξτε ότι μια γλώσσα  $L \subseteq \{0, 1\}^*$  είναι αναδρομική (αναδρομικά απαριθμήσιμη) ανν για κάθε γλώσσα  $L' \subseteq \{0, 1\}^*$  υπάρχει OTM  $M^{L'}$  που αποφασίζει (ημι-αποφασίζει αντίστοιχα) την  $L$ .

**8.3 (★☆☆).** Έστω γλώσσες  $A, B, C \subseteq \{0, 1\}^*$ . Ισχύει ότι αν  $A \in RE^B$  και  $B \in RE^C$  τότε  $A \in RE^C$ ;

**8.4 (☆☆☆).** Έστω  $A, B \in \{0, 1\}^*$ . Δείξτε ότι  $A \leq_T B$  ανν  $\overline{A} \leq_T \overline{B}$ .

**8.5 (★★★).** Δείξτε ότι υπάρχουν δύο γλώσσες  $A, B \in \{0, 1\}^*$  τέτοιες ώστε  $A \not\leq_T B$  και  $B \not\leq_T A$ .

**8.6 (☆☆☆).** Έστω  $A, B \in \{0, 1\}^*$  και  $C$  κλάση της Αριθμητικής Ιεραρχίας. Δείξτε ότι αν  $A \leq_m B$  και  $B \in C$  τότε και  $A \in C$ .

**8.7 (★☆☆).** Έστω  $A, B \in \{0, 1\}^*$  και έστω ότι  $A \leq_T B$ . Δείξτε ότι:

1. Αν  $B \in \Delta_n^0$  τότε  $A \in \Delta_n^0$ .
2. Αν  $B \in \Sigma_n^0 \cup \Pi_n^0$ , τότε  $A \in \Delta_{n+1}^0$ .

<sup>1</sup> Η εν λόγω αναγωγή είναι η ταυτοτική συνάρτηση για τις προτάσεις  $\varphi$  που έχουν τη μορφή  $\exists y_1 \forall y_2 \dots * y_{n+1} \psi(y_1, \dots, y_{n+1})$  ενώ για τις υπόλοιπες λέξεις είναι η σταθερή συνάρτηση με τιμή  $\langle x \wedge \neg x \rangle$ .

3. Υπάρχει γλώσσα  $A$  τέτοια ώστε  $B \in \Sigma_n^0$  αλλά  $A \notin \Sigma_n^0$ .

**8.8 (★☆☆).** Αποδείξτε το Θεώρημα 8.4.4 για  $n=1$ .

**8.9 (★★☆).** Αποδείξτε το Θεώρημα 8.4.5.

**8.10 (★☆☆).** Δείξτε ότι για κάθε  $n \geq 1$ :

- Η  $HP_n$  δεν είναι  $\Pi_n^0$ -δύσκολη ως προς την  $\leq_m$ .
- Η  $\overline{HP}_n$  δεν είναι  $\Sigma_n^0$ -δύσκολη ως προς την  $\leq_m$ .
- Η  $HP_n$  δεν είναι  $\Delta_{n+1}^0$ -δύσκολη ως προς την  $\leq_m$ .

**8.11 (★☆☆).** Κατατάξτε τη γλώσσα  $L = \{\langle M \rangle \in \{0,1\}^* \mid \text{Δεν υπάρχει λέξη } w \text{ που ξεκινάει με } 001 \text{ τέτοια ώστε } w \in L(M)\}$  στην Αριθμητική Ιεραρχία.

**8.12 (★★☆).** Έστω  $A \leq_m$ -πλήρης γλώσσα για το  $\Sigma_n^0$ . Δείξτε ότι η γλώσσα  $L_{\mathbb{N}}^A = \{\langle M \rangle \in \{0,1\}^* \mid |L(M^A)| \in \mathbb{N}\}$  είναι  $\leq_m$ -πλήρης για το  $\Sigma_{n+2}^0$ .

**8.13 (★★☆).** Κατατάξτε τη γλώσσα  $L_{\equiv} = \{\langle M_1, M_2 \rangle \in \{0,1\}^* \mid L(M_1) = L(M_2)\}$  στην Αριθμητική Ιεραρχία.

**8.14 (★★☆).** Κατατάξτε τη γλώσσα  $L = \{\langle M_1, M_2 \rangle \in \{0,1\}^* \mid \epsilon \in L(M_1) \setminus L(M_2)\}$  στην Αριθμητική Ιεραρχία.

**8.15 (★★☆).** Δείξτε ότι η γλώσσα  $L_{\emptyset} = \{\langle M \rangle \in \{0,1\}^* \mid L(M) = \emptyset\}$  είναι  $\leq_m$ -πλήρης για το  $\Pi_1^0$ .

**8.16 (★★★).** Δείξτε ότι η γλώσσα  $L_{\text{Συντελεστής}} = \{\langle M \rangle \in \{0,1\}^* \mid |\overline{L(M)}| \in \mathbb{N}\}$  είναι  $\leq_m$ -πλήρης για το  $\Sigma_3^0$ . (Υπόδειξη: Θα χρειαστείτε την Άσκηση 8.12.)



# ΠΑΡΑΡΤΗΜΑ Α

## ΕΙΣΑΓΩΓΗ ΣΤΗΝ ΠΡΩΤΟΒΑΘΜΙΑ ΛΟΓΙΚΗ

### A.1 Βασικές έννοιες

**Ορισμός A.1.1.** Μία πρωτοβάθμια γλώσσα  $\Gamma_1$  αποτελείται από:

1. Ένα άπειρο σύνολο μεταβλητών  $M(\Gamma_1) = \{x_0, x_1, \dots\}$ .
2. Τους λογικούς συνδέσμους  $\neg, \rightarrow$  (οι σύνδεσμοι  $\vee, \wedge, \leftrightarrow$  εισάγονται ως συντομεύσεις).
3. Τις παρενθέσεις  $(, )$ .
4. Το σύμβολο της ισότητας  $\approx$ .
5. Τον καθολικό ποσοδείκτη  $\forall$  (ο υπαρξιακός ποσοδείκτης  $\exists$  εισάγεται ως συντόμευση).
6. Για κάθε φυσικό  $n \geq 0$  ένα σύνολο (ενδεχομένως κενό)  $\{P_i \mid i \in I\}$  από  $n$ -μελή κατηγορηματικά σύμβολα.
7. Για κάθε φυσικό  $n \geq 0$  ένα σύνολο (ενδεχομένως κενό)  $\{f_i \mid i \in I\}$  από  $n$ -θέσια συναρτησιακά σύμβολα. Τα 0-θέσια συναρτησιακά σύμβολα καλούνται σταθερές.

**Σημείωση A.1.2.** Τα σύμβολα των κατηγοριών 2.–5. καλούνται *λογικά σύμβολα* και είναι ίδια για κάθε πρωτοβάθμια γλώσσα. Τα σύνολα των κατηγοριών 6.–7. περιέχουν τα *μη-λογικά σύμβολα* μίας γλώσσας και αλλάζουν από γλώσσα σε γλώσσα. Τα σύμβολα αυτά –σε αντίθεση με τα λογικά σύμβολα– μπορούν να «ερμηνευτούν» στη μεταγλώσσα με πάρα πολλούς τρόπους<sup>1</sup>.

**Ορισμός A.1.3.** Μία λέξη του  $\Gamma_1^*$  είναι *όρος* της  $\Gamma_1$  ανν:

<sup>1</sup> Οι πρωτοβάθμιες γλώσσες της λογικής δεν θα πρέπει να συγχέονται με τις γλώσσες που ορίσαμε στην Παράγραφο 0.2, καθώς εκεί είχαμε πεπερασμένο αλφάβητο ενώ εδώ έχουμε ένα αριθμησίμως άπειρο σύνολο συμβόλων.

1. είναι μεταβλητή,
2. είναι σταθερά,
3. είναι της μορφής  $ft_1, \dots, t_n$ , όπου  $t_1, \dots, t_n$  όροι και  $f$   $n$ -θέσιο συναρτησιακό σύμβολο της  $\Gamma_1$ <sup>1</sup>.

Το σύνολο των όρων της  $\Gamma_1$  το συμβολίζουμε ως  $O(\Gamma_1)$ .

**Ορισμός A.1.4.** Μία λέξη του  $\Gamma_1^*$  είναι *τύπος της  $\Gamma_1$*  ανν:

1. είναι της μορφής  $\approx t_1 t_2$ , όπου  $t_1, t_2 \in O(\Gamma_1)$ <sup>2</sup>,
2. είναι της μορφής  $Rt_1, \dots, t_n$  όπου  $t_1, \dots, t_n \in O(\Gamma_1)$  και  $R$   $n$ -μελές κατηγορηματικό σύμβολο της  $\Gamma_1$ <sup>3</sup>,
3. είναι της μορφής  $(\neg\varphi), (\varphi \rightarrow \psi), (\forall x\varphi)$  όπου  $\varphi, \psi$  τύποι της  $\Gamma_1$  και  $x$  μεταβλητή της  $\Gamma_1$ .

Το σύνολο των τύπων της  $\Gamma_1$  το συμβολίζουμε ως  $T(\Gamma_1)$ . Οι τύποι της μορφής 1. και 2. ονομάζονται *ατομικοί τύποι*.

**Σύμβαση A.1.5.** Θα γράφουμε  $(\exists x\varphi), (\varphi \wedge \psi), (\varphi \vee \psi)$  και  $(\varphi \leftrightarrow \psi)$  αντί για  $(\neg(\forall x(\neg\varphi)))$ ,  $(\neg(\varphi \rightarrow (\neg\psi)))$ ,  $((\neg\varphi) \rightarrow \psi)$  και  $((\varphi \rightarrow \psi) \wedge (\psi \rightarrow \varphi))$ . Επίσης θα παραλείπουμε όσες παρενθέσεις δεν είναι απαραίτητες για τη μοναδική αναγνωσιμότητα ενός τύπου (όπως είναι για παράδειγμα οι εξωτερικές παρενθέσεις).

**Ορισμός A.1.6.** Έστω  $\varphi \in T(\Gamma_1)$  και μεταβλητή  $x$ . Η  $x$  *εμφανίζεται ελεύθερη στον  $\varphi$*  ανν:

1. Ο  $\varphi$  είναι ατομικός και (φυσικά) η  $x$  εμφανίζεται στον  $\varphi$ .
2. Ο  $\varphi$  είναι της μορφής  $(\neg\psi)$  και η  $x$  εμφανίζεται ελεύθερη στον  $\psi$ .
3. Ο  $\varphi$  είναι της μορφής  $(\chi \rightarrow \psi)$  και η  $x$  εμφανίζεται ελεύθερη στον  $\chi$  ή στον  $\psi$ .
4. Ο  $\varphi$  είναι της μορφής  $(\forall y\psi)$  και η  $x$  εμφανίζεται ελεύθερη στον  $\psi$  (όπου  $y \neq x$ ).

Μία εμφάνιση μεταβλητής που δεν είναι ελεύθερη θα ονομάζεται *δεσμευμένη*. Αν στον τύπο  $\varphi$  όλες οι εμφανίσεις μεταβλητών είναι δεσμευμένες τότε ο  $\varphi$  καλείται *πρόταση της  $\Gamma_1$* .

**Συμβολισμός A.1.7.** Θα γράφουμε  $\varphi(x_1, \dots, x_n)$  για να δηλώνουμε το γεγονός ότι οι μεταβλητές  $x_1, \dots, x_n$  (και μόνο αυτές) εμφανίζονται ελεύθερες στον  $\varphi$ .

<sup>1</sup> Αντί για  $ft_1, \dots, t_n$  από εδώ και στο εξής θα γράφουμε  $f(t_1, \dots, t_n)$ .

<sup>2</sup> Αντί για  $\approx t_1 t_2$  από εδώ και στο εξής θα γράφουμε  $t_1 \approx t_2$ .

<sup>3</sup> Αντί για  $Rt_1, \dots, t_n$  από εδώ και στο εξής θα γράφουμε  $R(t_1, \dots, t_n)$ .

## A.2 Σημασιολογία

**Ορισμός A.2.1.** Έστω πρωτοβάθμια γλώσσα  $\Gamma_1$ . Δομή (ή ερμηνεία)  $\mathfrak{A}$  για τη  $\Gamma_1$  είναι ένα σύστημα αποτελούμενο από:

1. Ένα μη κενό σύνολο  $A$  (το σύμπαν της δομής, συνήθως το συμβολίζουμε  $|\mathfrak{A}|$ ).
2. Για κάθε  $n$ -μελές κατηγορηματικό σύμβολο  $P$  μία  $n$ -μελής σχέση  $P^{\mathfrak{A}} \subseteq A^n$ .
3. Για κάθε  $n$ -δέσιο συναρτησιακό σύμβολο μία συνάρτηση  $f^{\mathfrak{A}} : A^n \rightarrow A$ .
4. Για κάθε σύμβολο σταθεράς  $c$  μία τιμή  $c^{\mathfrak{A}} \in A$ .

**Παρατήρηση A.2.2.** Είδισται όταν ορίζουμε μία πρωτοβάθμια γλώσσα να έχουμε στο μυαλό μας μία ερμηνεία για τα μη-λογικά σύμβολά της. Αυτήν την ερμηνεία συνήθως την αποκαλούμε *προτιθέμενη* (δες Ορισμό A.5.2 για ένα παράδειγμα).

**Ορισμός A.2.3.** Έστω πρωτοβάθμια γλώσσα  $\Gamma_1$  και δομή  $\mathfrak{A}$ . Αποτίμηση είναι μία συνάρτηση  $v : M(\Gamma_1) \rightarrow |\mathfrak{A}|$ . Επεκτείνουμε την αποτίμηση  $v$  σε μία συνάρτηση  $\bar{v} : O(\Gamma_1) \rightarrow |\mathfrak{A}|$  έτσι ώστε:

1.  $\bar{v}(c) = c^{\mathfrak{A}}$ , όπου  $c$  σταθερά της  $\Gamma_1$ .
2.  $\bar{v}(f(t_1, \dots, t_n)) = f^{\mathfrak{A}}(\bar{v}(t_1), \dots, \bar{v}(t_n))$ , όπου  $f$   $n$ -δέσιο συναρτησιακό σύμβολο της  $\Gamma_1$  και  $t_1, \dots, t_n \in O(\Gamma_1)$ .

**Ορισμός A.2.4.** Έστω πρωτοβάθμια γλώσσα  $\Gamma_1$ , δομή  $\mathfrak{A}$ , αποτίμηση  $v$  και μεταβλητή  $x$ . Ορίζουμε την αποτίμηση  $v(x/a)$ , όπου  $a \in |\mathfrak{A}|$ , ως εξής:

$$v(x/a)(y) = \begin{cases} a & , \text{ αν } y = x \\ v(y) & , \text{ αλλιώς} \end{cases}$$

**Ορισμός A.2.5** (Ορισμός αλήθειας Tarski). Έστω πρωτοβάθμια γλώσσα  $\Gamma_1$ , δομή  $\mathfrak{A}$ , αποτίμηση  $v$  και  $\varphi \in T(\Gamma_1)$ . Θα λέμε ότι η ερμηνεία  $\mathfrak{A}$  ικανοποιεί τον τύπο  $\varphi$  για την αποτίμηση  $v$ , συμβολισμός  $\mathfrak{A} \models \varphi[v]$ , ανν:

1. Ο  $\varphi$  είναι της μορφής  $t_1 \approx t_2$ , όπου  $t_1, t_2 \in O(\Gamma_1)$ , και ισχύει ότι  $\bar{v}(t_1) = \bar{v}(t_2)$ .
2. Ο  $\varphi$  είναι της μορφής  $R(t_1, \dots, t_n)$ , και ισχύει ότι  $(\bar{v}(t_1), \dots, \bar{v}(t_n)) \in R^{\mathfrak{A}}$ .
3. Ο  $\varphi$  είναι της μορφής  $(\neg \chi)$ , και δεν ισχύει ότι  $\mathfrak{A} \models \chi[v]$ .
4. Ο  $\varphi$  είναι της μορφής  $(\chi \rightarrow \psi)$ , και ισχύει ότι αν  $\mathfrak{A} \models \chi[v]$  τότε  $\mathfrak{A} \models \psi[v]$ .
5. Ο  $\varphi$  είναι της μορφής  $(\forall x \chi)$ , και ισχύει ότι για κάθε  $a \in |\mathfrak{A}|$ ,  $\mathfrak{A} \models \chi[v(x/a)]$ .

**Ορισμός A.2.6.** Έστω  $\varphi \in T(\Gamma_1)$  και  $T \subseteq T(\Gamma_1)$ . Θα λέμε ότι:

1. Ο τύπος  $\varphi$  είναι *ικανοποιήσιμος* ανν υπάρχει δομή  $\mathfrak{A}$  και αποτίμηση  $v$  τέτοια ώστε  $\mathfrak{A} \models \varphi[v]$ . Σε αυτήν την περίπτωση θα λέμε ότι οι  $\mathfrak{A}, v$  ικανοποιούν τον  $\varphi$ <sup>1</sup>.

<sup>1</sup> Αν ο  $\varphi$  είναι πρόταση η ικανοποιησιμότητά του είναι ανεξάρτητη από την εκάστοτε αποτίμηση, καθώς δεν εμφανίζονται σε αυτόν ελεύθερες μεταβλητές.

2. Η δομή  $\mathcal{A}$  και η αποτίμηση  $v$  ικανοποιούν το  $T$  ανν ικανοποιούν κάθε στοιχείο του  $T$ .
3. Το  $T$  είναι ικανοποιήσιμο αν και μόνον αν υπάρχουν δομή  $\mathcal{A}$  και αποτίμηση  $v$  που το ικανοποιούν.
4. Το  $T$  συνεπάγεται λογικά τον  $\varphi$ , συμβολισμός  $T \models \varphi$ , ανν κάθε δομή και αποτίμηση που ικανοποιούν το  $T$  ικανοποιούν και το  $\varphi$ .

**Συμβολισμός A.2.7.** Καθώς μία πρόταση  $\varphi$  ικανοποιείται σε μία δομή  $\mathcal{A}$  ανεξάρτητα από την αποτίμηση (όλες οι μεταβλητές εμφανίζονται δεσμευμένες στη  $\varphi$ ) θα γράφουμε  $\mathcal{A} \models \varphi$  και θα λέμε ότι η  $\mathcal{A}$  είναι μοντέλο της  $\varphi$ . Επίσης αν ο τύπος  $\forall x \chi$  είναι πρόταση, εφαρμόζοντας τον Ορισμό του Tarski θα γράφουμε  $\mathcal{A} \models \forall x \chi$  ανν για κάθε  $a \in |\mathcal{A}|$ ,  $\mathcal{A} \models \chi(x/a)$ . Τέλος, αντί για  $\neg(t_1 \approx t_2)$ , όπου  $t_1, t_2$  όροι, θα γράφουμε  $t_1 \not\approx t_2$ .

### A.3 Τυπικές αποδείξεις

**Ορισμός A.3.1.** Έστω πρωτοβάθμια γλώσσα  $\Gamma_1$ . Ένα αξιωματικό σύστημα  $\mathcal{A}$  για την  $\Gamma_1$  αποτελείται από

1. ένα σύνολο αξιωμάτων  $A \subseteq T(\Gamma_1)$  και
2. ένα σύνολο αποδεικτικών κανόνων  $K$ ,

όπου αποδεικτικός κανόνας  $\kappa \in K$  είναι μια διμελής σχέση  $\kappa \in 2^{T(\Gamma_1)} \times T(\Gamma_1)$ . Αν  $(B, \varphi) \in \kappa$ , τότε λέμε ότι ο  $\varphi$  είναι άμεσο συμπέρασμα της εφαρμογής του  $\kappa$  στα στοιχεία του  $B$ . Το  $A$  χωρίζεται σε δύο ξένα σύνολα  $\Lambda$  και  $M$  (δηλαδή  $A = \Lambda \cup M$ ), όπου  $\Lambda$  είναι το σύνολο των λογικών αξιωμάτων (το ίδιο για κάθε γλώσσα) και  $M$  το σύνολο των μη-λογικών αξιωμάτων (διαφέρει για κάθε γλώσσα).

**Ορισμός A.3.2.** Έστω  $\mathcal{A} = (A, K)$  ένα αξιωματικό σύστημα,  $T \subseteq T(\Gamma_1)$ , και  $\varphi$  τύπος. Θα λέμε ότι ο  $\varphi$  αποδεικνύεται από τα στοιχεία του  $T$  (το σύνολο υποθέσεων) στο  $\mathcal{A}$ , συμβολισμός  $T \vdash_{\mathcal{A}} \varphi$ , αν υπάρχει μία πεπερασμένη ακολουθία τύπων  $\tau_1, \dots, \tau_n$ , όπου  $\tau_n = \varphi$ , και για κάθε  $\tau_i$  ισχύει ένα από τα ακόλουθα:

1.  $\tau_i \in A \cup T$ , είναι δηλαδή αξίωμα ή υπόθεση, ή
2. το  $\tau_i$  είναι άμεσο συμπέρασμα της εφαρμογής κανόνα  $\kappa \in K$  σε ένα σύνολο  $S \subseteq \{\tau_1, \dots, \tau_{i-1}\}$ .

**Συμβολισμός A.3.3.** Έστω  $x$  μεταβλητή,  $t$  όρος, και  $\varphi$  τύπος της  $\Gamma_1$ . Συμβολίζουμε με  $\varphi_t^x$  τον τύπο που προκύπτει από τον  $\varphi$ , με αντικατάσταση όλων των ελεύθερων εμφανίσεων της  $x$  από τον όρο  $t$ .

**Ορισμός A.3.4.** Η μεταβλητή  $x$  καλείται αντικαταστάσιμη από τον όρο  $t$  στον τύπο  $\varphi$ , αν με την αντικατάσταση των ελεύθερων εμφανίσεων της  $x$  από τον  $t$  στον  $\varphi$ , δεν δεσμεύονται μεταβλητές του  $t$ .

**Ορισμός A.3.5.** Γενίκευση του  $\varphi$  καλείτε οποιοσδήποτε τύπος της μορφής  $\forall x_1 \dots \forall x_n \varphi$ , όπου  $x_i$  μεταβλητές για  $n \geq 0$ .

**Ορισμός A.3.6.** Το αξιωματικό σύστημα  $\mathcal{A}_1 = (A_1, K_1)$  για την πρωτοβάθμια λογική, έχει ως λογικά αξιώματα όλες τις γενικεύσεις των ακόλουθων *αξιωματικών σχημάτων*<sup>1</sup>:

**AΣ1**  $\varphi \rightarrow (\psi \rightarrow \varphi)$

**AΣ2**  $(\varphi \rightarrow (\psi \rightarrow \chi)) \rightarrow ((\varphi \rightarrow \psi) \rightarrow (\varphi \rightarrow \chi))$

**AΣ3**  $(\neg \varphi \rightarrow \neg \psi) \rightarrow ((\neg \varphi \rightarrow \psi) \rightarrow \varphi)$

**AΣ4**  $\forall x \varphi \rightarrow \varphi_t^x$ , με την προϋπόθεση ότι η μεταβλητή  $x$  είναι αντικαταστάσιμη από τον όρο  $t$  στον  $\varphi$

**AΣ5**  $\forall x(\varphi \rightarrow \psi) \rightarrow (\forall x \varphi \rightarrow \forall x \psi)$

**AΣ6**  $\varphi \rightarrow \forall x \varphi$ , με την προϋπόθεση ότι η  $x$  δεν εμφανίζεται ελεύθερη στον  $\varphi$

**AΣ7**  $x \approx x$

**AΣ8**  $x \approx y \rightarrow (\varphi \rightarrow \varphi^*)$ , όπου  $\varphi$  ατομικός τύπος, και  $\varphi^*$  ο (ατομικός) τύπος που προκύπτει από τον  $\varphi$  αντικαθιστώντας μερικές (ή και όλες) τις εμφανίσεις της  $x$  από τη  $y$

και  $K_1$  που περιέχει μόνον έναν κανόνα, τον *Modus Ponens* (M.P.):

$$\frac{\varphi \quad \varphi \rightarrow \psi}{\psi} \text{ M.P.}$$

**Σύμβαση A.3.7.** Αντί για  $T \vdash_{\mathcal{A}_1} \varphi$  θα γράφουμε  $T \vdash \varphi$  και αντί για  $\emptyset \vdash \varphi$  θα γράφουμε  $\vdash \varphi$ . Παρατηρήστε επίσης ότι μπορούμε να θεωρήσουμε το σύνολο των μη λογικών αξιωμάτων ως υποθέσεις.

**Ορισμός A.3.8.** Έστω  $T$  σύνολο μη-λογικών αξιωμάτων για μία πρωτοβάθμια γλώσσα  $\Gamma_1$ . Το  $T$  είναι *συνεπές* αν δεν υπάρχει  $\varphi \in T(\Gamma_1)$  τέτοιος ώστε  $T \vdash \varphi$  και  $T \vdash \neg \varphi$ .

## A.4 Τα Θεωρήματα Εγκυρότητας και Πληρότητας

**Θεώρημα A.4.1** (Θεώρημα Εγκυρότητας). Για κάθε σύνολο τύπων  $T$  και τύπο  $\varphi$  μίας πρωτοβάθμιας γλώσσας ισχύει ότι αν  $T \vdash \varphi$  τότε  $T \models \varphi$ .

**Θεώρημα A.4.2** (Θεώρημα Πληρότητας). Για κάθε σύνολο τύπων  $T$  και τύπο  $\varphi$  μίας πρωτοβάθμιας γλώσσας ισχύει ότι αν  $T \models \varphi$  τότε  $T \vdash \varphi$ .

<sup>1</sup> Περιέχει δηλαδή όλους τους τύπους που μπορούν να προκύψουν αν αντικαταστήσουμε τις συντακτικές μεταβλητές ( $\varphi, \psi, \chi, t, x$  και  $y$ ) σε αυτά τα «σχήματα» με οποιουσδήποτε τύπους της γλώσσας που εξετάζουμε.

Ο μη εξοικειωμένος με τη λογική αναγνώστης θα βρίσκεται σίγουρα σε σύγχυση από το γεγονός πως έχουμε ένα Θεώρημα Πληρότητας και ένα Θεώρημα Μη-πληρότητας. Το Θεώρημα Μη-πληρότητας αφορά όμως δύο «διαφορετικές» (και ισοδύναμες μεταξύ τους) έννοιες πληρότητας από αυτήν του Θεωρήματος A.4.2: την *τυπική πληρότητα* ενός συνόλου αξιωμάτων (ή υποθέσεων) και την *πληρότητα ως προς μοντέλο* του συνόλου αξιωμάτων.

**Ορισμός A.4.3.** Έστω  $A$  σύνολο μη λογικών αξιωμάτων για τη  $\Gamma_1$  και  $\mathcal{A}$  μοντέλο του  $A$ .

1. Το  $A$  είναι *τυπικά πλήρες* αν για κάθε πρόταση  $\varphi$  της  $\Gamma_1$  ισχύει ότι  $A \vdash \varphi$  ή  $A \vdash \neg\varphi$ .
2. Το  $A$  είναι *πλήρες ως προς το  $\mathcal{A}$*  αν για κάθε πρόταση  $\varphi$  της  $\Gamma_1$ , αν ισχύει ότι  $\mathcal{A} \models \varphi$  τότε  $A \vdash \varphi$ .

Ο παραπάνω Ορισμός (το 2.) ίσως προσθέτει ακόμα μεγαλύτερη σύγχυση, καθώς από το Θεώρημα A.4.2 προκύπτει ότι (αφού  $\mathcal{A} \models A$ ) αν  $A \models \varphi$  (οπότε και  $\mathcal{A} \models \varphi$ ) θα έχουμε ότι  $A \vdash \varphi$ . Το Θεώρημα A.4.1 όμως για να ισχύσει απαιτεί κάτι πολύ πιο ειδικό από την προϋπόθεση (του 2.) του Ορισμού A.4.3: Απαιτεί από όλα τα μοντέλα του  $A$  να ικανοποιούν τον  $\varphi$  και όχι μόνο το  $\mathcal{A}$ . Τέλος, η πληρότητα ως προς μοντέλο προϋποθέτει την ύπαρξη ενός μοντέλου για το  $A$ , δηλαδή ότι το  $A$  είναι ικανοποιήσιμο. Αυτό δεν μπορεί να ισχύει αν το  $A$  δεν είναι συνεπές (γιατί;) <sup>1</sup>.

## A.5 Αριθμητική Peano

**Ορισμός A.5.1.** Η γλώσσα της *Θεωρίας Αριθμών*, συμβολισμός  $\Gamma_1^{\text{θα}}$ , αποτελείται από τη σταθερά  $0$ , το μονοθέσιο συναρτησιακό σύμβολο  $!$ , και τα διθέσια συναρτησιακά σύμβολα  $\oplus$  και  $\odot$ .

**Ορισμός A.5.2.** Η *κύρια* (ή *προτιθέμενη*) *ερμηνεία* για τη  $\Gamma_1^{\text{θα}}$  είναι η  $\mathfrak{N}$  όπου:

- $|\mathfrak{N}| = \mathbb{N}$  (σύμπαν είναι οι φυσικοί αριθμοί),
- $!^{\mathfrak{N}} = S$  (η συνάρτηση του επόμενου),
- $\oplus^{\mathfrak{N}} = +$  (η συνάρτηση της πρόσδεσης),
- $\odot^{\mathfrak{N}} = \cdot$  (η συνάρτηση του πολλαπλασιασμού),
- $0^{\mathfrak{N}} = 0$  (το μηδέν).

**Ορισμός A.5.3.** Το σύνολο  $P$  των (μη-λογικών) αξιωμάτων της *αριθμητικής Peano* για τη  $\Gamma_1^{\text{θα}}$  είναι το εξής:

$$\mathbf{P1} \quad \forall x_1 (x_1! \neq 0)$$

$$\mathbf{P2} \quad \forall x_1 \forall x_2 (x_1! = x_2! \rightarrow x_1 = x_2)$$

<sup>1</sup> Αν το  $A$  δεν είναι συνεπές είναι όμως τετριμμένα τυπικά πλήρες. Αυτό ισχύει επειδή αν μπορούμε να αποδείξουμε έναν τύπο και την άρνηση του μπορούμε να αποδείξουμε οποιονδήποτε τύπο καθώς  $\vdash \neg\varphi \rightarrow (\varphi \rightarrow \psi)$ .

$$\mathbf{P3} \quad \forall x_1 (x_1 \oplus \mathbf{0} = x_1)$$

$$\mathbf{P4} \quad \forall x_1 \forall x_2 (x_1 \oplus x_2' = (x_1 \oplus x_2)')$$

$$\mathbf{P5} \quad \forall x_1 (x_1 \odot \mathbf{0} = \mathbf{0})$$

$$\mathbf{P6} \quad \forall x_1 \forall x_2 (x_1 \odot x_2' = x_1 \odot x_2 \oplus x_2)$$

$$\mathbf{P7} \quad \forall x_1 \dots \forall x_n (\varphi(x_1, \dots, x_n, \mathbf{0}) \wedge \forall x_0 (\varphi(x_1, \dots, x_n, x_0) \rightarrow \varphi(x_1, \dots, x_n, x_0')) \rightarrow \forall x_0 \varphi(x_1, \dots, x_n, x_0))$$

**Συμβολισμός A.5.4.** Συμβολίζουμε με  $\underline{n}$  τον όρο που αντιστοιχεί στο ψηφίο του αριθμού  $n \in \mathbb{N}$ , δηλαδή

$$\underline{n} = \underbrace{\mathbf{0} // \dots //}_{n\text{-φορές}}$$

**Ορισμός A.5.5.** Έστω  $T \subseteq T(\Gamma_1^{\partial a})$  και  $R \subseteq \mathbb{N}^n$ , όπου  $n \geq 1$ . Η σχέση  $R$  είναι *αναπαραστάσιμη στο  $T$*  αν υπάρχει τύπος  $\varphi(x_1, \dots, x_n)$  τέτοιος ώστε για κάθε  $m_1, \dots, m_n \in \mathbb{N}$  να ισχύει ότι:

1. αν  $(m_1, \dots, m_n) \in R$  τότε  $T \vdash \varphi(\underline{m_1}, \dots, \underline{m_n})$
2. αν  $(m_1, \dots, m_n) \notin R$  τότε  $T \vdash \neg \varphi(\underline{m_1}, \dots, \underline{m_n})$

Αντίστοιχα, μία συνάρτηση  $f : \mathbb{N}^n \rightarrow \mathbb{N}$  είναι *αναπαραστάσιμη στο  $T$*  αν υπάρχει τύπος  $\varphi(x_1, \dots, x_{n+1})$  τέτοιος ώστε για κάθε  $m_1, \dots, m_{n+1} \in \mathbb{N}$  να ισχύει ότι:

1. αν  $f(m_1, \dots, m_n) = m_{n+1}$  τότε  $T \vdash \varphi(\underline{m_1}, \dots, \underline{m_{n+1}})$
2. αν  $f(m_1, \dots, m_n) \neq m_{n+1}$  τότε  $T \vdash \neg \varphi(\underline{m_1}, \dots, \underline{m_{n+1}})$

**Θεώρημα A.5.6.** Κάθε ελαχιστικά αναδρομική συνάρτηση είναι αναπαραστάσιμη στο  $P$ .

Το παραπάνω Θεώρημα μας δίνει το δικαίωμα να περάσουμε από τον κόσμο των αριθμητικών συναρτήσεων στους τύπους της  $\Gamma_1^{\partial a}$ . Ισχύει και το αντίστροφό του, με την προϋπόθεση όμως ότι το  $P$  είναι συνεπές.

### A.5.1 Αριθμητικοποίηση

**Σημείωση A.5.7.** Έχει επικρατήσει η διαδικασία που αντιστοιχεί φυσικούς αριθμούς σε «οντότητες», όπως είναι οι ακολουθίες φυσικών αριθμών ή οι λογικοί τύποι, να αποκαλείται *αριθμητικοποίηση*. Ένα Παράδειγμα είδαμε στο Κεφάλαιο 2, άλλο ένα θα δούμε εδώ.

### Αριθμητικοποίηση των τύπων της $\Gamma_1^{\partial a}$

Αντιστοιχούμε σε κάθε σύμβολο της  $\Gamma_1^{\partial a}$  έναν φυσικό αριθμό ως εξής:

$$\begin{array}{l|l} \langle x_i \rangle_{\mathbb{N}} = 3^{i+1}, \quad i = 0, 1, \dots & \langle \approx \rangle_{\mathbb{N}} = 19 \\ \langle \neg \rangle_{\mathbb{N}} = 5 & \langle ! \rangle_{\mathbb{N}} = 23 \\ \langle \rightarrow \rangle_{\mathbb{N}} = 7 & \langle \oplus \rangle_{\mathbb{N}} = 27 \\ \langle \forall \rangle_{\mathbb{N}} = 11 & \langle \odot \rangle_{\mathbb{N}} = 29 \\ \langle ( \rangle_{\mathbb{N}} = 13 & \langle \mathbf{0} \rangle_{\mathbb{N}} = 31 \\ \langle ) \rangle_{\mathbb{N}} = 17 & \end{array}$$

Έστω  $\varphi = a_1 \dots a_n \in T(\Gamma_1^{\partial a})$ , όπου  $a_1, \dots, a_n \in \{\neg, \rightarrow, \forall, (, ), \approx, !, \oplus, \odot, \mathbf{0}\} \cup M(\Gamma_1^{\partial a})$ , αντιστοιχούμε στον  $\varphi$  τον αριθμό:

$$\langle \varphi \rangle_{\mathbb{N}} = \text{enc}_n(\langle a_1 \rangle_{\mathbb{N}}, \dots, \langle a_n \rangle_{\mathbb{N}})$$

όπου  $\text{enc}_n$  η συνάρτηση του Ορισμού 2.3.1. Ο αριθμός  $\langle \varphi \rangle_{\mathbb{N}}$  καλείται *αριθμός Gödel* του  $\varphi$ .

Έστω  $\varphi_1, \dots, \varphi_n$  πεπερασμένη ακολουθία τύπων της  $\Gamma_1^{\partial a}$ . Αντιστοιχούμε την ακολουθία αυτή στον αριθμό:

$$\langle \varphi_1, \dots, \varphi_n \rangle_{\mathbb{N}} = \text{enc}_n(\langle \varphi_1 \rangle_{\mathbb{N}}, \dots, \langle \varphi_n \rangle_{\mathbb{N}})$$

Παρατηρήστε ότι κατά αυτόν τον τρόπο μπορούμε να αντιστοιχίσουμε τυπικές αποδείξεις από το  $P$  σε φυσικούς αριθμούς.

**Παρατήρηση A.5.8.** Υπάρχει TM  $M_{\mu \rightarrow \varphi}$  που δέχεται σαν είσοδο την κωδικοποίηση μίας ελαχιστικά αναδρομικής συνάρτησης  $f$  και επιστρέφει τον αριθμό Gödel του τύπου  $\varphi$  που την αναπαριστά.

Για να κατασκευάσουμε την TM  $M_{\mu \rightarrow \varphi}$  πρέπει πρώτα να περάσουμε μέσα από τις λεπτομέρειες της απόδειξης του Θεωρήματος A.5.6, θέμα που ξεφεύγει των σκοπών αυτών των σημειώσεων.

**Πρόταση A.5.9.** Η σχέση  $\text{Proof} \subseteq \mathbb{N}^2$  με  $(x, y) \in \text{Proof}$  ανν

“Ο  $y$  είναι αριθμός που αντιστοιχεί σε τυπική απόδειξη από το  $P$  της οποίας ο τελευταίος τύπος είναι ο τύπος με αριθμό Gödel  $x$ .”

είναι ελαχιστικά αναδρομική.

**Σημείωση A.5.10.** Για να αποδείξουμε ότι η  $\text{Proof}$  είναι ελαχιστικά αναδρομική σχέση πρέπει πρώτα να αποδείξουμε ότι 16 ακόμα συναρτήσεις και σχέσεις<sup>1</sup> είναι ελαχιστικά αναδρομικές

**Θεώρημα A.5.11.** Κάθε  $n$ -μελές αποφάνσιμο κατηγορήμα  $R$  είναι αναπαραστάσιμο στο  $P$  από έναν τύπο με  $n$ -ελεύθερες μεταβλητές.

<sup>1</sup> Οι σχέσεις αυτές ελέγχουν παραδείγματος χάρι αν ο  $x$  είναι αριθμός Gödel τύπου της  $\Gamma_1^{\partial a}$ , αν ο  $x$  είναι αριθμός Gödel αξιώματος, αν ο  $x$  είναι αριθμός που αντιστοιχεί σε τυπική απόδειξη κ.λπ..

*Απόδειξη.* Αφού το  $R$  είναι αποφάνσιμο κατηγορημα έπεται ότι  $L_R \in \text{REC}$ . Παρατηρούμε ότι η χαρακτηριστική συνάρτηση της  $L_R$  είναι υπολογίσιμη (δες Πρόταση 1.2.39), άρα από το Θεώρημα 2.5.1 είναι ελαχιστικά αναδρομική και από το Θεώρημα Α.5.6 είναι αναπαραστάσιμη στο  $P$ , έστω από τον τύπο  $\varphi_R(y_1, \dots, y_n, x)$ . Ο τύπος  $\varphi_R(y_1, \dots, y_n, \perp)$  αναπαριστά το  $R$ .  $\square$



Οι σημειώσεις αυτές βασίστηκαν (κατά κύριο λόγο) στα μαθήματα που διδάχθηκα από τον Καθ. Δ. Μ. Θηλυκό και στα ακόλουθα:

Επιστημονικά συγγράμματα:

- [1] Michael Sipser: *Εισαγωγή στην Θεωρία Υπολογισμού*, Πανεπιστημιακές Εκδόσεις Κρήτης.
- [2] Harry R. Lewis, Χρήστος Παπαδημητρίου: *Στοιχεία Θεωρίας Υπολογισμού*, Εκδόσεις Κριτική.
- [3] John E. Hopcroft, Jeffrey D. Ullman: *Introduction to Automata Theory, Languages, and Computation (1st edition)*, Addison-Wesley.
- [4] Dexter C. Kozen: *Automata and Computability*, Springer.
- [5] Γιάννης Ν. Μοσχολάκης: *Αναδρομή και Υπολογισιμότητα*.
- [6] Αθανάσιος Τζουβάρας: *Θεωρία Αναδρομικών Συναρτήσεων και Υπολογισιμότητας*.
- [7] Thomas Sudkamp: *Languages and Machines An Introduction to the Theory of Computer Science (3rd Edition)*, Pearson.
- [8] Δημήτρης Ζώρος: *(Πρόχειρες) σημειώσεις στη ΘΕΩΡΙΑ ΣΥΝΟΛΩΝ*.
- [9] Κώστας Ι. Δημητρακόπουλος: *Σημειώσεις Μαθηματικής Λογικής*.
- [10] Roland Hausser: *Foundations of Computational Linguistics*, Springer.
- [11] J. Roger Hindley, Jonathan P. Seldin: *Lambda-Calculus and Combinators, An Introduction*, Cambridge University Press.
- [12] Γεώργιος Κολέτσος: *Εφαρμογές της Λογικής στην Πληροφορική (Λάμδα-Λογισμοί)*.
- [13] Alan M. Turing: *Computing Machinery and Intelligence*, Mind, Volume LIX, Issue 236, Pages 433–460 (1950).

- [14] Ayse Pinar Saygin, Ilyas Cicekli, Varol Akman : *Turing Test: 50 Years Later*, Minds and Machines, Volume 10, Pages 463–518 (2000).
- [15] J.R. Lucas: *Minds, Machines and Gödel*, Philosophy, Volume 36, Issue 137, Pages 112-127 (1961).
- [16] Qiaozhu Mei, Yutong Xie, Walter Yuan, Matthew O. Jackson: *A Turing test of whether AI chatbots are behaviorally similar to humans*, Proceedings of the National Academy of Sciences, Volume 121, Issue 9 (2023).
- [17] Daniel Jannai, Amos Meron, Barak Lenz, Yoav Levine, Yoav Shoham: *Human or Not? A Gamified Approach to the Turing Test*, arXiv:2305.20010 (2023).
- [18] Xudong Pan, Jiarun Dai, Yihe Fan, Min Yang: *Frontier AI systems have surpassed the self-replicating red line*, arXiv:2412.12140 (2024).

Λοιπά συγγράμματα:

- [19] Νίκος Καζαντζάκης: *Ασκητική*, Εκδόσεις Καζαντζάκη.

ΚΑΤΑΛΟΓΟΣ ΣΧΗΜΑΤΩΝ

205

|        |                                                                                                                                                                                                                                             |     |
|--------|---------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|-----|
| 1.2.21 | Ο απαριθμητής που απαριθμεί την $L \in \text{REC}$ σύμφωνα με τη λεξικογραφική διάταξη ( $M_{\text{next}}$ είναι η TM του Παραδείγματος 1.2.8).                                                                                             | 36  |
| 1.2.22 | Η TM που αποφασίζει την πεπερασμένη γλώσσα $L = \{w_1, w_2, \dots, w_n\}$ .                                                                                                                                                                 | 37  |
| 1.2.23 | Η TM που αποφασίζει την $L$ όταν υπάρχει απαριθμητής $E$ που τη απαριθμεί σύμφωνα με την λεξικογραφική διάταξη.                                                                                                                             | 37  |
| 1.3.1  | Σχηματική αναπαράσταση μίας TM $k$ -ταινιών.                                                                                                                                                                                                | 38  |
| 1.3.2  | Παράδειγμα προσομοίωσης TM $k$ -ταινιών από μονοταινιακή TM.                                                                                                                                                                                | 40  |
| 1.3.3  | Παράδειγμα μη-ντετερμινιστικής TM.                                                                                                                                                                                                          | 42  |
| 1.3.4  | Η TM $N_D$ στην απόδειξη του Θεωρήματος 1.3.14.                                                                                                                                                                                             | 45  |
| 1.3.5  | Η TM $M$ στην απόδειξη του Θεωρήματος 1.3.14.                                                                                                                                                                                               | 46  |
| 1.4.1  | Οι τρεις ταινίες μίας Καθολικής TM (με είσοδο $\langle M, w \rangle$ ).                                                                                                                                                                     | 51  |
| 1.4.2  | Η σειρά με την οποία επιστρέφει η ηρ τα ζευγάρια του $\{0, 1\}^* \times \mathbb{N}$ .                                                                                                                                                       | 53  |
| 1.4.3  | Ο απαριθμητής $E$ που απαριθμεί την $L$ όταν η TM $M_L$ την ημι-αποφασίζει. Γράφουμε $\text{print}(w)$ αντί για το «Σθήσε τη δεύτερη ταινία γράψε $w$ και πήγαινε $q_{\text{out}}$ » που είχαμε γράψει στον απαριθμητή του Σχήματος 1.2.21. | 54  |
| 1.4.4  | Η ντετερμινιστική TM που αποφασίζει την $L(N)$ .                                                                                                                                                                                            | 55  |
| 1.5.1  | Η TM $M$ που αποφασίζει (ημι-αποφασίζει) την $L_1 \cap L_2$ .                                                                                                                                                                               | 55  |
| 1.5.2  | Η TM $M$ που αποφασίζει την $L_1 \cup L_2$ .                                                                                                                                                                                                | 56  |
| 1.5.3  | Η TM $M$ που ημι-αποφασίζει την $L_1 \cup L_2$ .                                                                                                                                                                                            | 56  |
| 1.5.4  | Η TM $M_{\bar{L}}$ που αποφασίζει την $\bar{L}$ .                                                                                                                                                                                           | 57  |
| 3.2.1  | Σχηματική αναπαράσταση του Θεωρήματος Church-Rosser.                                                                                                                                                                                        | 93  |
| 4.2.1  | Σχηματική αναπαράσταση ενός LBA.                                                                                                                                                                                                            | 109 |
| 4.2.2  | Η TM που αποφασίζει την $L$ στην απόδειξη του Θεωρήματος 4.2.11. $M_{G \rightarrow LBA}$ είναι η TM του Πορίσματος 4.2.9.                                                                                                                   | 110 |
| 4.3.1  | Σχηματική αναπαράσταση ενός PDA.                                                                                                                                                                                                            | 112 |
| 4.5.1  | Η Ιεραρχία Chomsky.                                                                                                                                                                                                                         | 113 |
| 5.1.1  | Η TM $M$ στην απόδειξη ότι $D \notin \text{REC}$ .                                                                                                                                                                                          | 122 |
| 5.2.1  | Η TM $M_{HP}$ ημι-αποφασίζει την $HP$ .                                                                                                                                                                                                     | 123 |
| 5.2.2  | Η TM $D$ στην απόδειξη του Θεωρήματος 5.2.1.                                                                                                                                                                                                | 123 |
| 5.2.3  | Η σχέση εγκλεισμού μεταξύ REC και RE.                                                                                                                                                                                                       | 125 |
| 5.2.4  | Η $\phi$ είναι αναγωγή της $A$ στην $B$ .                                                                                                                                                                                                   | 126 |
| 5.2.5  | Η TM $M'$ στην αναγωγή της $HP$ στην $L_{\text{Αποδοχής}}$ .                                                                                                                                                                                | 126 |
| 5.2.6  | Η TM στην απόδειξη του Θεωρήματος 5.2.7.                                                                                                                                                                                                    | 127 |
| 5.2.7  | Η TM $M_w$ στην αναγωγή της $HP$ στην $L_{\epsilon}$ .                                                                                                                                                                                      | 129 |
| 5.2.8  | Η TM $M'$ στην αναγωγή της $L_{\epsilon}$ στην $L_{\infty}$ .                                                                                                                                                                               | 129 |
| 5.2.9  | Η TM $M'$ στην αναγωγή της $L_{\text{Αποδοχής}}$ στη γλώσσα του Παραδείγματος 5.2.17.                                                                                                                                                       | 130 |
| 5.2.10 | Η TM $M_1$ στην αναγωγή της $L_{\text{Αποδοχής}}$ στην $L_{\equiv}$ .                                                                                                                                                                       | 131 |
| 5.2.11 | Η TM $M_w$ στην αναγωγή της $\bar{L}_{\text{Αποδοχής}}$ στην $L_{\emptyset}$ .                                                                                                                                                              | 132 |
| 6.0.1  | Η TM $M_w$ στην απόδειξη του Παραδείγματος 6.0.1.                                                                                                                                                                                           | 136 |
| 6.1.1  | Η TM $M_w$ στην απόδειξη του Θεωρήματος 6.1.1.                                                                                                                                                                                              | 138 |

|       |                                                                                                                                                                                                                 |     |
|-------|-----------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|-----|
| 6.2.1 | Η TM $M_w$ του Παραδείγματος 6.2.1. . . . .                                                                                                                                                                     | 139 |
| 6.2.2 | Η TM $M'$ στην απόδειξη του ότι $L_P \in RE \Rightarrow \textcircled{1}$ στο Θεώρημα 6.2.2. . . . .                                                                                                             | 140 |
| 6.2.3 | Η TM $M'$ στην απόδειξη του ότι $L_P \in RE \Rightarrow \textcircled{2}$ στο Θεώρημα 6.2.2. . . . .                                                                                                             | 141 |
| 6.2.4 | Η TM $M_w$ στην απόδειξη του ότι $L_P \in RE \Rightarrow \textcircled{3}$ στο Θεώρημα 6.2.2. . . . .                                                                                                            | 141 |
| 6.2.5 | Η TM $M_{F_P}$ στην απόδειξη του ότι $L_P \in RE \Rightarrow \textcircled{3}$ στο Θεώρημα 6.2.2. . . . .                                                                                                        | 142 |
| 6.2.6 | Η TM $D$ στην απόδειξη του Θεωρήματος 6.2.2. . . . .                                                                                                                                                            | 143 |
| 6.2.7 | Η TM $M$ που (υποθετικά) ημι-αποφασίζει την $\bar{L}_{\text{Αποδοχής}}$ στο Παράδειγμα 6.2.5. . . . .                                                                                                           | 144 |
| 6.2.8 | Ο απαριθμητής $E$ στο Παράδειγμα 6.2.6. . . . .                                                                                                                                                                 | 144 |
| 7.1.1 | Καλλιτεχνική αναπαράσταση μίας μηχανής που αυτοαναπαράγεται. . . . .                                                                                                                                            | 148 |
| 7.1.2 | Η TM $A$ στην απόδειξη του Θεωρήματος 7.1.2. . . . .                                                                                                                                                            | 150 |
| 7.1.3 | Η TM $P_{\langle A \rangle} A$ στην απόδειξη του Θεωρήματος 7.1.2. . . . .                                                                                                                                      | 150 |
| 7.2.1 | Η TM $P_{\langle AT \rangle} AT$ στην απόδειξη του Θεωρήματος 7.2.1. . . . .                                                                                                                                    | 151 |
| 7.2.2 | Η TM του Παραδείγματος 7.2.2 (αν η πρώτη είσοδος δεν είναι κωδικοποίηση TM η $T$ θα κολλήσει). . . . .                                                                                                          | 151 |
| 7.2.3 | Η TM του Παραδείγματος 7.2.5, όπου $H$ η TM που (υποθετικά) αποφασίζει την $HP$ . . . . .                                                                                                                       | 152 |
| 7.2.4 | Η TM του Παραδείγματος 7.2.6. . . . .                                                                                                                                                                           | 153 |
| 7.2.5 | Η TM της Πρότασης 7.2.9. . . . .                                                                                                                                                                                | 154 |
| 7.3.1 | Η TM που «αποτελεί» σταθερό σημείο για τον μετασχηματισμό $t$ . . . . .                                                                                                                                         | 155 |
| 7.3.2 | Η TM $M$ που υπολογίζει τη συνάρτηση $g$ στην απόδειξη του Θεωρήματος 7.3.7 (με $\langle \varphi_i \rangle_{\mathbb{N}}$ συμβολίζουμε τον αριθμό Gödel της πρότασης $\varphi_i$ , δεξ Παράγραφο Α.5.1). . . . . | 158 |
| 8.1.1 | Σχηματική αναπαράσταση μίας OTM. . . . .                                                                                                                                                                        | 167 |
| 8.1.2 | Η OTM που αποφασίζει την $L_{\text{Αποδοχής}}$ . . . . .                                                                                                                                                        | 169 |
| 8.1.3 | Η OTM $M$ στην απόδειξη της Πρότασης 8.1.22. . . . .                                                                                                                                                            | 172 |
| 8.1.4 | Η OTM $D$ στην απόδειξη της Πρότασης 8.1.23. Παρατηρήστε ότι είναι ακριβώς ίδια με την TM στην απόδειξη του Θεωρήματος 5.2.1! . . . . .                                                                         | 173 |
| 8.1.5 | Η TM $M$ που αποφασίζει την $L$ όταν $L \in RE^A \cap co-RE^A$ (ο λόγος που χρησιμοποιούμε τον συμβολισμό $\boxdot^A$ αναφέρεται στην Υποσημείωση 1 στη Σελίδα 171). . . . .                                    | 174 |
| 8.2.1 | Η TM που αποφασίζει την $HP$ χρησιμοποιώντας μαντείο για την $HP_2$ . . . . .                                                                                                                                   | 176 |
| 8.2.2 | Η OTM $M_1$ στην αναγωγή της $HP_{n+1}$ στην $HP_{n+2}$ . . . . .                                                                                                                                               | 177 |
| 8.2.3 | Η OTM στην απόδειξη του Λήμματος 8.2.7. . . . .                                                                                                                                                                 | 177 |
| 8.2.4 | Η OTM $M$ στην απόδειξη του Λήμματος 8.2.8. . . . .                                                                                                                                                             | 178 |
| 8.2.5 | Η OTM $M$ που αποφασίζει την $0HP_n \cup 1\overline{HP}_n$ αν χρησιμοποιήσουμε μαντείο για την $HP_n$ (τυπικά πρέπει πρώτα να ελέγξουμε αν $x = \epsilon$ ). . . . .                                            | 179 |
| 8.2.6 | Η OTM $M_{HP_n}$ που (υποθετικά) αποφασίζει την $HP_n$ αν χρησιμοποιήσει μαντείο για την $A \in \Sigma_{n-1}^0$ . . . . .                                                                                       | 180 |
| 8.2.7 | Η Αριθμητική Ιεραρχία. . . . .                                                                                                                                                                                  | 181 |
| 8.3.1 | Η TM που ημι-αποφασίζει την $\bar{L}_{\emptyset}$ , όπου $M_{np}$ η TM της Παρατήρησης 1.4.19. . . . .                                                                                                          | 182 |
| 8.3.2 | Η OTM $M$ στην απόδειξη της Πρότασης 8.3.3. . . . .                                                                                                                                                             | 183 |
| 8.3.3 | Η OTM $M$ που αποφασίζει την $\bar{L}$ αν χρησιμοποιήσει μαντείο για την $L$ . . . . .                                                                                                                          | 184 |

|       |                                                                                                                                                                                                                                                                       |     |
|-------|-----------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|-----|
| 8.4.1 | Η OTM $M$ στην απόδειξη της Πρότασης 8.4.3. . . . .                                                                                                                                                                                                                   | 184 |
| 8.4.2 | Η OTM $M$ στην απόδειξη του Θεωρήματος 8.4.4. . . . .                                                                                                                                                                                                                 | 185 |
| 8.5.1 | Η TM του Παραδείγματος 8.5.7. . . . .                                                                                                                                                                                                                                 | 187 |
| 8.5.2 | Η TM $M_L$ του Παραδείγματος 8.5.8. . . . .                                                                                                                                                                                                                           | 188 |
| 8.5.3 | Η TM $M_x$ του Παραδείγματος 8.5.8. Να τονίσουμε ότι μέσα στην καθολική TM ο έλεγχος για την ύπαρξη του $z$ γίνεται χωρίς κάποια επιπλέον φροντίδα. Δοκιμάζουμε όλα τα $z \in \{0,1\}^*$ ακολουθώντας όποια σειρά μας αρέσει (τη λεξικογραφική διάταξη π.χ.). . . . . | 189 |

|                                   |         |                                      |          |
|-----------------------------------|---------|--------------------------------------|----------|
| <b>Ακέραια ρίζα</b> .....         | 121     | <b>Αποτίμηση</b> .....               | 195      |
| <b>Αλγόριθμος</b> .....           | 13      | <b>Αποφασισμότητα</b> 2              |          |
| Διαισθητικός ορισμός .....        | 119     | NTM .....                            | 43       |
| Ευκλείδη .....                    | 76, 119 | OTM .....                            | 168      |
| <b>Αλφάβητο</b> .....             | 6       | TM .....                             | 25, 28   |
| Εισόδου .....                     | 14      | <b>Αριθμητική Ιεραρχία</b> .....     | 175      |
| Ταινίας .....                     | 14      | Ποσοδεικτικός ορισμός.....           | 186      |
| <b>Αναγνωρισιμότητα</b>           |         | <b>Αριθμητική Peano</b> .....        | 198      |
| NTM .....                         | 42      | <b>Αριθμητικοποίηση</b> .....        | 80, 199  |
| OTM .....                         | 168     | <b>Αριθμός</b>                       |          |
| TM .....                          | 26, 27  | Fibonacci .....                      | 76       |
| <b>Αναγωγή</b>                    |         | Αριθμοί Church (Church Numerals).... | 94       |
| Αλγοριθμική.....                  | 181     | Gödel .....                          | 50, 200  |
| Απεικονιστική (many-one) .....    | 125     | Δίδυμοι πρώτοι.....                  | 78       |
| β-αναγωγή .....                   | 92      | Πρώτος .....                         | 71       |
| Cook.....                         | 183     | <b>Αυτοαναφορά</b> .....             | 149, 151 |
| Karp.....                         | 183     | <b>Αυτοεφαρμογή</b> .....            | 88       |
| Turing.....                       | 181     | <b>β-συστολή</b> .....               | 89       |
| <b>Αναδρομή</b>                   |         | β-αναγωγή .....                      | 92       |
| Αμοιβαία .....                    | 77      | β-κανονική μορφή .....               | 93       |
| Διπλή.....                        | 77      | β-redex.....                         | 92       |
| Εμφωλευμένη .....                 | 77      | Contractum.....                      | 92       |
| Θεώρημα .....                     | 150     | <b>Γλώσσα</b> .....                  | 8        |
| Πρωτογενής .....                  | 64      | Αναγνωρίσιμη .....                   | 26, 27   |
| <b>Αναλυτική Ιεραρχία</b> .....   | 190     | Αναδρομικά απαριθμήσιμη (OTM).....   | 168      |
| <b>Αξιωματικό σύστημα</b> .....   | 196     | Αναδρομικά απαριθμήσιμη (TM) .....   | 35       |
| <b>Απαριθμητής</b> .....          | 33      | Αναδρομική (OTM).....                | 168      |
| <b>Αποδεικτικός κανόνας</b> ..... | 196     | Αναδρομική (TM) .....                | 36       |
| <b>Αποδοχή</b> .....              | 26      | Αποφάνσιμη.....                      | 25, 28   |
| γλώσσας από TM .....              | 25, 27  | Ημι-αποφάνσιμη .....                 | 26, 27   |
| <b>Αποκωδικοποίηση</b> .....      | 50      |                                      |          |
| <b>Απόρριψη</b> .....             | 27      |                                      |          |

|                                        |          |                                                       |              |
|----------------------------------------|----------|-------------------------------------------------------|--------------|
| Θεωρίας Αριθμών .....                  | 198      | Δεύτερο Θεώρημα Αναδρομής Kleene ..                   | 150          |
| Κανονική .....                         | 112      | Εγκυρότητας .....                                     | 197          |
| Με συμφραζόμενα .....                  | 107      | Ιεραρχία Chomsky .....                                | 113          |
| που παράγει μία γραμματική.....        | 103      | Μη-πληρότητας Gödel (δεύτερο).....                    | 3, 159       |
| που αναγνωρίζει (ή αποδέχεται) μία NTM | 42       | Μη-πληρότητας Gödel (πρώτο).....                      | 3, 156       |
| που αναγνωρίζει (ή αποδέχεται) μία TM. | 25, 27   | Παραμετροποίησης .....                                | 163          |
| που απριδμεί μία TM.....               | 34       | Πληρότητας .....                                      | 197          |
| Πρωτοβάδμια .....                      | 193      | Ποσοδεικτικός ορισμός Αριθμ. Ιεραρχίας                | 186          |
| Χωρίς συμφραζόμενα .....               | 111      | Σταθερού σημείου .....                                | 98, 149, 155 |
| C-δύσκολη.....                         | 184      | Σταθερού σημείου (Rogers) .....                       | 155          |
| C-πλήρης.....                          | 184      | Chomsky .....                                         | 105          |
| <b>Γραμματική</b> .....                | 101      | Chursh-Rosser .....                                   | 93           |
| Αριστερο-γραμμική .....                | 112      | Kleene-Turing .....                                   | 178          |
| Γενική .....                           | 101      | Matiyasevich, Robinson, Davis, Putman....             | 122          |
| Κανονική .....                         | 112      | Rice (απλό) .....                                     | 137          |
| Με συμφραζόμενα .....                  | 107      | Rice (γενικευμένο) .....                              | 139          |
| Παραγωγή.....                          | 103      | S-m-n.....                                            | 163          |
| Τύπου 0 .....                          | 101      | Tarski .....                                          | 190          |
| Τύπου 1 .....                          | 107      | <b>Ιδιότητα</b> .....                                 | 4            |
| Τύπου 2 .....                          | 110      | Αναδρομικά απαριθμήσιμων γλωσσών....                  | 136          |
| Τύπου 3 .....                          | 112      | Ανακλαστική .....                                     | 4            |
| Χωρίς περιορισμούς .....               | 101      | Μεταβατική .....                                      | 4            |
| Χωρίς συμφραζόμενα .....               | 110      | <b>Ιεραρχία</b> .....                                 |              |
| Left-associative .....                 | 114      | Αναλυτική .....                                       | 190          |
| Phrase Structure .....                 | 114      | Αριθμητική .....                                      | 175          |
| <b>Δείκτης καταστάσεων</b> .....       | 14       | Chomsky .....                                         | 113          |
| <b>Δέντρο υπολογισμού</b> .....        | 42       | <b>Ισοδυναμία</b> .....                               |              |
| <b>Διάγραμμα καταστάσεων</b> .....     | 19       | Γραμματικών.....                                      | 103          |
| <b>Διαγώνιο επιχείρημα</b> .....       | 123, 151 | TM .....                                              | 24           |
| <b>Δομή</b> .....                      | 195      | <b>Κανονική έκφραση</b> .....                         | 9            |
| <b>Είσοδος</b> .....                   | 14       | <b>Κανονική μορφή</b> .....                           |              |
| <b>Ελαχιστοποίηση</b> .....            | 77       | β-κανονική μορφή .....                                | 93           |
| Φραγμένη.....                          | 71       | Κανονική μορφή Kleene .....                           | 83, 99       |
| <b>Ελεγκτής</b> .....                  | 14       | <b>Κατάσταση</b> .....                                |              |
| <b>Ερμηνεία</b> .....                  | 195      | Αρχική .....                                          | 13           |
| <b>Ευκλείδης</b> .....                 |          | Τερματική.....                                        | 13           |
| Αλγόριθμος.....                        | 76, 119  | <b>Κατηγορήμα</b> .....                               | 186          |
| <b>Ημι-αποφασισμότητα</b> .....        |          | Αποφάνσιμο .....                                      | 186          |
| NTM .....                              | 43       | <b>Κελί</b> .....                                     | 14           |
| OTM .....                              | 168      | <b>Κεφαλή</b> .....                                   | 14           |
| TM .....                               | 26, 27   | <b>Κινέζικο Δωμάτιο</b> .....                         | 161          |
| <b>Θέση Church-Turing</b> .....        | 3, 121   | <b>Κλειστότητα</b> .....                              | 4            |
| <b>Θεώρημα</b> .....                   |          | Kleene .....                                          | 7            |
| Αναδρομής .....                        | 150      | REC και RE .....                                      | 54           |
| Αριθμητικής Ιεραρχίας .....            | 178      | <b>Κουτάκια</b> 22, 29, 35, 41, 43, 52, 152, 168, 170 |              |
|                                        |          | <b>Κωδικοποίηση</b> .....                             |              |

|                                           |          |                                        |            |
|-------------------------------------------|----------|----------------------------------------|------------|
| Ακολουθιών φυσικών αριθμών.....           | 74       | Ορισμός αλήθειας Tarski.....           | 195        |
| Γραμματικών.....                          | 104      | Παιχνίδι Μίμησης.....                  | 159        |
| Στιγμιότυπου (σε φυσικό αριθμό).....      | 80       | Παράδειση.....                         | 7          |
| TM.....                                   | 47       | Πεδίο                                  |            |
| Λέξη.....                                 | 6        | Ορισμού.....                           | 5          |
| Αντίστροφη.....                           | 7        | Τιμών.....                             | 5          |
| Εισόδου.....                              | 14       | Πολ/κή διοφαντική εξίσωση (Π.Δ.Ε.) ... | 121        |
| Κενή.....                                 | 7        | Πρόβλημα                               |            |
| Μήκος.....                                | 7        | Απόφασης.....                          | 24         |
| Υπολέξη.....                              | 7        | Δέκατο πρόβλημα Hilbert.....           | 119, 121   |
| Λεξικογραφική διάταξη.....                | 8        | Τερματισμού.....                       | 122        |
| λ-λογισμός.....                           | 87       | Entscheidungsproblem.....              | 2, 13, 87  |
| Αντικατάσταση.....                        | 91       | Πρόταση.....                           | 194        |
| Εφαρμογή.....                             | 89       | Σταθερό σημείο.....                    | 98, 155    |
| Καθαρός.....                              | 89       | Στιγμιότυπο                            |            |
| λ-αφαίρεση.....                           | 89       | Αρνητικό.....                          | 24         |
| λ-ορίσιμη συνάρτηση.....                  | 95       | Αρχικό.....                            | 17         |
| Με τύπους.....                            | 89       | Επόμενο.....                           | 16         |
| Λογική συνεπαγωγή.....                    | 196      | Θετικό.....                            | 24         |
| λ-όρος.....                               | 90       | Καταληκτικό.....                       | 17         |
| Εφαρμογής.....                            | 90       | Λειτουργίας.....                       | 15         |
| Κλειστός.....                             | 91       | Σύμβολο                                |            |
| λ-αφαίρεσης.....                          | 90       | Αρχικό.....                            | 102        |
| Υπόορος.....                              | 93       | Κενού.....                             | 14         |
| Μαντείο.....                              | 166      | Μαξιλαράκι.....                        | 14         |
| Μέγιστος κοινός διαιρέτης.....            | 76, 119  | Μη-τερματικό.....                      | 102        |
| Μεταβλητή                                 |          | Πάτος.....                             | 5          |
| Δεσμευμένη.....                           | 90       | Τερματικό.....                         | 102        |
| Ελεύθερη.....                             | 90, 194  | Συμβολοσειρά.....                      | 6          |
| Μετασχηματισμός TM.....                   | 154, 155 | Συνάρτηση.....                         | 5          |
| Μη-ντετερμινιστικό δήμα.....              | 42       | Αναδρομική.....                        | 78         |
| Μηχανή Turing (TM).....                   | 13       | Αντίστροφη.....                        | 5          |
| Αυτογραφική.....                          | 149      | Γραμματικά υπολογίσιμη.....            | 107        |
| Αυτόματο στοίβας (PDA).....               | 111      | Ελαχιστικά αναδρομική.....             | 78         |
| Βραχύτατη.....                            | 153      | Ένα προς ένα.....                      | 5          |
| Γραμμικά φραγμένο αυτόματο (LBA) ...      | 108      | Επί.....                               | 5          |
| Επεκτάσεις.....                           | 37       | λ-ορίσιμη.....                         | 95         |
| Καθολική.....                             | 47, 51   | Μερική.....                            | 5          |
| Μετάβασης.....                            | 42       | Μετάβασης.....                         | 14         |
| Μετασχηματισμός.....                      | 154, 155 | Ολική.....                             | 5          |
| Μη-ντετερμινιστική (NTM).....             | 41       | Πλήρης.....                            | 5          |
| Πεπερασμένο αυτόματο (NFA).....           | 112      | Προβολή.....                           | 64, 96     |
| Πολυταινιακή.....                         | 38       | Πρωτογενώς αναδρομική.....             | 64         |
| Χρησιμοποιητική καθολική.....             | 170      | Σταθερή.....                           | 19, 64, 90 |
| Χρησιμοποιητική (TM με μαντείο, OTM)..... | 166      | Σύνδεση συναρτήσεων.....               | 5, 64      |
| Μοναδιαίο σύστημα αρίθμησης.....          | 80       | Ταυτοτική.....                         | 19, 90     |
| Μοντέλο.....                              | 196      | του επόμενου.....                      | 64         |

|                                              |          |                                      |            |
|----------------------------------------------|----------|--------------------------------------|------------|
| Υπολογίσιμη (OTM) .....                      | 168      | Θεώρημα .....                        | 105        |
| Υπολογίσιμη (TM) .....                       | 19       | Ιεραρχία .....                       | 113        |
| Χαρακτηριστική .....                         | 6        | <b>Church, Alonzo</b> .....          | 3, 13, 87  |
| Ackermann .....                              | 79       | Αριθμοί Church (Church Numerals).... | 94         |
| <b>Συναρτησιακός Προγραμματισμός</b> .....   | 87       | Θέση Church-Turing .....             | 3, 121     |
| <b>Συνδυαστής</b> .....                      | 91       | Θεώρημα Chursh-Rosser .....          | 93         |
| Ζεύγους .....                                | 96       | <b>Contractum</b> .....              | 92         |
| Θ .....                                      | 98       | <b>Cook, Stephen Arthur</b> .....    | 183        |
| ω .....                                      | 90       | Αναγωγή .....                        | 183        |
| Ω .....                                      | 90       | <b>Curry, Haskell</b> .....          | 88         |
| <b>Συνέπεια αξιωματικού συστήματος</b> ..... | 197      | Currying .....                       | 88         |
| <b>Σύνολο</b> .....                          |          | <b>Fibonacci</b> .....               |            |
| Αριθμησίμως άπειρο .....                     | 6        | Αριθμοί .....                        | 76         |
| Διοφαντικό .....                             | 122      | <b>Gödel, Kurt</b> .....             | 3, 13, 159 |
| Ισοπληθικά σύνολα .....                      | 6        | Αριθμός .....                        | 50, 200    |
| Κανόνων .....                                | 102      | Δεύτερο Θεώρημα μη-πληρότητας ....   | 3, 159     |
| Καταστάσεων .....                            | 13       | Πρώτο Θεώρημα μη-πληρότητας ....     | 3, 156     |
| Πεπερασμένο .....                            | 6        | <b>Hilbert, David</b> .....          | 1, 13, 87  |
| <b>Σχέση</b> .....                           | 4        | Δέκατο πρόβλημα .....                | 119, 121   |
| Αναδρομική .....                             | 78       | Πρόγραμμα .....                      | 1          |
| Αναπαραστάσιμη .....                         | 199      | <b>Karp, Richard Manning</b> .....   | 183        |
| Ελαχιστικά αναδρομική .....                  | 78       | Αναγωγή .....                        | 183        |
| Μεταβατική .....                             | 4        | <b>Kleene, Stephen Cole</b> .....    |            |
| Πρωτογενώς αναδρομική .....                  | 68       | Δεύτερο Θεώρημα Αναδρομής .....      | 150        |
| <b>Ταινία</b> .....                          | 14       | Κανονική μορφή .....                 | 83, 99     |
| <b>Τερματισμός</b> .....                     | 18       | Κλειστότητα (Kleene Star) .....      | 7          |
| <b>Τεχνητή Νοημοσύνη</b> .....               | 161      | <b>Modus Ponens</b> .....            | 197        |
| <b>Τύπος</b> .....                           | 194      | <b>Peano, Giuseppe</b> .....         |            |
| Ικανοποιησιμος .....                         | 195      | Αριθμητική .....                     | 198        |
| <b>Υπολογισμός</b> .....                     | 3, 17    | <b>Post, Emil Leon</b> .....         | 114        |
| Απόλυτος .....                               | 17       | <b>Rice, Henry Gordon</b> .....      |            |
| Σχετικός .....                               | 165, 166 | Απλό Θεώρημα .....                   | 137        |
| <b>Υπολογιστικό σενάριο</b> .....            | 42       | Γενικευμένο Θεώρημα .....            | 139        |
| <b>Φάση</b> .....                            | 15       | <b>Rogers, Hartley Jr.</b> .....     |            |
| <b>Χρησιμοδότης</b> .....                    | 166      | Θεώρημα σταθερού σημείου .....       | 155        |
| <b>Ψηφίο</b> .....                           | 199      | <b>Rosser, John Barkley</b> .....    |            |
| <b>Ackermann, Wilhelm</b> .....              |          | Θεώρημα Chursh-Rosser .....          | 93         |
| Συνάρτηση .....                              | 79       | <b>Russell, Bertrand</b> .....       | 1          |
| <b>Cantor, Georg</b> .....                   | 1        | Παράδοξο .....                       | 1          |
| Διαγώνιο επιχείρημα .....                    | 123      | <b>Tarski, Alfred</b> .....          |            |
| <b>Chatbot</b> .....                         | 161      | Θεώρημα .....                        | 190        |
| <b>ChatGPT</b> .....                         | 162      | Ορισμός αλήθειας .....               | 195        |
| <b>Chomsky, Noam</b> .....                   | 105, 114 | <b>Thue, Axel</b> .....              | 114        |
|                                              |          | <b>Turing, Alan</b> .....            | 3, 13, 159 |
|                                              |          | Αναγωγή .....                        | 181        |
|                                              |          | Θέση Church-Turing .....             | 3, 121     |
|                                              |          | Μηχανή .....                         | 13         |
|                                              |          | Τεστ .....                           | 159        |

|                                     |       |                               |     |                                  |          |                                                  |        |
|-------------------------------------|-------|-------------------------------|-----|----------------------------------|----------|--------------------------------------------------|--------|
| $BV$ .....                          | 90    | $M_{np}$ .....                | 53  | $\perp$ .....                    | 5        | print .....                                      | 34     |
| $CF$ .....                          | 111   | $\mathbb{M}^L$ .....          | 170 | $c_n$ .....                      | 94       | $q_0$ .....                                      | 13, 26 |
| $CS$ .....                          | 107   | $\Omega$ .....                | 90  | $co\text{-}\mathcal{C}$ .....    | 173      | $q?$ .....                                       | 166    |
| $F_{\mathcal{P}}$ .....             | 139   | Proof .....                   | 200 | $\langle \rangle_{\Sigma}$ ..... | 47       | $q_{\tau\epsilon\lambda\omicron\varsigma}$ ..... | 13     |
| $FV$ .....                          | 90    | $P$ .....                     | 198 | $\Delta_n^0$ .....               | 175      | $q_{\nu\alpha\iota}$ .....                       | 26     |
| $HP_n$ .....                        | 175   | $RE^A$ .....                  | 171 | $\downarrow_q$ .....             | 18       | $q_n$ .....                                      | 166    |
| $L_{\mathcal{P}}$ .....             | 136   | $REC^A$ .....                 | 171 | $\downarrow$ .....               | 18       | $q_{\acute{o}\chi\iota}$ .....                   | 26     |
| $L_{REC}$ .....                     | 138   | $REC^C$ .....                 | 175 | dom .....                        | 5        | $q_y$ .....                                      | 166    |
| $L_{\{0,1\}^*}$ .....               | 129   | REC .....                     | 29  | Gödel .....                      | 50       | $w^R$ .....                                      | 7      |
| $L_{\text{Αποδοχής}}$ .....         | 126   | $RE^C$ .....                  | 175 | $HP$ .....                       | 122, 123 | $\triangleright$ .....                           | 14, 26 |
| $L_{\emptyset}$ .....               | 131   | RE .....                      | 29  | im .....                         | 5        | row .....                                        | 149    |
| $L_{\epsilon}$ .....                | 128   | $\Rightarrow_G$ .....         | 102 | $\lambda x.$ .....               | 90       | $\Sigma_n^0$ .....                               | 175    |
| $L_{\equiv}$ .....                  | 130   | R .....                       | 112 | $\leq_T$ .....                   | 181      | space .....                                      | 21     |
| $L_{\mathbb{N}}$ .....              | 138   | $\Sigma^*$ .....              | 7   | $\leq_m$ .....                   | 125      | $\sqcup$ .....                                   | 14, 26 |
| $L_{\infty}$ .....                  | 129   | $\mathcal{G}$ .....           | 50  | $<_{\sigma}$ .....               | 8        | $\Theta$ .....                                   | 98     |
| $L_{\text{Παλίνδρομο}}$ .....       | 8, 28 | Truth .....                   | 189 | $\triangleleft$ .....            | 108      | $\uparrow$ .....                                 | 18     |
| $M_1 M_2$ .....                     | 149   | $\mathbb{M}$ .....            | 51  | next .....                       | 21       | $\models$ .....                                  | 196    |
| $M_{G \rightarrow LBA}$ .....       | 109   | $[]$ .....                    | 4   | np .....                         | 53       | $\vdash$ .....                                   | 196    |
| $M_{TM \rightarrow \mu}$ .....      | 83    | $\aleph_0$ .....              | 6   | $\omega$ .....                   | 90       |                                                  |        |
| $M^L$ .....                         | 167   | $\rightarrow_{\beta}^*$ ..... | 92  | $\Pi_n^0$ .....                  | 175      |                                                  |        |
| $M_{\mu \rightarrow \varphi}$ ..... | 200   | $\rightarrow_{\beta}$ .....   | 92  | $\phi_M$ .....                   | 24       |                                                  |        |