



ΠΑΝΕΠΙΣΤΗΜΙΟ ΠΕΙΡΑΙΩΣ

ΤΜΗΜΑ ΒΙΟΜΗΧΑΝΙΚΗΣ ΔΙΟΙΚΗΣΗΣ ΚΑΙ ΤΕΧΝΟΛΟΓΙΑΣ

ΤΕΧΝΗΤΗ ΝΟΗΜΟΣΥΝΗ

Τατιάνα Ταμπουρατζή

Νοέμβριος 2017



Πανεπιστήμιο Πειραιώς
Τμήμα Μηχανικής Διοίκησης και Τεχνολογίας
Διαχείριση Πληροφοριών και Γλώσσες Προγραμματισμού





ΠΕΡΙΕΧΟΜΕΝΑ

σελίδες

Εισαγωγικά	5-12
Αναπαράσταση	13-28
Τεχνικές ΤΝ	29-50
Λογική & Γνώση	51-76
Εκμάθηση	77-98
Βελτιστοποίηση-Γενετικοί	99-102
Αλγόριθμοι	
Λεξιλόγιο	103-108



Πανεπιστήμιο Πειραιώς
Τμήμα Μηχανικής Διοίκησης και Τεχνολογίας
Διαχείριση Πληροφοριών και Γλώσσες Προγραμματισμού





ΕΙΣΑΓΩΓΙΚΑ



Πανεπιστήμιο Πειραιώς
Τμήμα Μηχανικής Διοίκησης και Τεχνολογίας
Διαχείριση Πληροφοριών και Γλώσσες Προγραμματισμού



1. ΕΙΣΑΓΩΓΙΚΑ

1.1. ΗΛΕΚΤΡΟΝΙΚΟΙ ΥΠΟΛΟΓΙΣΤΕΣ

Ο ηλεκτρονικός υπολογιστής (Η/Υ) χαρακτηρίζεται ως ηλεκτρονικό σύστημα επεξεργασίας πληροφοριών. Βασικά του συστατικά αποτελούν:

- η μνήμη, όπου αποθηκεύονται πληροφορίες σε δυαδική μορφή¹,
- η μονάδα επεξεργασίας, όπου πραγματοποιείται η διαχείριση (είσοδος, δημιουργία, ανάκληση, μετατροπή, αποθήκευση, διαγραφή, έξοδος κλπ.) δεδομένων και πληροφοριών τα οποία βρίσκονται σε δυαδική μορφή, καθώς και
- οι περιφερειακές μονάδες (εισόδου/εξόδου, πχ. οθόνη και πληκτρολόγιο, εκτυπωτής, σαρωτής) μέσω των οποίων επιτυγχάνεται η αλληλεπίδραση με τον χρήστη.

Απαραίτητη προϋπόθεση αποδοτικής λειτουργίας του Η/Υ είναι η δυνατότητα γραφής και αποθήκευσης προγραμμάτων για την διαχείριση των δεδομένων και πληροφοριών.

1.2. ΦΥΣΙΚΗ ΚΑΙ ΤΕΧΝΗΤΗ ΝΟΗΜΟΣΥΝΗ

Αν και η ερώτηση του τι αποτελεί φυσική νοημοσύνη (ΦΝ) ή ευφυΐα έχει τεθεί και απασχολήσει την ανθρωπότητα από τις απαρχές της φιλοσοφίας, ορισμός δεν έχει δοθεί ακόμη (και ίσως να μη δοθεί ποτέ). Πάντως, ως ΦΝ μπορεί να χαρακτηριστεί ένας συνδυασμός δυνατοτήτων αναπαράστασης και διαχείρισης ερεθισμάτων και δεδομένων/γνώσης (χωρίς να είναι γνωστός ο ακριβής τρόπος αναπαράστασης και διαχείρισής τους), για παράδειγμα:

- η δυνατότητα αλληλεπίδρασης με το περιβάλλον (κατανόηση ερεθισμάτων και ανάλογου χειρισμού του περιβάλλοντος),
- η δυνατότητα απόκτησης και εφαρμογής γνώσης (εκμάθηση),
- η δυνατότητα λογικής σκέψης.

Ας κοιτάξουμε γύρω μας: κάθε δευτερόλεπτο τα μάτια μας συλλέγουν πληροφορία της τάξης των 5 gigabytes (5×10^9 bytes). Όταν ακούμε ραδιόφωνο τα αυτιά μας συλλέγουν πληροφορία της τάξης των 500 megabytes (500×10^6 bytes) ανά δευτερόλεπτο. Αυτά, μαζί με πάμπολλα άλλα ερεθίσματα και λειτουργίες (πχ. κίνηση των μελών του σώματός μας, επίλυση ενός διανοητικού προβλήματος, συνομιλία, αναγνώριση ενός γνωστού που έρχεται προς το μέρος μας ή μίας μελωδίας που μόλις αρχίζει) εκτελούνται συγχρόνως και χωρίς ιδιαίτερη προσπάθεια. Αν ένας Η/Υ κοιτάζει γύρω του (πχ. με τη βοήθεια καμερών για μάτια) μπορεί να συλλέξει την ίδια πληροφορία που συλλέγουμε κι εμείς για τον περιβάλλοντα χώρο. Ενα μικρόφωνο προσαρτημένο στον Η/Υ μπορεί να συλλέξει τους ίδιους ήχους με το αντί μας. Παρ' όλες αυτές τις ομοιότητες και την δυνατότητα ταχείας εκτέλεσης πράξεων στον Η/Υ, ο Η/Υ δεν είναι δυνατόν ούτε να εντοπίσει με ακρίβεια την μορφή που εμφανίζεται (πόσο μάλλον το ότι αποτελεί άνθρωπο, γνωστό μας και ποιον), ούτε να αναγνωρίσει τα λόγια του τραγουδιού (πόσο μάλλον τον τραγουδιστή). Βασικοί λόγοι για αυτή την αδυναμία των Η/Υ αποτελούν τα εξής:

- Η ευφυΐα απαιτεί γνώση.
- Η γνώση απαιτεί την κατάλληλη αναπαράστασή της στη μνήμη ώστε να καθίσταται εύκολα προσβάσιμη (να είναι εύκολο να διαπιστωθεί ότι υπάρχει γνώση η οποία είναι σχετική με το πρόβλημα) και διαχειρίσιμη (να είναι εύκολο η υπάρχουσα γνώση να χρησιμοποιηθεί για την επίλυση του προβλήματος).
- Η γνώση πρέπει να (ανα)προσαρμόζεται εύκολα σε νέες ή σταδιακά μεταβαλλόμενες συνθήκες (εκμάθηση).

Ως τεχνητή νοημοσύνη (TN, *artificial intelligence*) ορίζεται η μελέτη των ιδεών οι οποίες επιτρέπουν στους Η/Υ να εκτελούν λειτουργίες τις οποίες ήδη εκτελούν με επιτυχία οι άνθρωποι. Τελικό σκοπό της TN αποτελεί η αυτόνομη:

- αλληλεπίδραση με/προσαρμογή στο περιβάλλον,
- λήψη αποφάσεων,

¹ Η δυαδική μορφή είναι μία αναπαράσταση δεδομένων συνδυάζοντας τους αριθμούς 0 και 1, όπου το 1 αντιστοιχεί στο "αληθές" και το 0 στο "ψευδές".

- εκμάθηση κλπ.

Πώς όμως μπορούν οι H/Y να καταστούν ικανοί να επιλύουν πολύπλοκα ή εξεζητημένα προβλήματα τα οποία απαιτούν ανθρώπινη ευφυΐα, ώστε να επιδεικνύουν και οι ίδιοι ευφυΐα; Υπάρχουν βασικές διαφορές μεταξύ της δομής των H/Y και του ανθρώπινου εγκεφάλου, πχ. όσον αφορά:

- στη συνδεσμολογία και λειτουργία (για παράδειγμα, οι χώροι αποθήκευσης και επεξεργασίας καθώς και οι χώροι εισόδου-εξόδου και επεξεργασίας είναι καλά διαχωρισμένοι στον H/Y αν και συνυπάρχουν στον ανθρώπινο εγκέφαλο),
- στην ακρίβεια και ταχύτητα εκτέλεσης αριθμητικών και λογικών πράξεων καθώς και διαδικασιών (η οποία είναι σημαντικά μεγαλύτερη στους H/Y από ότι στον ανθρώπινο εγκέφαλο),
- στην ευκολία διαγραφής των δεδομένων της μνήμης του H/Y και στη δυσκολία σταδιακής μετατροπής τους, χαρακτηριστικά τα οποία είναι εντελώς αντίθετα με αυτά του ανθρώπινου εγκεφάλου,
- στην έλλειψη δυνατότητας ενσωμάτωσης/εκδήλωσης συναισθημάτων, πρωτοβουλίας, δημιουργικότητας, θέλησης, συνείδησης στον H/Y.

Αυτές οι διαφορές υπονοούν ότι ενδέχεται οι επιλύσεις που δίδουν οι H/Y να είναι διαφορετικές από αυτές του ανθρώπινου εγκεφάλου ή, πιο ακραία, ότι κάποια τα προβλήματα τα οποία δύναται να επιλύσει η ΦΝ δεν μπορεί να επιλύσει ο H/Y με την τωρινή του μορφή (και αντίστροφα).

Η ΤΝ εφάπτεται όχι μόνο της επιστήμης υπολογιστών, αλλά και της νευροψυχολογίας (*neuropsychology*), της γνωστικής ψυχολογίας (*cognitive psychology*), της φιλοσοφίας, της γλωσσολογίας, της λογικής κλπ. Αυτό ισχύει γιατί η μελέτη της ΤΝ αποσκοπεί όχι μόνο (α) στο να καταστούν οι H/Y πιο χρήσιμοι (σκοπός της επιστήμης υπολογιστών, της λογικής κλπ) αλλά και (β) στο να γίνουν κατανοητές οι αρχές της ΦΝ/ευφυΐας (σκοπός της νευροψυχολογίας, της γνωστικής ψυχολογίας, της φιλοσοφίας, της γλωσσολογίας κλπ). Και ενώ στο πρώτο δεν ενδιαφέρει το εάν η επίλυση πραγματοποιείται με τον ίδιο τρόπο που αυτή πραγματοποιείται από την ΦΝ, στο δεύτερο επιδιώκεται κάποια προσέγγιση του τρόπου αναπαράστασης και επεξεργασίας της γνώσης (πχ. για τον έλεγχο ψυχολογικών και γλωσσικών θεωριών) της ΦΝ.

1.3. ΕΠΙΤΕΥΞΗ ΤΕΧΝΗΤΗΣ ΝΟΗΜΟΣΥΝΗΣ

Ενα από τα βασικά ερωτήματα της ΤΝ που απασχολεί τους επιστήμονες των υπολογιστών καθώς και τους φιλοσόφους της επιστήμης, είναι του κατά πόσον είναι εφικτή η ΤΝ. Οσον αφορά στο να καταστούν οι H/Y πιο χρήσιμοι, η ΤΝ υποθέτει ότι:

- η ΦΝ μπορεί να αναχθεί σε πολύπλοκο χειρισμό συμβόλων τα οποία αποθηκεύονται στον H/Y, όπου και πραγματοποιείται η επεξεργασία τους,
- δεν παίζει ρόλο το μέσον που χρησιμοποιείται για τον χειρισμό των συμβόλων, με άλλα λόγια δεν είναι απαραίτητο το μέσον να είναι ο ανθρώπινος εγκέφαλος και όχι ο H/Y².

Πλήθος φιλοσοφικών θεωριών αντιτίθενται σε αυτές τις υποθέσεις, υποστηρίζοντας ότι για την επίδειξη ευφυΐας είναι απαραίτητη και η προσομοίωση του μέσου. Κλασικό παράδειγμα αποτελεί η εξέταση του Turing (*Turing test*, Turing (1950)), μία θεωρία για την διαπίστωση του κατά πόσον το μέσον παίζει ρόλο στην ΤΝ. Απαιτούνται δύο δωμάτια χωρίς άμεση επικοινωνία, δύο άνθρωποι και ένας H/Y. Ο ένας άνθρωπος, ο οποίος θέτει πληκτρολογημένες ερωτήσεις ευφυΐας, εγκυκλοπαιδικών γνώσεων, καθώς και ερωτήσεις υποκειμενικές/συναισθηματικές/κρίσεως, τοποθετείται μόνος στο πρώτο δωμάτιο. Ο άλλος άνθρωπος (ΦΝ) και ο H/Y (ΤΝ) τοποθετούνται στο δεύτερο δωμάτιο και ένας από αυτούς (τυχαία επιλεγμένος κάθε φορά) απαντά σε μία ερώτηση. Η κάθε απάντηση – είτε αυτή προέρχεται από την ΦΝ είτε από την ΤΝ - παραδίδεται στον πρώτο άνθρωπο με ενιαίο τρόπο (πληκτρολογημένο, πχ. με e-mail), οπότε ο πρώτος άνθρωπος προσπαθεί μέσα από τις απαντήσεις να ανακαλύψει ποιος είναι ο άνθρωπος και ποιος ο H/Y. Ο Turing δίνει ένα απόσπασμα από τον διάλογο που θα πρέπει να είναι δυνατός από τον H/Y, ώστε να μην είναι εφικτή η διάκριση ΦΝ και ΤΝ:

² Δε παραβλέπεται φυσικά το γεγονός ότι η προσομοίωση του μέσου ενδέχεται να επιτρέψει την βελτίωση της ΤΝ σε τομείς που προς το παρόν αυτή δεν είναι ιδιαίτερα επιτυχής.

Ερώτηση: In the first line of your sonnet which reads "Shall I compare thee to a summer's day", would not "a spring's day" do as well or better?

Απάντηση: It wouldn't scan.

Ερώτηση: How about "a winter's day"? That would scan all right.

Απάντηση: Yes, but nobody wants to be compared to a winter's day.

Ερώτηση: Would you say Mr Pickwick reminded you of Christmas?

Απάντηση: In a way.

Ερώτηση: Yet Christmas is a winter's day, and I do think Mr Pickwick would mind the comparison.

Απάντηση: I don't think you're serious. By a winter's day one means a typical winter's day, rather than a special one like Christmas.

Εφόσον οι απαντήσεις του ανθρώπου και του H/Y δεν είναι δυνατόν να διαχωριστούν³, συμπεραίνεται ότι οι δύο επιδεικνύουν παρόμοια ευφυία και άρα το μέσον δεν είναι απαραίτητη προϋπόθεση TN. Ένα βασικό ερώτημα είναι το πόση γνώση πρέπει να αποθηκευτεί στον H/Y προκειμένου αυτός να περάσει την εξέταση του Turing. Ο Turing είχε προβλέψει ότι μέσα σε 50 χρόνια (το έτος 2000) θα είχαν υλοποιηθεί H/Y με χωρητικότητα (μνήμης) 10^9 bits, και ότι ένα κατάλληλο πρόγραμμα σε έναν τέτοιο H/Y θα μπορούσε να ξεγελάσει έναν άνθρωπο για 5 λεπτά 7 στις 10 φορές.

Παρ' όλα αυτά, διάφοροι φιλόσοφοι της επιστήμης αμφισβητούν την εξέταση του Turing. Για παράδειγμα ο Searle (1980) αντιθέτει την εξέταση του Κινέζικου δωματίου (*Chinese room*), όπου πάλι χρησιμοποιούνται δύο δωμάτια χωρίς άμεση επικοινωνία, με έναν άνθρωπο σε κάθε δωμάτιο. Ο ένας άνθρωπος γνωρίζει Κινέζικα και θέτει ερωτήσεις στον άλλο άνθρωπο στα Κινέζικα μέσω e-mail. Ο άλλος άνθρωπος απαντά, πάλι στα Κινέζικα μέσω e-mail. Μη γνωρίζοντας Κινέζικα, δίνει τις απαντήσεις του με τη βοήθεια ενός τεράστιου Κινέζικου βιβλίου το οποίο περιέχει όλες τις δυνατές Κινέζικες ερωτήσεις καθώς και τις αντίστοιχες απαντήσεις. Με αυτόν τον τρόπο ο δεύτερος άνθρωπος δύναται να συνομιλεί επιτυχώς χωρίς να κατανοεί λέξη από τη συνομιλία. Κατ' αναλογία υποστηρίζεται ότι, αφού η επίδειξη ευφυούς συμπεριφοράς διαφέρει σημαντικά από την ευφυία, είναι δυνατόν ένας H/Y να επιδεικνύει ευφυή συμπεριφορά με τη βοήθεια πολλής και κατάλληλης γνώσης (μνήμης), χωρίς όμως να διαθέτει ευφυία (TN). Από την εξέταση του Κινέζικου δωματίου απορρέει επίσης ότι η κατάλληλη αναπαράσταση της γνώσης είναι εξίσου σημαντική με την μεγάλη χωρητικότητα της μνήμης.

Είναι φανερό ότι χρειάζεται αρκετός καιρός ακόμα μέχρι οι H/Y να περάσουν την εξέταση του Turing, πόσο μάλλον να διαπιστωθεί εάν είναι πραγματικά ευφυείς. Το ενδιαφέρον της εφαρμοσμένης TN έγκειται στο να επιδεικνύουν οι H/Y αυξανόμενη ευφυία σε ολοένα και πιο πολύπλοκα/δύσκολα προβλήματα και περιβάλλοντα.

1.4. ΑΝΑΠΤΥΞΗ ΤΕΧΝΗΤΗΣ ΝΟΗΜΟΣΥΝΗΣ

1.4.1. Ιστορικά βήματα προς TN

550 π.Χ. Πυθαγόρας: τα πάντα είναι αριθμοί. Όλα τα υπαρκτά αντικείμενα μπορούν να αναχθούν σε αριθμητικές σχέσεις.

400 π.Χ. Πλάτων: Η διαλεκτική ως δρόμος για την καθαρή γνώση. Αναζήτηση τυπικών/δόκιμων μεθόδων για την εύρεση της γνώσης και της αλήθειας.

350 π.Χ. Αριστοτέλης: Αρχές της λογικής. Ανάλυση της συλλογιστικής. Η λογική ως εργαλείο σκέψης.

1630 μ.Χ. Καρτέσιος (ο πρώτος μοντέρνος ορθολογιστής): Εκκίνηση με μία ακλόνητη βάση συλλογισμού και συναγωγή όλων των λογικών συμπερασμάτων/επιπτώσεων.

1640 μ.Χ. Hobbes (μηχανικός): Η σοφία ως προϊόν της λογικής, η λογική ως υπολογισμός.

³ Σημειώνεται ότι Ο H/Y μπορεί αντίστοιχα να χρησιμοποιήσει οποιονδήποτε τρόπο προκειμένου να ξεγελάσει τον άνθρωπο στο άλλο δωμάτιο. Για παράδειγμα, σε ερώτηση "How much is 12324 times 73981?" μπορεί να περιμένει αρκετή ώρα ή και να απαντήσει λάθος. Σημειώνεται ότι η εξέταση του Turing ουσιαστικά αφορά στον εάν είναι δυνατόν η TN να ξεγελάσει έναν άνθρωπο στο ότι αποτελεί ΦΝ (επιδεικνύει ευφυία).

1670 μ.Χ. Leibniz (νοητικός ατομισμός): Σύλληψη του λογικού λογισμού. Δημιουργία μίας αλφαβήτου σκέψης, μηχανικής σε λειτουργία. Πεποίθηση ότι οι πολύπλοκες ιδέες προέρχονται από/ αποσυντίθενται σε ατομικές ιδέες.

1840 μ.Χ. Boole: Ανάπτυξη των "νόμων σκέψης" και του παραλληλισμού μεταξύ αλγεβρικών και λογικών πράξεων.

1905 μ.Χ. Russel και Whitehead: Απόπειρα απόδειξης του ότι τα μαθηματικά ανάγονται στη λογική.

1930 μ.Χ. Goedel: Απόδειξη του θεωρήματος της μη-πληρότητας, δηλαδή ότι υπάρχουν αλήθειες οι οποίες δεν μπορούν να αποδειχτούν.

1935 μ.Χ. Church και Turing: Ανάπτυξη της έννοιας της αποτελεσματικής διαδικασίας. Αναγωγή κάθε τυπικής συμβολικής επεξεργασίας σε απλές μηχανικές πράξεις.

1.4.2. Ορόσημα της ΤΝ

1890 μ.Χ. Ο Torres y Quedeno (Ισπανός) κατασκεύασε την πρώτη αυτόματη σκακιστική μηχανή.

1940... μ.Χ. (Β' Παγκόσμιος Πόλεμος). Αμερικανοί και Γερμανοί ανταγωνίζονταν (για πολεμικούς σκοπούς) για την παραγωγή H/Y που εκτελούν με ακρίβεια βαλλιστικούς υπολογισμούς καθώς και αποκωδικοποίηση μηνυμάτων.

1948 μ.Χ. Ο Wiener εξέδωσε το βιβλίο "Cybernetics: Control and Communication in the Animal and Machine", με αναφορές στο μηχανικό υπολογισμό (computing) και τον εγκέφαλο.

1949 μ.Χ. Ο Shannon έθεσε τις βάσεις για το προγραμματισμό του παιχνιδιού σκακιού.

1951 μ.Χ. Ο Turing έγραψε το πρώτο πρόγραμμα παιχνιδιού σκακιού (το οποίο όμως δεν έτρεξε ποτέ).

1956 μ.Χ. Ο John McCarthy εισήγαγε τον όρο ΤΝ (*Artificial Intelligence*).

1950-μέσα 1970μ.Χ. Πρώτη φάση της ΤΝ (συμβολική/κλασσική ΤΝ). Η φάση αυτή συνίσταται σε προτάσεις εφαρμογής ΤΝ σε απλά προβλήματα χωρίς την ανάδειξη των περιορισμών που εμπεριέχει η υλοποίηση. Κάποιες σημαντικές και ενθαρρυντικές (αλλά, δυστυχώς, πρώιμες) επιτυχίες της ΤΝ αφορούσαν στη:

(α) Μηχανική μετάφραση (*language translation*) τεχνικών κειμένων.

(β) Επίλυση προβλημάτων (*problem solving*) πχ. (i) *Logic Theorist* (Newell, Shaw και Simon, 1957) το οποίο αποδεικνύει θεωρήματα της λογικής και μάλιστα – κάποιες φορές – μέσω συντομότερων αποδείξεων από τις υπάρχουσες. (ii) *General Problem Solver* (Newell και Simon, 1972) το οποίο χρησιμοποιεί γενικές ευριστικές μεθόδους (*heuristics*) και εμπειρικούς κανόνες (*rules of thumb*) προκειμένου να επιλύσει προβλήματα. Η επίλυση επιτυγχάνεται μέσω της ελαχιστοποίησης της απόστασης μεταξύ τρέχουσας και τελικής κατάστασης (επίλυσης) του προβλήματος (*means-ends analysis*) καθώς και μέσω της διάσπασης του προβλήματος σε επιμέρους (μικρότερα και απλούστερα) υπο-προβλήματα.

(γ) Αναγνώριση προτύπων (*pattern recognition*) πχ. κατανόηση κώδικα Morse ή αναγνώριση του γράμματος "Α" σε χειρόγραφο κείμενο.

1959 μ.Χ. Ο McCarthy ανέπτυξε τη γλώσσα λογικού προγραμματισμού LISP.

1965 μ.Χ. Ο Robinson ανέπτυξε τη γλώσσα λογικού προγραμματισμού PROLOG.

1972 μ.Χ. Ο Winograd εισήγαγε ένα σύστημα αναγνώρισης τεχνητού μικρόκοσμου κύβων (*blocks world*).

Μέσα 1970-μέσα 1980 μ.Χ. Δεύτερη φάση της ΤΝ. Εκρηξη ΤΝ με κάποιες εμπορικές εφαρμογές (όχι μόνο ερευνητικές). Επιδείξεις προγραμμάτων/συστημάτων ΤΝ οι οποίες αποτελούν και αποδείξεις ότι ο χειρισμός προβλημάτων με πρακτική σημασία είναι εφικτός. Εμφαση στην αναπαράσταση γνώσης και στη δημιουργία αποδοτικών τεχνικών. Ακμή της ΤΝ.

Μέσα 1980-σήμερα: Τρίτη φάση της ΤΝ. Πειράματα-εφαρμογές, οι οποίες δίνουν απαντήσεις σε δύσκολα προβλήματα τα οποία ξεπερνούν μια επιφανειακή επίδειξη. Δημιουργία παρακλαδιών της ΤΝ, όπως τα τεχνητά νευρωνικά δίκτυα, η ασαφής λογική, τα έμπειρα συστήματα και οι γενετικοί αλγόριθμοι, οι κοινωνίες μυρμηγκιών κλπ.

1.4.3. Αποτίμηση πορείας TN

Σημειώνεται ότι οι εφαρμογές συστημάτων H/Y που επιδεικνύουν TN δεν προχωράει όσο γρήγορα θα νόμιζε κανείς ή όσο επιτυχώς διαφαινόταν από τις προόδους κατά τη διάρκεια των δεκαετιών 50, 60 και 70. Και οι τρεις τομείς για τους οποίους υπήρξε αρχικός ενθουσιασμός κατά την πρώτη φάση την TN (τομείς μηχανικής μετάφρασης, επίλυσης προβλημάτων και ανάλυσης προτύπων) κατέδειξαν την αδυναμία της TN να:

- (i) χρησιμοποιήσει γενική γνώση ή γνώση του περιβάλλοντος προκειμένου να αποσαφηνίσει τα δεδομένα και να δώσει τη σωστή ερμηνεία/σημασία σε περίπτωση πολλαπλών εκδοχών,
- (ii) να επεκταθεί από τα καλά καθορισμένα και περιορισμένα περιβάλλοντα υλοποίησης του προγράμματος σε γενικότερες συνθήκες (*scale-up*), και
- (iii) λειτουργήσει επιτυχώς σε μη τέλειες συνθήκες (*non-perfect, noise-contaminated*) ή σε μη γενικές περιπτώσεις.

Ετσι, η μηχανική μετάφραση δεν μπόρεσε να εφαρμοστεί σε κείμενα γενικότερου ενδιαφέροντος και περιεχομένου λόγω της αδυναμίας εκμετάλλευσης του περιβάλλοντος κειμένου για την κατανόηση αμφίσημων λέξεων ή εκφράσεων. Παρόμοια, η επίλυση προβλημάτων δεν μπόρεσε να επεκταθεί σε γενικότερα περιβάλλοντα, ενώ το ίδιο ίσχυσε και για την αναγνώριση προτύπων σε περιπτώσεις εισαγωγής θορύβου ή εφαρμογής στρέβλωσης των πρωτοτύπων (πχ. αλλαγές κλίσης στην γραφή του γράμματος "A").

Ο κύριος λόγος αποτυχίας της συμβολικής TN είναι η αναπαράσταση της γνώσης σε δηλωτική μορφή (*declarative knowledge*) δηλαδή με τη μορφή γεγονότων και κανόνων που τα συνδέουν. Η δηλωτική μορφή έκφρασης αδυνατεί να εκφράσει τη διαδικαστική γνώση (*procedural knowledge*), άρα και την διαισθητική/καθημερινή γνώση (*commonsense knowledge*) καθώς και τη γνώση μέσα από την εμπειρία, σε μορφή κανόνων. Ετσι, το ενδιαφέρον επικεντρώθηκε σε καλά καθορισμένα και επαρκώς περιορισμένα περιβάλλοντα (π.χ. έμπειρα συστήματα), παραλείποντας το πρόβλημα της επέκτασης σε γενικότερα περιβάλλοντα.

1.5. ΣΗΜΕΡΙΝΕΣ ΔΥΝΑΤΟΤΗΤΕΣ ΤΕΧΝΗΤΗΣ ΝΟΗΜΟΣΥΝΗΣ

Επιτυχίες της TN περιλαμβάνουν:

(α) Σε θέματα καθημερινής γνώσης (για καλά καθορισμένα και περιορισμένα περιβάλλοντα, όπου οι περιορισμοί στον χώρο του προβλήματος (*problem space*) είναι γνωστοί καθώς και σαφώς διατυπωμένοι)

- Αντίληψη, πχ. όραση (ανάλυση και κατηγοριοποίηση οπτικών δεδομένων, εντοπισμός και συμπλήρωση μερικώς κρυμμένων χαρακτηριστικών, επεξεργασία εικόνων), ομιλία (κατανόηση απλής γλώσσας, απάντηση σε απλές ερωτήσεις, συνομιλία, δυνατότητα άντλησης πληροφοριών από φυσική γλώσσα). Σημειώνεται ότι αυτά επιτυγχάνονται για καλά καθορισμένα και πολύ περιορισμένα περιβάλλοντα (περιορισμοί στον χώρο του προβλήματος).
- Ρομποτική, πχ. κίνηση και δράση στο περιβάλλον, αλληλεπίδραση στα ερεθίσματα του περιβάλλοντος, χειρισμός αντικειμένων.
- Οργάνωση δράσης ώστε να επιτευχθεί ένας σκοπός.
- Σύνθεση πρωτότυπων καλλιτεχνικών δημιουργημάτων (ποιημάτων, μελωδιών, ζωγραφικής).
- Εκμάθηση μέσα από παραδείγματα καθώς και μέσα από λάθη, με αποτέλεσμα την βελτίωση της απόδοσης.

(β) Σε θέματα έμπειρης γνώσης

- Επίλυση δύσκολων προβλημάτων μαθηματικών και λογικής (λόγω της ταχύτητάς τους σε αριθμητικές πράξεις και της μεγάλης και ακριβούς μνήμης τους), πχ. ολοκληρώματα, εύρεση ριζών.
- Απόδειξη θεωρημάτων των μαθηματικών και της λογικής (πχ. απόδειξη χρωματισμού χαρτών).
- Ικανότητα νίκης με αντιπάλους ανθρώπους/πρωταθλητές σε ευρύ πεδίο πνευματικών παιχνιδιών (πχ. σκάκι).
- Εφαρμογή έμπειρων αποφάσεων, πχ. διάγνωση ασθενειών (διαγνωστική ιατρική), ανάλυση και κατασκευή πολύπλοκων κυκλωμάτων, αυτόματος έλεγχο πολύπλοκων βιομηχανικών

συστημάτων, παροχή συμβουλών (ειδικά σε μεγάλες βάσεις δεδομένων), δημιουργία νέων προϊόντων από συνδυασμούς υπαρχόντων, διάγνωση μηχανικών βλαβών (συλλογή γνώσης πολλών ειδικών).

(γ) Σε άλλα θέματα

- Ελεγχος ορθογραφίας/γραμματικής/σύνταξης κειμένων.
- Τηλε-εκπαίδευση, προσαρμοζόμενη σε μεταβαλλόμενα επίπεδα γνώσης.
- Εκτέλεση δύσκολων/βαρετών/επικίνδυνων λειτουργιών.
- Διευκόλυνση ανθρώπου σε καθημερινές λειτουργίες (πχ. μαγείρεμα, έλεγχος ποιότητας).

Κάποιες - μέχρι τώρα - αποτυχίες της ΤΝ περιλαμβάνουν την έλλειψη δυνατότητας των Η/Υ:

- ✓ Να περπατήσουν στο πάρκο και να περιγράψουν τι βλέπουν.
- ✓ Να ετοιμάσουν ένα απλό γεύμα στην κουζίνα.
- ✓ Να παίξουν ατομικά παιχνίδια, πχ. τένις.
- ✓ Να παίξουν ομαδικά παιχνίδια, πχ. ποδόσφαιρο.
- ✓ Να κάνουν τους κηπουρούς.
- ✓ Μα κυνηγήσουν έναν λαγό όπως ένας σκύλος.
- ✓ Να συζητήσουν χωρίς περιορισμούς για ένα θέμα.
- ✓ Να κατανοήσουν ένα έργο ή μια εκπομπή στην τηλεόραση.
- ✓ Να ζωγραφίσουν μία εικόνα ή μια απλή σκηνή που τους περιγράφεται.
- ✓ Να οδηγήσουν ένα αυτοκίνητο.
- ✓ Να καταλάβουν ένα ανέκδοτο.
- ✓ Να καταλάβουν το νόημα αμφίβολων εκφράσεων ή λέξεων από τα συμφραζόμενα.
- ✓ Να κατανοήσουν τι εννοεί κάποιος ακόμα και αν δεν εννοούσε ακριβώς αυτό που είπε ή αν δεν το εξέφρασε λεπτομερώς.

1.6. ΣΚΟΠΟΣ ΜΑΘΗΜΑΤΟΣ

- Θεωρία ΤΝ
- Υλοποίηση βασικών τεχνικών ΤΝ
- Εκμάθηση λογικής και κατανόηση λογικών γλωσσών προγραμματισμού

1.7. ΑΝΑΦΟΡΕΣ

1. Newell A., Shaw J.C., Simon H.A., 1956. Empirical explorations of the logic theory machine: a case study in heuristics, in *Proceedings of the Western Joint Computer Conference*, pp. 218-239. Also in **Computers and Thought** (Feigenbaum E. & Feldman J., eds.), McGraw-Hill: New York, U.S.A., 1963, pp. 134-152.
2. Newell A., Simon H., 1972. **Human Problem Solving**. Prentice-Hall: Englewood Cliffs, NJ, U.S.A.
3. Searle J.R., 1980. Minds, brains, and programs, *Behavioral and Brain Sciences*, Vol.3, pp. 417-424.
4. Turing A.M., 1950. Computing machinery and intelligence. *Mind*, Vol. LIX, pp. 433-460.



ΑΝΑΠΑΡΑΣΤΑΣΗ



2. ΑΝΑΠΑΡΑΣΤΑΣΗ ΠΡΟΒΛΗΜΑΤΟΣ

Η υλοποίηση ενός προβλήματος σε σύστημα Η/Υ που επιδεικνύει TN^4 προωθεί:

- Τη σκέψη, ειδικότερα τον τρόπο κατάλληλης περιγραφής των δεδομένων του προβλήματος (αναπαράστασης δεδομένων) καθώς και τον τρόπο συνδυασμού διάφορων πράξεων (μετασχηματισμού δεδομένων), έτσι ώστε να επιτευχθεί η ορθή καθώς και οικονομική επίλυση του προβλήματος.
- Την ακρίβεια στη σκέψη. Διανοητικά λάθη και παραλείψεις όσον αφορά στην αναπαράσταση καθώς και στον χειρισμό αποκαλύπτονται.
- Την ποσοτικοποίηση των απαιτήσεων μνήμης και πράξεων. Με την επιτυχή λειτουργία της υλοποίησης τίθενται ανώτερα όρια σε αυτές τις απαιτήσεις.
- Την διακρίβωση των απαραίτητων στοιχείων για την επίλυση. Με την αφαίρεση τμήματος των δεδομένων ελέγχεται εφόσον αυτά αποτελούν απαραίτητα στοιχεία γνώσης.

2.1. ΣΥΜΒΟΛΙΚΗ ΑΝΑΠΑΡΑΣΤΑΣΗ

Κάθε αριθμός ή κομμάτι δεδομένων αναπαριστάται στον Η/Υ με δυαδικό τρόπο. Ο χειρισμός των δεδομένων πραγματοποιείται σε αυτή τη μορφή, και η αποθήκευσή τους γίνεται σε καθορισμένες θέσεις μνήμης του Η/Υ. Σημειώνεται ότι ο Η/Υ είναι ιδιαίτερα ισχυρός (ακριβής και ταχύς) σε αριθμητικές και λογικές πράξεις.

Στα προγράμματα επεξεργασίας δεδομένων, συνήθως εκτελείται περιγραφή των δεδομένων με ανάθεση σε μεταβλητές του προγράμματος, δηλαδή μέσω της χρήσης συμβόλων τα οποία λαμβάνουν συγκεκριμένες τιμές από τη μνήμη ή/και μεταβάλλονται κατά τη διάρκεια του προγράμματος. Η συμβολική αυτή αναπαράσταση των δεδομένων της μνήμης επεκτείνεται στην TN με τη χρήση συμβόλων και συμβολικών δομών για την κωδικοποίηση των δεδομένων, των αρχικών συνθηκών καθώς και των περιορισμών του προβλήματος στον Η/Υ, με σκοπό να προγραμματιστεί η επίλυσή του προβλήματος με τεχνικές TN . Τα σύμβολα ορίζονται από τον προγραμματιστή της μεθόδου TN στον Η/Υ έτσι ώστε η αναπαράσταση του προβλήματος στις συμβολικές δομές (καταστάσεις) να έχει τα εξής χαρακτηριστικά:

- Γενικότητα και πληρότητα, δηλαδή να επιτρέπει την επίλυση όλων των παραδειγμάτων του προβλήματος με την ίδια τεχνική, ανεξαρτήτως μεγέθους προβλήματος.
- Απλότητα και αφαίρεση, ώστε να αναδεικνύει τα σημαντικά χαρακτηριστικά του προβλήματος και να αποκρύπτει τα μη σημαντικά. Ετσι, πλήθος καταστάσεων το οποίο εκφράζεται από τα ίδια σημαντικά χαρακτηριστικά αναπαριστάται από την ίδια συμβολική δομή (οικονομία χώρου και χρόνου επεξεργασίας, π.χ. για ενημέρωση καταστάσεων).

Ετσι η αναπαράσταση είναι κρίσιμη προκειμένου να αναδειχθούν τα στοιχεία τα οποία αποτελούν τα κλειδιά για την επίλυση του προβλήματος, ενώ αντίθετα να κρυφτούν/παραλειφθούν αυτά τα οποία δεν έχουν σχέση με την επίλυση. Και τα δύο προωθούν τον καλό ορισμό του χώρου του προβλήματος.

Κατά την υλοποίηση της μεθόδου TN εκτελείται τυπική διαχείριση συμβόλων. Ετσι, ενώ η έννοια των συμβόλων αποδίδεται κατά την έκφραση/περιγραφή του προς επίλυση προβλήματος, τα σύμβολα δεν έχουν έννοια οπότε η επίλυση και τα ενδιάμεσα εξαγόμενα συμπεράσματα ανάγονται στον χειρισμό των συμβόλων που αναπαριστούν το πρόβλημα.

2.2. ΕΠΙΛΟΓΗ ΣΥΜΒΟΛΙΚΗΣ ΑΝΑΠΑΡΑΣΤΑΣΗΣ

Η επιλογή της αναπαράστασης στον Η/Υ, δηλαδή η επιλογή συμβόλων και συμβολικών δομών για την κωδικοποίηση του προβλήματος (επιθυμητής λύσης, δεδομένων και περιορισμών) στο πρόγραμμα με τεχνικές TN καθορίζει σε ένα μεγάλο βαθμό όχι μόνο τον τρόπο επίλυσης αλλά και την αποδοτικότητα (ταχύτητα, οικονομία μνήμης και ποσοστό επιτυχίας) της.

Ενα παράδειγμα της σημασίας της αναπαράστασης παρουσιάζεται στον τομέα της αναγνώρισης προτύπων, συγκεκριμένα στο πρόβλημα αναγνώρισης χαρακτήρων (*optical character recognition*) και

⁴ Υπενθυμίζεται ότι η προσομοίωση της ευφυίας είναι διαφορετικό από την ίδια την ευφυία.

ιδιαίτερα στο πρόβλημα του εάν οι εισαγόμενοι χαρακτήρες κατατάσσονται σε ένα από τα 10 ψηφία (0, 1, 2, 3, 4, 5, 6, 7, 8, 9).

2.2.1. Πρώτη αναπαράσταση και TN

Αναπαράσταση. Η επιφάνεια στην οποία βρίσκεται κάθε χαρακτήρας προς αναγνώριση (ως ψηφίο - και αν ναι ποιο - ή μη-ψηφίο) διαχωρίζεται σε ένα πλέγμα 36 τετραγώνων τοποθετημένων σε 6 γραμμές και σε 6 στήλες, όπου κάθε τετράγωνο είναι είτε λευκό είτε μαύρο (δυαδική αναπαράσταση σε πίνακα 6x6). Οι χαρακτήρες προς αναγνώριση αναπαριστώνται αποκλειστικά από τα μαύρα τετράγωνα, με άλλα λόγια τα 10 ψηφία αποτελούν κατάλληλους συνδυασμούς μαύρων τετραγώνων. Αρα, με αυτή την αναπαράσταση, τα σύμβολα αποτελούν τα λευκά/μαύρα τετράγωνα, ενώ οι συμβολικές δομές αποτελούν συνδυασμούς μαύρων τετραγώνων στο πλέγμα. Ο χώρος του προβλήματος αποτελείται από 2^{36} συμβολικές δομές του (δυνατοί συνδυασμοί λευκών/μαύρων τετραγώνων)⁵.

TN (αναγνώριση βάσει προτύπων, *template matching*). Αποθήκευση όλων των δυνατών (2^{36}) συμβολικών δομών μαζί με το εάν η καθεμία αντιστοιχεί σε ψηφίο ή όχι.

Επίλυση. Αναζήτηση της συμβολικής δομής που ταυτίζεται με τον εισαγόμενο προς αναγνώριση χαρακτήρα (ταύτιση λευκών και μαύρων τετραγώνων) και έξοδος του αν η αποθηκευμένη κατάσταση αποτελεί ψηφίο ή όχι και εάν ναι ποιο.

Πλεονεκτήματα. Η αναπαράσταση της επιφάνειας με τον χαρακτήρα σε πλέγμα 36 λευκών/μαύρων τετραγώνων είναι εύκολη. Μπορούν να αναπαρασταθούν διαφορετικοί τρόποι γραφής του κάθε ψηφίου. Δίνεται πάντοτε απάντηση για το εάν ο εισαχθείς χαρακτήρας αποτελεί ψηφίο ή όχι. Επιπλέον, η απάντηση είναι σίγουρα ορθή.

Μειονεκτήματα. Ψηλές απαιτήσεις μνήμης (για την αποθήκευση των 2^{36} καταστάσεων) και προ-επεξεργασίας (για τον έλεγχο του εάν η κάθε κατάσταση αναπαριστά ψηφίο και εάν ναι ποιο). Επίσης, χρονοβόρα απόφαση για το εάν ένας εισαχθείς χαρακτήρας αποτελεί ψηφίο ή όχι (αναζήτηση δομής που ταυτίζεται με τον χαρακτήρα, μέγιστο 2^{36} συγκρίσεις 36 ζευγών λευκών/μαύρων τετραγώνων). Τέλος, ο συνδυασμός αναπαράστασης-επίλυσης εμπεριέχει σημαντική εξάρτηση της πολυπλοκότητας (αριθμού αποθηκευμένων συμβολικών δομών, αναζήτηση κατάλληλης συμβολικής δομής κλπ.) από το επιλεγμένο μέγεθος του πλέγματος.

2.2.2. Δεύτερη αναπαράσταση και TN

Αναπαράσταση. Ιδια με αυτήν της παραγράφου 2.2.1.

TN (αναγνώριση βάσει περιορισμένων προτύπων με επιπλέον κριτήρια ομοιότητας, *similarity matching*). Αποθήκευση 10 συμβολικών δομών οι οποίες αντιστοιχούν στα 10 ψηφία.

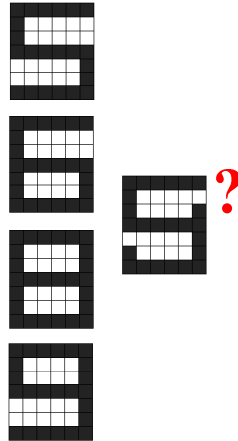
Επίλυση. Αναζήτηση της αποθηκευμένης συμβολικής δομής που είτε ταυτίζεται είτε μοιάζει επαρκώς με τον χαρακτήρα (ταύτιση ή επαρκής ομοιότητα λευκών και μαύρων τετραγώνων). Εάν υπάρχει τέτοια συμβολική δομή έξοδος του αντίστοιχου ψηφίου, αλλιώς έξοδος ότι ο εισαχθείς χαρακτήρας δεν αποτελεί ψηφίο.

Πλεονεκτήματα. Η αναπαράσταση της επιφάνειας με τον χαρακτήρα σε πλέγμα 36 λευκών/μαύρων τετραγώνων είναι εύκολη. Χαμηλές απαιτήσεις μνήμης (για την αποθήκευση 10 μόνο καταστάσεων) και προ-επεξεργασίας (για τον ορισμό του εάν η κάθε κατάσταση αναπαριστά ψηφίο και εάν ναι ποιο). Σχετικά γρήγορη απόφαση για το εάν ένας εισαχθείς χαρακτήρας αποτελεί ψηφίο ή όχι (αναζήτηση δομής με μεγαλύτερη ομοιότητα με τον χαρακτήρα και εξέταση του αν αυτή η ομοιότητα είναι επαρκής).

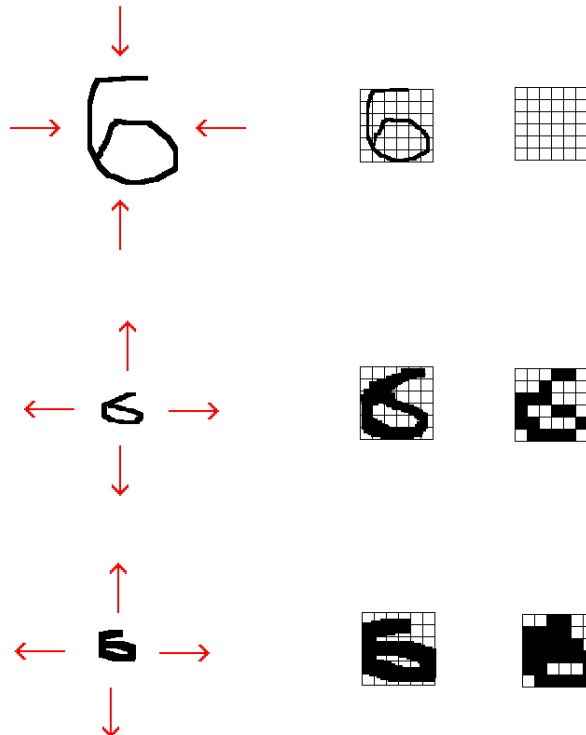
Μειονεκτήματα. Αν και με αυτόν το συνδυασμό αναπαράστασης-επίλυσης παρατηρείται ασθενής εξάρτηση της πολυπλοκότητας από το μέγεθος του πλέγματος, η απάντηση δεν είναι πάντα ορθή και εξαρτάται στενά από την επιλογή ομοιότητας (που με τη σειρά της εξαρτάται από το επιλεγμένο μέγεθος του πλέγματος). Έτσι, το ψηφίο με την μεγαλύτερη ομοιότητα με τον εισαχθέντα χαρακτήρα δεν

⁵ Σημειώνεται ότι με αυτόν τον τρόπο αναπαράστασης είναι δυνατό να υπάρχει άλλος αριθμός τετραγώνων στο πλέγμα, άλλη μορφή πλέγματος, τετράγωνα άλλου χρώματος (π.χ. γκριζα) κλπ. Η προσαρμογή του πλέγματος στο μέγεθος της επιφάνειας όπου γράφεται το ψηφίο επηρεάζει την ακρίβεια της δυαδικής περιγραφής.

αποτελεί πάντα το σωστό ψηφίο, ενώ είναι δυνατόν ένας χαρακτήρας που δεν αντιστοιχεί σε ψηφίο να αποδίδεται σε αυτό λόγω επαρκούς ομοιότητας (**Σχήμα 1**) καθώς και ένας χαρακτήρας που αντιστοιχεί σε ψηφίο να μην αποδίδεται σε αυτό λόγω μη επαρκούς ομοιότητας. Λόγω αυτών των προβλημάτων, είναι απαραίτητο κατά την προ-επεξεργασία να οριστούν οι έννοιες ομοιότητα, επαρκής ομοιότητα καθώς και σύγκριση ομοιότητας. Τέλος, δεν δίνεται τρόπος αναπαράστασης διαφορετικών τρόπων γραφής του ίδιου ψηφίου.



Σχήμα 1. Περιγραφή ψηφίων μέσω πρώτης/δεύτερης αναπαράστασης.



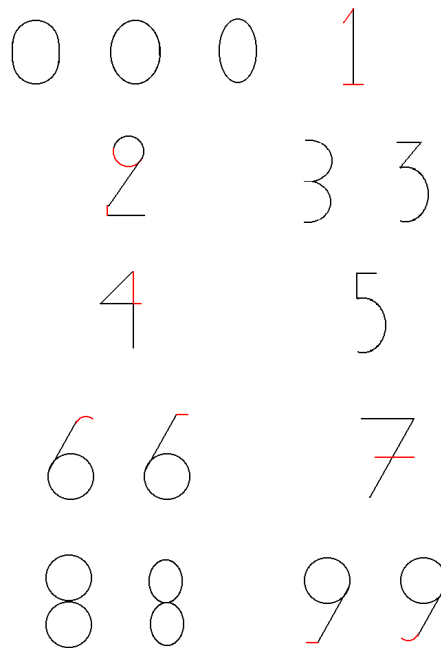
Σχήμα 2. Αναγκαστική παραμόρφωση εισαγόμενου χαρακτήρα για δυαδική αναπαράσταση στο πλέγμα.

Τα παραπάνω παραδείγματα περιγράφουν ιδανικές συνθήκες, δηλαδή ψηφία συγκεκριμένου πάχους γραφής εφαρμοζόμενα ακριβώς στο πλέγμα. Ετσι δεν καλύπτεται η αναγνώριση ψηφίων που γράφονται: (α) με διάφορα πάχη γραφής ή/και με διαφορετικές διαστάσεις από το πλέγμα (**Σχήμα 2**), (β) σε κεκλιμένη γραμμή ή/και με κλίση του γραφικού χαρακτήρα (**Σχήμα 3**). Τέτοια ψηφία δεν μπορούν να εισαχθούν άμεσα στο πλέγμα, οπότε απαιτείται αύξηση/μείωση πλάτους ή/και ύψους (όχι

αναγκαστικά ενιαία στις δύο διαστάσεις), καθώς και στρέβλωση ή και περιστροφή τους προκειμένου να εφαρμοστούν στο πλέγμα. Τέτοιοι μετασχηματισμοί έχουν ως αποτέλεσμα την παραμόρφωση του αρχικού χαρακτήρα ώστε αυτός να μπορεί να αναλυθεί από τις παραπάνω τεχνικές TN αναγνώρισης χαρακτήρων. Στο **Σχήμα 2** τονίζεται η σημασία που έχει η σχέση πάχους γραφής και μεγέθους χαρακτήρα για την δυαδική αναπαράσταση του χαρακτήρα στο πλέγμα. Αυτή είναι ιδιαίτερα μεγάλη για μικρά μεγέθη πλέγματος, οπότε παρατηρείται συμπίκνωση της πληροφορίας (δεν αποδίδονται λεπτομέρειες).



Σχήμα 3. Διόρθωση κλίσης γραμμής και γραφικού χαρακτήρα.



Σχήμα 4. Περιγραφή ψηφίων μέσω τρίτης αναπαράστασης.



Σχήμα 5. Τα δείγματα αυτά είναι δεκτά ως 8 ή όχι;

2.2.3. Τρίτη αναπαράσταση και TN

Αναπαράσταση. Τα ψηφία περιγράφονται με γραμμές (ευθείες, καμπύλες ή κύκλους διαφορετικών μεγεθών και με διάφορους προσανατολισμούς) και το πώς αυτές συνδυάζονται. Αρα τα σύμβολα

αποτελούν οι γραμμές, ενώ οι αποθηκευμένες συμβολικές δομές αποτελούν τους συνδυασμούς γραμμών⁶ που περιγράφουν τα 10 ψηφία (**Σχήμα 4**).

TN (συντακτική περιγραφή, *syntactic matching*). Αποθήκευση 10 συμβολικών δομών που αντιστοιχούν σε ψηφία, με τον χαρακτηρισμό των προαιρετικών γραμμών.

Επίλυση. Περιγραφή του εισαγόμενου χαρακτήρα προς αναγνώριση μέσω των υπαρχόντων συμβόλων και της σχέσης τους. Σύγκριση (συντακτική) του εισαγόμενου χαρακτήρα με τα 10 ψηφία όσον αφορά στις γραμμές τους καθώς και στον συνδυασμό των γραμμών. Αναζήτηση της συμβολικής δομής της οποίας οι γραμμές και η σχέση μεταξύ τους ταυτίζεται ή μοιάζει επαρκώς με τον εισαχθέντα χαρακτήρα. Εξοδος του αν η αποθηκευμένη κατάσταση αποτελεί ψηφίο ή όχι και εάν ναι ποιο.

Πλεονεκτήματα. Η αναπαράσταση είναι ανεξάρτητη του μεγέθους χαρακτήρα, του πάχους γραφής, καθώς και της κλίσης της γραμμής και του γραφικού χαρακτήρα, ενώ επιπλέον επιτρέπει διαφορετικές γραφές του κάθε ψηφίου. Οι απαιτήσεις μνήμης και προ-επεξεργασίας δεν είναι υψηλές, η απόφαση για το εάν ένας εισαχθείς χαρακτήρας αποτελεί ψηφίο ή όχι δεν είναι ιδιαίτερα χρονοβόρος, ενώ η απάντηση είναι συνήθως ορθή. Επιπλέον, ο ορισμός ομοιότητας, επαρκούς ομοιότητας και σύγκρισης ομοιότητας είναι σχετικά απλός.

Μειονεκτήματα. Η αναπαράσταση είναι πιο πολύπλοκη από αυτή του πλέγματος και προϋποθέτει την κατάλληλη επιλογή συμβόλων και σχέσης τους (**Σχήμα 5**). Επίσης, είναι απαραίτητο ένα στάδιο προ-επεξεργασίας του εισαχθέντος χαρακτήρα σε σύνολο γραμμών και συνδυασμού τους.

Από τα προηγούμενα φανερώνονται τα εξής:

- Η αναπαράσταση του προβλήματος αποτελεί το κλειδί για την επίλυσή του.
- Η επιλογή αναπαράστασης του προβλήματος αλληλεπιδρά με τον τρόπο επίλυσης (επιλογή τεχνικής TN).

2.3. ΧΕΙΡΙΣΜΟΣ ΣΥΜΒΟΛΙΚΗΣ ΑΝΑΠΑΡΑΣΤΑΣΗΣ - ΛΟΓΙΚΗ

Τα δεδομένα καθώς και η γνώση ενός προβλήματος απαρτίζουν γεγονότα (*facts*), δηλαδή το τι ισχύει και τι όχι στον χώρο του προβλήματος. Τα γεγονότα εκφράζονται μέσω δηλωτικών προτάσεων (*declarative sentences*) και αναπαριστώνται μέσω μεταβλητών. Για παράδειγμα, το γεγονός ότι η θερμοκρασία έξω είναι 0° εκφράζεται μέσω της δηλωτικής πρότασης "Κάνει κρύο" και αναπαριστάται μέσω της μεταβλητής **KPYO** ή - απλούστερα - ως **x**. Καθότι η αναπαράσταση στον H/Y πραγματοποιείται σε δυαδική μορφή (1 για αληθές γεγονός, 0 για ψευδές γεγονός), χρησιμοποιείται η δυαδική λογική (Boolean) για την αναπαράσταση και τον χειρισμό των γεγονότων, προτάσεων και αντίστοιχων μεταβλητών. Έτσι η μεταβλητή **x** λαμβάνει τιμή 1 ή 0 ανάλογα με την απάντηση ψευδές ή αληθές, αντίστοιχα, στο ερώτημα "Είναι αλήθεια ότι **x**"; Για παράδειγμα, για θερμοκρασία έξω -10° η μεταβλητή **x** παίρνει την τιμή 1, ενώ για θερμοκρασία έξω +40° η μεταβλητή **x** παίρνει την τιμή 0.

Τα γεγονότα (και οι αντίστοιχες προτάσεις και μεταβλητές) είναι δυνατόν να συνδυαστούν. Οι συνδυασμοί γεγονότων αποτελούν εκφράσεις. Η λογική (Hodges, 1977) αποτελεί τη μελέτη συνεπών συνόλων γεγονότων ή συνδυασμών τους (δηλαδή εκφράσεων). Επικεντρώνεται στην αλήθεια και την συμπερασματική διαδικασία (*inference*), με άλλα λόγια στην εύρεση των προϋποθέσεων (τιμές 1 ή 0 των γεγονότων) κάτω από τις οποίες ένα σύνολο γεγονότων ή μία έκφραση είναι αληθή.

2.3.1. Προτασιακή λογική (*propositional logic*)

Είναι η λογική την οποία χρησιμοποιούν οι H/Y. Δεδομένης μίας έκφρασης (ως συνδυασμός δεδομένων), εξάγεται ένα αποτέλεσμα το οποίο εκφράζει την αληθή/ψευδή κατάσταση της έκφρασης (1 για αληθή κατάσταση, 0 για ψευδή κατάσταση). Ο πίνακας αληθείας είναι το σύνηθες εργαλείο προκειμένου να εξαχθεί η αλήθεια ή όχι μίας έκφρασης: ο συνδυασμός τιμών των εμπλεκόμενων λογικών μεταβλητών εφαρμόζεται εξαντλητικά και η εφαρμογή των τελεστών της έκφρασης για κάθε συνδυασμό δημιουργεί ένα αληθές ή ψευδές αποτέλεσμα. Οι πίνακες αληθείας εκφράσεων που απορρέουν από την χρήση μίας ή δύο μεταβλητών σε συνδυασμό με τους κυριότερους λογικούς τελεστές φαίνονται στον **Πίνακα 1**, ενώ

⁶ Μερικές εκ των οποίων μπορεί να είναι προαιρετικές.

κάποιες βασικές ιδιότητες των τελεστών αυτών παρατίθενται στον **Πίνακα 2**. Για τον συνδυασμό περισσοτέρων από δύο λογικών μεταβλητών χρησιμοποιούνται παρενθέσεις, οι οποίες καθορίζουν την προτεραιότητα εφαρμογής των λογικών πράξεων. Σημειώνεται ότι αν δεν χρησιμοποιηθούν παρενθέσεις μεγαλύτερη προτεραιότητα έχει ο τελεστής $\neg$, μετά οι τελεστές $\vee$ και $\wedge$, και τέλος οι τελεστές $\rightarrow$ και $\leftrightarrow$. Ετσι, η προτασιακή λογική επιτρέπει την εύκολη και σαφή έκφραση σχέσεων λογικών μεταβλητών, όπου το αποτέλεσμα ανάγεται πάντα σε μία ακολουθία τελεστών $\neg$, $\vee$ και $\wedge$ (βασική μορφή συνδυασμού λογικών μεταβλητών). Πέραν αυτής της βασικής μορφής, υπάρχουν και δύο κανονικές μορφές συνδυασμού λογικών μεταβλητών:

- ± η κανονική μορφή ενώσεων (*normal disjunctive form*), η οποία έχει τη μορφή $(x_1 \wedge x_2 \wedge \dots \wedge x_n) \vee (x_1 \wedge x_2 \wedge \dots \wedge x_m) \vee \dots \vee (x_1 \wedge x_2 \wedge \dots \wedge x_k)$, και
- ± η κανονική μορφή τομών (*normal conjunctive form*), η οποία έχει τη μορφή $(x_1 \vee x_2 \vee \dots \vee x_n) \wedge (x_1 \vee x_2 \vee \dots \vee x_m) \wedge \dots \wedge (x_1 \vee x_2 \vee \dots \vee x_k)$,

Μεταβλητή x	ΑΡΝΗΣΗ (όχι x , δεν, <i>not</i>) $\neg x$ $\neg x$
1	0
0	1

Μεταβλητή x	Μεταβλητή y	ΕΝΩΣΗ (x ή y , <i>or</i>) $x \vee y$ $x \vee y$
1	1	1
1	0	1
0	1	1
0	0	0

Μεταβλητή x	Μεταβλητή y	ΤΟΜΗ (x και y , <i>and</i>) $x \wedge y$ $x \wedge y$
1	1	1
1	0	0
0	1	0
0	0	0

Μεταβλητή x	Μεταβλητή y	ΕΠΑΓΩΓΗ (εάν x τότε y , <i>if then</i>) $x \rightarrow y$ ($\neg x \vee y$)
1	1	1
1	0	0
0	1	1
0	0	1

Μεταβλητή x	Μεταβλητή y	ΔΙΠΛΗ ΕΠΑΓΩΓΗ (εάν και μόνο εάν x τότε y , <i>iff then</i>) $x \leftrightarrow y$
1	1	1
1	0	0
0	1	0
0	0	1

Πίνακας 1. Πίνακες αληθείας της προτασιακής λογικής για τους κυριότερους λογικούς τελεστές εφαρμοσμένους στις λογικές μεταβλητές x και y .

όπου η κάθε μία από τις μεταβλητές x_i ($i=1,2,\dots,n$) αναπαριστά είτε τη μεταβλητή x_i είτε την μεταβλητή $\neg x_i$. Σημειώνεται ότι η κανονική μορφή τομών είναι η καθιερωμένη μορφή στην οποία ανάγονται όλες οι εκφράσεις της προτασιακής λογικής προκειμένου να βρεθεί ο πίνακας αληθείας τους καθώς και να εξαχθούν οι συνδυασμοί των τιμών των μεταβλητών που τις καθιστούν αληθείς⁷.

ΙΔΙΟΤΗΤΑ	ΤΑΥΤΟΤΗΤΑ
Συμμετρική	xVy
	yVx
Μεταβατική	$x\Delta y$
	$y\Delta x$
Επιμεριστική	$(xVy)Vz$
	$xV(yVz)$
De Morgan	$(x\Delta y)\Delta z$
	$x\Delta(y\Delta z)$
Εξουδετέρωση	$xV(y\Delta z)$
	$(x\Delta y)V(x\Delta z)$
De Morgan	$\neg(xVy)$
	$(\neg x)\Delta(\neg y)$
De Morgan	$\neg(x\Delta y)$
	$(\neg x)V(\neg y)$
Εξουδετέρωση	$\neg\neg x$
	x

Πίνακας 2. Βασικές ιδιότητες λογικών τελεστών για τις λογικές μεταβλητές x, y και z .

Με την προτασιακή λογική είναι δυνατό να εκφραστούν γεγονότα (δηλωτικές προτάσεις) όπως "(Κάνει) κρύο" (ΚΡΥΟ) ή "Εάν (κάνει) κρύο τότε δεν (κάνει) ζέστη" (ΚΡΥΟ $\rightarrow$ $\neg$ ΖΕΣΤΗ)⁸ καθώς και συνδυασμοί τους. Δεδομένου ενός συνδυασμού προτάσεων (ή μεταβλητών) της προτασιακής λογικής, είναι δυνατόν να ελεγχθεί η αλήθεια ή όχι των συνδυασμών τους. Ενα παράδειγμα αποτελεί η αλήθεια ή όχι της έκφρασης "Εάν διψάω τότε και θέλω να πιω κάτι δροσερό και δεν θέλω να φάω κάτι αλμυρό", δηλαδή της έκφρασης $p \rightarrow (q \Delta \neg r)$ όπου p ="Διψάω", q ="Θέλω να πιω κάτι δροσερό", r ="Θέλω να φάω κάτι αλμυρό". Ο Πίνακας 3(α) δείχνει την αναγωγή της έκφρασης $p \rightarrow (q \Delta \neg r)$ στην κανονική μορφή τομών καθώς και τον αντίστοιχο πίνακα αληθείας, ενώ ο Πίνακας 3(β) δείχνει την αναγωγή της έκφρασης $p \rightarrow (q \Delta \neg r)$ στην κανονική μορφή ενώσεων καθώς και τον αντίστοιχο πίνακα αληθείας. Όπως αναμένεται, οι δύο πίνακες αληθείας ταυτίζονται. Και στους δύο Πίνακες 3(α) και 3(β), οι δεξιάς στήλες έχουν χρωματιστεί ανάλογα με τη σειρά εκτέλεσης των λογικών πράξεων (πιο έντονα χρωματισμένες στήλες για μικρότερη προτεραιότητα εκτέλεσης). Επιπλέον, όσον αφορά στις αριστερές στήλες των Πινάκων 3(α) και 3(β), οι γραμμές οι οποίες εκφράζουν τις τιμές των μεταβλητών που καθιστούν την έκφραση αληθή έχουν χρωματιστεί.

Στην προτασιακή λογική είναι δυνατή και η συμπερασματική διαδικασία. Με άλλα λόγια, δεδομένου ενός συνόλου προτάσεων (ή μεταβλητών) της προτασιακής λογικής, είναι δυνατόν να ελεγχθεί η αλήθεια ενός άλλου συνόλου προτάσεων (ή μεταβλητών). Η συμπερασματική διαδικασία είναι δυνατή μέσω διαφορετικών τεχνικών, οι σημαντικότερες από τις οποίες είναι οι εξής:

- Επαγωγή (*modus ponens*). Εάν $x \rightarrow y$ και x αληθές (1), τότε y αληθές (1).
- Απαγωγή σε άτοπο (*modus tolens*). Εάν $x \rightarrow y$ και y ψευδές (0), τότε x ψευδές (0).
- Επίλυση/εξομάλυνση (*resolution*). Εάν xVy και $\neg yVz$, τότε xVz .

Ενα παράδειγμα συμπερασματικής διαδικασίας φαίνεται στο παρακάτω πρόβλημα που εκφράζεται ως: "Εάν το χώμα είναι κατάλληλο για την καλλιέργεια καρότων, τότε είναι βαθύ, αμμώδες και δεν περιέχει πέτρες. Το χώμα δεν είναι κατάλληλο για την καλλιέργεια φασολιών εάν είναι είτε αμμώδες είτε αργιλώδες. Αρα, το χώμα δεν είναι κατάλληλο και για την καλλιέργεια καρότων και για την καλλιέργεια φασολιών". Το πρόβλημα αυτό αναλύεται σε εκφράσεις οι οποίες αναπαριστούν:

(α) γεγονότα/δεδομένα:

"Εάν το χώμα είναι κατάλληλο για την καλλιέργεια καρότων, τότε είναι βαθύ, αμμώδες και δεν περιέχει πέτρες. "

⁷ Η επιλογή μορφής της έκφρασης εξαρτάται από τη φύση του προβλήματος, δηλαδή εάν είναι πιο εύκολο να διαπιστωθεί η αλήθεια μίας τομής μεταβλητών (οπότε χρησιμοποιείται η κανονική μορφή ενώσεων) ή η αλήθεια μίας μεταβλητής από κάθε ένωση μεταβλητών (οπότε χρησιμοποιείται η κανονική μορφή τομών).

⁸ Τα οποία λαμβάνουν τιμές +1 ή 0 ανάλογα με το αν ισχύουν ή όχι.

"Το χώμα δεν είναι κατάλληλο για την καλλιέργεια φασολιών εάν είναι είτε αμμώδες είτε αργιλώδες."
(β) συμπέρασμα:

"Το χώμα δεν είναι κατάλληλο και για την καλλιέργεια καρότων και για την καλλιέργεια φασολιών."
Ο χώρος του προβλήματος απαρτίζεται από τις παρακάτω προτάσεις:

p ="Το χώμα είναι κατάλληλο για την καλλιέργεια καρότων"

q ="Το χώμα είναι κατάλληλο για την καλλιέργεια φασολιών"

r ="Το χώμα είναι βαθύ και δεν περιέχει πέτρες"⁹

s ="Το χώμα είναι αργιλώδες"

t ="Το χώμα είναι αμμώδες"

$$p \circ (q \wedge \neg r) \circ \neg p \vee (q \wedge \neg r) \circ (\neg p \vee q) \wedge (\neg p \vee \neg r)$$

p	q	r	($\neg p$	V	q)	$\wedge$	($\neg p$	V	$\neg r$)
1	1	1	0	1	1	0	0	0	0
1	1	0	0	1	1	1	0	1	1
1	0	1	0	0	0	0	0	0	0
1	0	0	0	0	0	0	0	1	1
0	1	1	1	1	1	1	1	1	0
0	1	0	1	1	1	1	1	1	1
0	0	1	1	1	0	1	1	1	0
0	0	0	1	1	0	1	1	1	1

(α)

$$p \circ (q \wedge \neg r) \circ \neg p \vee (q \wedge \neg r) \circ (\neg p \vee q) \wedge (\neg p \wedge \neg r) \circ \neg(\neg p \vee q) \wedge (\neg p \wedge \neg r) \circ \neg(\neg p \vee q) \vee \neg(\neg p \wedge \neg r) \circ \neg(p \wedge \neg q) \vee (p \wedge r)$$

p	q	r	$\neg(p \wedge \neg q) \vee (p \wedge r)$
1	1	1	0
1	1	0	1
1	0	1	0
1	0	0	0
0	1	1	0
0	1	0	0
0	0	1	1
0	0	0	1

(β)

Πίνακας 3. Έλεγχος αληθείας της έκφρασης $p \circ (q \wedge \neg r)$.

Τα γεγονότα αναπαριστώνται στην προτασιακή λογική μέσω των εκφράσεων

$$p \circ (r \wedge t) \circ \neg p \vee (r \wedge t) \circ (\neg p \vee r) \wedge (\neg p \vee t)$$

$$(s \vee t) \circ \neg q \circ \neg(s \vee t) \vee \neg q \circ (\neg s \wedge \neg t) \vee \neg q \circ (\neg s \vee \neg q) \wedge (\neg t \vee \neg q)$$

ενώ το συμπέρασμα αναπαριστάται μέσω της έκφρασης

$$\neg(p \wedge q) \circ \neg p \vee \neg q$$

Είναι φανερό ότι η χρήση πινάκων αληθείας (βλ. Πίνακα 4) δεν είναι αποδοτική για εκφράσεις που εμπεριέχουν πολλές μεταβλητές. μια και χρειάζεται να ελεγχθούν 2^n συνδυασμοί τιμών για κάθε έκφραση του προβλήματος (όπου n ο αριθμός των μεταβλητών). Επιπλέον, είναι απαραίτητη η σύγκριση των αποτελεσμάτων για όλες τις εκφράσεις του προβλήματος προκειμένου να διαπιστωθεί εάν υπάρχουν συνδυασμοί τιμών των μεταβλητών που καθιστούν όλες τις εκφράσεις αληθείς. Όπως και στον Πίνακα

⁹ Η πρόταση r αποτελείται από τις προτάσεις v ="Το χώμα είναι βαθύ" και w ="Το χώμα δεν περιέχει πέτρες", οι οποίες όμως απαντώνται πάντα μαζί στα γεγονότα και στο συμπέρασμα του προβλήματος. Συνεπώς, για οικονομία μνήμης καθώς και για απλότητα αναπαράστασης, εκφράζονται μαζί μέσω της πρότασης r .

3, οι δεξιές στήλες έχουν χρωματιστεί ανάλογα με τη σειρά εκτέλεσης των λογικών πράξεων (πιο έντονα χρωματισμένες στήλες για μικρότερη προτεραιότητα εκτέλεσης), ενώ οι γραμμές των αριστερών στηλών οι οποίες εκφράζουν τις τιμές των μεταβλητών που καθιστούν όλες τις εκφράσεις (γεγονότων/δεδομένων και συμπεράσματος) αληθείς έχουν χρωματιστεί.

p	q	r	s	t	$(\emptyset p \vee r)$	$\wedge$	$(\emptyset p \vee t)$	$(\emptyset s \vee \emptyset q)$	$\wedge$	$(\emptyset t \vee \emptyset q)$	$\emptyset p \vee \emptyset q$
1	1	1	1	1	0	1	1	1	0	0	0
1	1	1	1	0	0	1	1	0	0	0	0
1	1	1	c	1	0	1	1	1	1	0	0
1	1	1	0	0	0	1	1	0	0	0	0
1	1	0	1	1	0	0	0	0	0	0	0
1	1	0	1	0	0	0	0	0	0	0	0
1	1	0	0	1	0	0	0	0	0	0	0
1	1	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
1	1	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
1	0	1	1	1	0	1	1	0	1	1	0
1	0	1	1	0	0	1	1	0	1	1	0
1	0	1	0	1	0	1	1	1	1	1	0
1	0	1	0	0	0	1	1	0	1	1	0
1	0	0	1	1	0	0	0	0	1	1	0
1	0	0	1	0	0	0	0	0	1	1	0
1	0	0	0	1	0	0	0	0	1	1	0
1	0	0	0	0	0	0	0	0	1	1	0
0	1	1	1	1	1	1	1	0	0	0	0
0	1	1	1	0	1	1	1	0	0	0	0
0	1	1	0	1	1	1	1	1	1	0	0
0	1	1	0	0	1	1	1	0	0	0	0
0	1	0	1	1	1	1	0	1	1	0	1
0	1	0	1	0	1	1	0	0	0	0	0
0	1	0	0	1	1	1	0	0	0	0	0
0	1	0	0	0	1	1	0	1	1	0	1
0	0	1	1	1	1	1	1	0	1	1	1
0	0	1	1	0	1	1	1	1	1	1	1
0	0	1	0	0	1	1	0	1	1	1	1
0	0	0	1	1	1	1	1	0	1	1	1
0	0	0	1	0	1	1	0	0	1	1	1
0	0	0	0	1	1	1	0	1	1	1	1
0	0	0	0	0	1	1	0	1	1	1	1
0	0	0	0	0	1	1	0	1	1	1	1

Πίνακας 4. Πίνακας αληθείας προτάσεων προβλήματος.

Είναι λοιπόν προτιμότερη η χρήση κάποιας συμπερασματικής διαδικασίας προκειμένου να επαληθευτεί ή να απορριφθεί το συμπέρασμα. Για παράδειγμα, η απαγωγή σε άτοπο υποθέτει ότι δεν ισχύει το συμπέρασμα $\emptyset(p \wedge q)$, άρα ότι ισχύει η έκφραση $p \wedge q$. Τότε όμως η έκφραση $(\emptyset p \vee r) \wedge (\emptyset p \vee t)$ ικανοποιείται μόνο εάν η έκφραση $r \wedge t$ είναι αληθής. Σε αυτή την περίπτωση όμως, το δεύτερο μέλος (άρα και ολόκληρη η έκφραση) $(\emptyset s \vee \emptyset q) \wedge (\emptyset t \vee \emptyset q)$ δεν ικανοποιείται, άρα και οι δύο εκφράσεις των γεγονότων του προβλήματος είναι αναγκαστικά ψευδείς. Κάτι τέτοιο όμως δεν ισχύει, οπότε συμπεραίνεται ότι το συμπέρασμα είναι αληθές.

2.3.2. Κατηγορική λογική (predicate logic)

Το ότι εκφράσεις της μορφής "Ο Γιώργος είναι άνθρωπος", "Η γάτα έχει τέσσερα πόδια", "Η Ελένη αγαπά το παγωτό" και "Η Ελένη τρώει το παγωτό" ή "Η Ελένη έφαγε τρία παγωτά" αναπαριστώνται στην προτασιακή λογική μόνο ως αδιαίρετες έννοιες συνεπάγεται ότι προτάσεις οι οποίες είναι φανερό ότι είναι ασύμβατες δεν μπορούν να ανιχνευτούν ως τέτοιες, πχ. οι εκφράσεις "Κάνει κρύο" και "Κάνει

ζέστη". Επίσης εκφράσεις της μορφής "Όλοι οι άνθρωποι έχουν δύο πόδια" μπορούν να εκφραστούν μόνο ως σύνολο προτάσεων που αφορούν σε κάθε μεταβλητή-άνθρωπο του χώρου του προβλήματος ξεχωριστά, πχ. "Ο Γιώργος έχει δύο πόδια", "Η Ελένη έχει δύο πόδια" κλπ.

Η κατηγορική λογική επιτρέπει την πιο δομημένη και κατανοητή έκφραση γεγονότων (ακόμη και αρκετά περίπλοκων) καθώς και την (συμπερασματική) παραγωγή νέων γεγονότων που απορρέουν από υπάρχοντα γεγονότα. Για το σκοπό αυτό έχει καλά ορισμένη σύνταξη και συγκεκριμένους κανόνες παραγωγής. Η σύνταξη εκφράσεων της κατηγορικής λογικής στηρίζεται στους όρους και τα κατηγορήματα.

- Ο όρος (*term*) αποτελεί είτε μία σταθερά (αδιάσπαστο γεγονός του χώρου του προβλήματος, *object*), είτε μία μεταβλητή (*variable*) η οποία λαμβάνει τιμές μέσα από κάποιο σύνολο σταθερών.
- Το κατηγορήμα (*predicate*) εκφράζει κάποια σχέση μεταξύ των όρων. Συντάσσεται ως συνάρτηση (*function*) με αντικείμενά της (*arguments*) όρους ή οι οποίοι βρίσκονται μέσα στις παρενθέσεις (σε καθορισμένες θέσεις ανάλογα με τον ρόλο που παίζουν για το κατηγορήμα). Με αυτή τη σύνταξη δημιουργείται μία έκφραση (*expression*) της κατηγορικής λογικής, δηλαδή ένα γεγονός του χώρου του προβλήματος το οποίο όμως, σε αντίθεση με τους όρους, διασπάται.

Μία σχέση η οποία ισχύει μεταξύ των όρων του κατηγορήματος καθιστά την έκφραση αληθή, ενώ μία σχέση η οποία δεν ισχύει μεταξύ των όρων του κατηγορήματος καθιστά την έκφραση ψευδή. Η άρνηση μίας έκφρασης την καθιστά ψευδή αν η ίδια είναι αληθής και αληθή αν η ίδια είναι ψευδής. Έτσι, η πρόταση "Κάνει κρύο", που εκφράζεται ως **ΚΡΥΟ** στην προτασιακή λογική, μπορεί να εκφραστεί στην κατηγορική λογική ως **ΚΑΙΡΟΣ(κρύο)**, ενώ η έκφραση "Εάν (κάνει) κρύο τότε δεν (κάνει) ζέστη" εκφράζεται ως **ΚΑΙΡΟΣ(κρύο) @ ØΚΑΙΡΟΣ(ζέστη)** (το οποίο είναι πιο ακριβές από το **ΚΡΥΟ @ ØΖΕΣΤΗ** της προτασιακής λογικής, μια και διευκρινίζει ότι η αντίθεση των όρων **ΚΡΥΟ** και **ΖΕΣΤΗ** αφορά στο θέμα του καιρού). Επιπλέον, οι εκφράσεις "Ο Γιώργος είναι άνθρωπος", "Η γάτα έχει τέσσερα πόδια", "Η Ελένη αγαπά το παγωτό" και "Η Ελένη τρώει το παγωτό" ή "Η Ελένη έφαγε τρία παγωτά" είναι δυνατόν να εκφραστούν πιο δομημένα στην κατηγορική λογική ως **ΑΝΘΡΩΠΟΣ(Γιώργος)** ή **ΕΙΜΑΙ(άνθρωπος,Γιώργος)**, **ΤΕΣΣΕΡΑ_ΠΟΔΙΑ(γάτα)** ή **ΕΧΩ(γάτα, πόδια,τέσσερα)**, **ΑΓΑΠΩ(Ελένη,παγωτό)**, **ΤΡΩΩ(Ελένη,παγωτό)**, **ΤΡΩΩ1(Ελένη,παγωτό,3, παρελθόν)**. Σημειώνεται ότι στην τελευταία έκφραση το υποκείμενο της πρότασης (που εδώ είναι η **Ελένη**) καταλαμβάνει την πρώτη θέση στους όρους του κατηγορήματος, το αντικείμενο τη δεύτερη θέση, η επεξήγηση του συνόλου των αντικειμένων την τρίτη θέση και η χρονική επεξήγηση τη τέταρτη θέση. Όπως και στην προτασιακή λογική, είναι δυνατός ο συνδυασμός κατηγορημάτων μέσω λογικών τελεστών. Αυτοί περιλαμβάνουν του τελεστές του **Πίνακα 1**, καθώς και τα σύμβολα:

± " , το οποίο εκφράζει την ισχύ της έκφρασης που το περιέχει για όλους τους όρους που την ικανοποιούν, και

± \$, το οποίο εκφράζει την ύπαρξη όρου ο οποίος ικανοποιεί την έκφραση.

Κατ' αυτόν τον τρόπο είναι δυνατό να εκφραστούν πολύπλοκες σχέσεις, καθώς και κανόνες. Για παράδειγμα η έκφραση "Οτιδήποτε έχει φτερά είναι πουλί" εκφράζεται ως **"x[ΦΤΕΡΑ(x) @ ΠΟΥΛΙ(x)]** ενώ η έκφραση **\$x[ΠΟΥΛΙ(x)]** εκφράζει την πρόταση "Υπάρχει κάτι που είναι πουλί" (στον χώρο του προβλήματος), δηλαδή ότι υπάρχει κάποια σταθερά ή μεταβλητή (ή κάποιος άλλος όρος που προκύπτει από συνδυασμό κατηγορημάτων και όρων) ο οποίος ικανοποιεί αυτή την έκφραση. Για παράδειγμα, αν ισχύει ότι **"x[ΦΤΕΡΑ(x) @ ΠΟΥΛΙ(x)]** και ότι **ΦΤΕΡΑ(ΑΕΤΟΣ)** τότε συμπεραίνεται (μέσω επαγωγής) ότι **ΠΟΥΛΙ(ΑΕΤΟΣ)**, ενώ το ίδιο ισχύει για κάθε όρο που ικανοποιεί το κατηγορήμα **ΦΤΕΡΑ**. Σημειώνεται ότι αντίθετα με τους όρους-σταθερές, οι όροι-μεταβλητές μπορούν να αναπαριστούν άλλες εκφράσεις-κατηγορήματα, πχ. για την έκφραση "Ο Δημήτρης και η Ελένη είναι σύζυγοι και είναι και οι δύο γονείς του Γιώργου" οι όροι είναι οι σταθερές **Δημήτρης**, **Ελένη** και **Γιώργος**, ενώ τα κατηγορήματα είναι τα **ΣΥΖΥΓΟΣ** και **ΓΟΝΕΑΣ**. Τότε, η αρχική έκφραση μπορεί να αποδοθεί από τις εκφράσεις της κατηγορικής λογικής:

a="Ο Δημήτρης είναι σύζυγος της Ελένης"=ΣΥΖΥΓΟΣ(Δημήτρης,Ελένη),

b="Η Ελένη είναι σύζυγος του Δημήτρη"=ΣΥΖΥΓΟΣ(Ελένη,Δημήτρης),

c="Ο Δημήτρης είναι γονέας του Γιώργου"=ΓΟΝΕΑΣ(Δημήτρης,Γιώργος), και

$d = \text{"Η Ελένη είναι γονέας του Γιώργου"} = \text{ΓΟΝΕΑΣ}(\text{Ελένη}, \text{Γιώργος}),$

όλες από τις οποίες αποτελούνται από κατηγορήματα τα οποία εκφράζουν τις σχέσεις μεταξύ των όρων-σταθερών του προβλήματος. Είναι δυνατόν όμως να υπάρξουν και ισοδύναμες εκφράσεις οι οποίες δημιουργούνται από την εισαγωγή άλλων εκφράσεων μέσα στους όρους τους πχ. $\$x[\text{ΣΥΖΥΓΟΣ}(\text{Ελένη}, x)]$, οπότε η έκφραση $\text{ΓΟΝΕΑΣ}(x, \text{Γιώργος})$ είναι ισοδύναμη με την έκφραση c αλλά αποτελείται από έναν όρο-σταθερά και έναν όρο-μεταβλητή η οποία αντιστοιχεί σε έκφραση.

Είναι σαφές ότι η κατηγορική λογική περιλαμβάνει την προτασιακή λογική. Έτσι, η κατηγορική λογική δύναται να εξετάζει εάν ένα σύνολο εκφράσεων είναι αληθές (εάν οι εκφράσεις είναι συμβατές μεταξύ τους) καθώς και να εξάγει/διαπιστώνει την αλήθεια συμπερασμάτων τα οποία απορρέουν από κάποια δεδομένα/γεγονότα. Για το σκοπό αυτό μπορούν να χρησιμοποιηθούν είτε πίνακες αληθείας (με τα προαναφερθέντα προβλήματα αποδοτικότητας για πληθώρα μεταβλητών/εκφράσεων) είτε και τεχνικές συμπερασματικής διαδικασίας. Για παράδειγμα, ο χώρος του προβλήματος με έκφραση: "Κάθε άνθρωπος είναι θνητός. Κανένας θνητός δεν ζει περισσότερο από 150 χρόνια. Οι ζωντανοί άνθρωποι δεν είναι νεκροί. Εάν κάποιος είναι νεκρός σε κάποιο έτος, τότε είναι νεκρός και σε κάθε επόμενο έτος. Όλοι οι άνθρωποι από την Πομπηία πέθαναν το 79μ.Χ. Ο Μάρκος είναι άνθρωπος. Ο Μάρκος γεννήθηκε το 44μ.Χ. Ο Μάρκος είναι από την Πομπηία. Σήμερα είναι 2004. Είναι ο Μάρκος ζωντανός;" απαρτίζεται από:

(α) τα παρακάτω γεγονότα

$a = \text{"Κάθε άνθρωπος είναι θνητός"} = x[\text{ΑΝΘΡΩΠΟΣ}(x) \text{ @ } \text{ΘΝΗΤΟΣ}(x)].$

$b = \text{"Κανένας θνητός δεν ζει περισσότερο από 150 χρόνια"} = x \text{ " } t_1 \text{ " } t_2 [(\text{ΘΝΗΤΟΣ}(x) \wedge \text{ΓΕΝΝΗΜΕΝΟΣ}(x, t_1)) \wedge \text{ΜΕΓΑΛΥΤΕΡΟ}(t_2 - t_1, 150) \text{ @ } \text{ΝΕΚΡΟΣ}(x, t_2)].$

$c = \text{"Οι ζωντανοί άνθρωποι δεν είναι νεκροί"} = x \text{ " } t_1 [\text{ΖΩΝΤΑΝΟΣ}(x, t_1) \ll \text{ØΝΕΚΡΟΣ}(x, t_1)].$

$d = \text{"Εάν κάποιος είναι νεκρός σε κάποιο έτος, τότε είναι νεκρός και σε κάθε επόμενο έτος"} = x \text{ " } t_1 \text{ " } t_2 [(\text{ΝΕΚΡΟΣ}(x, t_1)) \wedge \text{ΜΕΓΑΛΥΤΕΡΟ}(t_2, t_1) \text{ @ } \text{ΝΕΚΡΟΣ}(x, t_2)].$

$e = \text{"Όλοι οι άνθρωποι από την Πομπηία πέθαναν το 79μ.Χ."} = x[\text{ΑΝΘΡΩΠΟΣ}(x) \wedge \text{ΑΠΟ_ΠΟΜΠΗΙΑ}(x) \text{ @ } \text{ΝΕΚΡΟΣ}(x, 79)]$.

$f = \text{"Ο Μάρκος είναι άνθρωπος"} = \text{ΑΝΘΡΩΠΟΣ}(\text{Μάρκος})$

$g = \text{"Ο Μάρκος γεννήθηκε το 44μ.Χ."} = \text{ΓΕΝΝΗΜΕΝΟΣ}(\text{Μάρκος}, 44)$

$h = \text{"Ο Μάρκος είναι από την Πομπηία"} = \text{ΑΠΟ_ΠΟΜΠΗΙΑ}(\text{Μάρκος})$

$i = \text{"Σήμερα είναι 2004"} = \text{σήμερα} = 2004$

(β) το συμπέρασμα

$j = \text{"Ο Μάρκος είναι ζωντανός σήμερα"} = \text{ΖΩΝΤΑΝΟΣ}(\text{Μάρκος}, \text{σήμερα})$

Μέσω επαγωγής, η συμπερασματική διαδικασία μπορεί να πάρει τη μορφή

$f = \text{ΑΝΘΡΩΠΟΣ}(\text{Μάρκος})$

$\beta \text{ } a \text{ (} x = \text{Μάρκος)}$

$\text{ΘΝΗΤΟΣ}(\text{Μάρκος})$

$\beta \text{ } b + g + i \text{ (} x = \text{Μάρκος, } t_1 = 44, t_2 = 2004)$

$\text{ΝΕΚΡΟΣ}(\text{Μάρκος}, 2004)$

$\beta \text{ } c$

$\text{ØΖΩΝΤΑΝΟΣ}(\text{Μάρκος})$

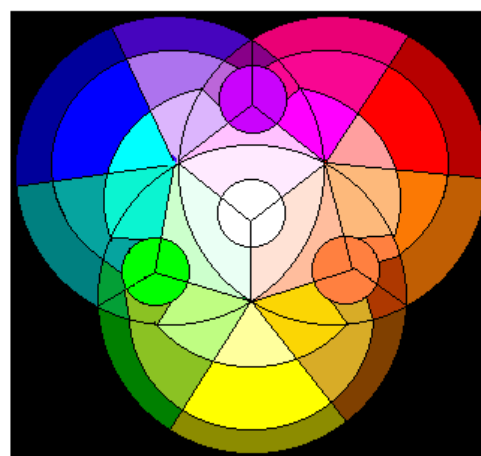
Παρατηρείται ότι, στην περίπτωση χρήσης της κατηγορικής λογικής, είναι απαραίτητη η ανάθεση όρων-σταθερών στα κατηγορήματα προκειμένου να δημιουργηθούν συγκεκριμένες εκφράσεις (χωρίς μεταβλητές ή σύμβολα " και \$).

Λόγω της μεγαλύτερης πολυπλοκότητας της κατηγορικής λογικής, εάν η αναπαράσταση και επίλυση του προβλήματος είναι δυνατό να πραγματοποιηθεί μέσω της προτασιακής λογικής τότε είναι προτιμότερη. Εάν πάλι είναι απαραίτητο να διασπαστούν/ποσοτικοποιηθούν/γενικευτούν/ συγκεκριμενοποιηθούν οι εκφράσεις, τότε προτιμάται η κατηγορική λογική.

Σημειώνεται πάντως ότι, αν και η χρήση πινάκων αληθείας καθώς και οι διάφορες τεχνικές συμπερασματικής διαδικασίας οδηγούν πάντα σε σωστές διαπιστώσεις, είναι δυνατόν μία απόδειξη να είναι τόσο χρονοβόρα που να μην είναι χρήσιμη. Επιπλέον είναι δυνατόν να μην μπορεί να αποδειχτεί κάτι το οποίο είναι αληθές (μη πληρότητα κατηγορικής λογικής, *incompleteness*) ή η συμπερασματική διαδικασία να μην τερματίζει στην προσπάθειά της να αποδείξει κάτι το οποίο είναι ψευδές (μη επιδεκτικότητα απόφασης κατηγορικής λογικής, *undecidability*). Είναι γεγονός όμως ότι η δυνατότητα και αποδοτικότητα της απόδειξης εξαρτάται κατά πολύ από την αναπαράσταση του προβλήματος καθώς και την κατάλληλη επιλογή τεχνικής επίλυσης.



(α)



(β)

Σχήμα 6. Τα οκτώ χρώματα σύμφωνα με τη δίτιμη λογική.

2.4. ΑΣΑΦΗΣ ΛΟΓΙΚΗ (fuzzy logic)

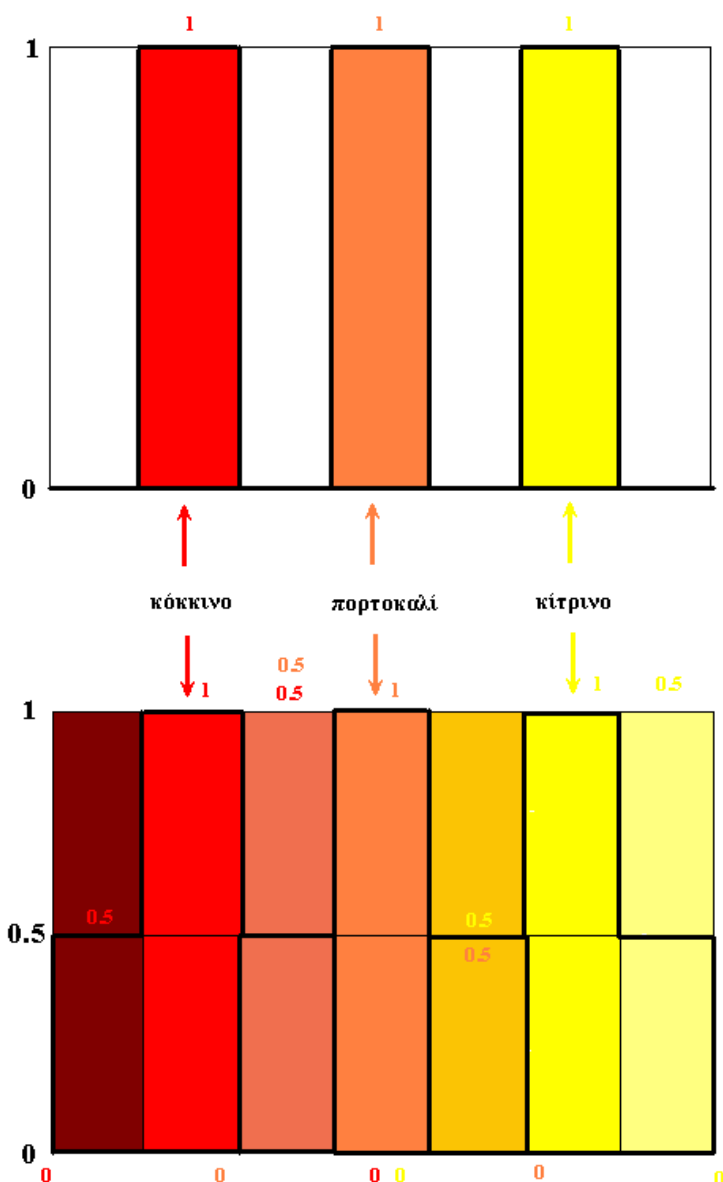
Η δίτιμη λογική (και μέσω αυτής η προτασιακή και κατηγορική λογική), αν και κατάλληλη για την αναπαράσταση και τον χειρισμό γεγονότων, προτάσεων και αντίστοιχων μεταβλητών στον Η/Υ (παράγραφος 2.3.), δεν είναι πάντα επαρκώς ευέλικτη ώστε να εκφράζει επιτυχώς ορισμένες έννοιες, ιδιαίτερα γλωσσικές, υποκειμενικές ή εμπειρικές. Ένα παράδειγμα αποτελούν τα χρώματα του ορατού φάσματος: τα βασικά χρώματα είναι τρία - κόκκινο, κίτρινο και μπλε -, η ισόποση παρουσία τους δημιουργεί λευκό χρώμα και η πλήρης απουσία τους το μαύρο. Τα δευτερεύοντα χρώματα είναι τρία - πορτοκαλί (που προκύπτει από τον συνδυασμό κόκκινου και κίτρινου), πράσινο (που προκύπτει από τον συνδυασμό κίτρινου και μπλε) και μωβ (που προκύπτει από τον συνδυασμό κόκκινου και μπλε) -. Τα οκτώ αυτά χρώματα φαίνονται στο Σχήμα 6(α) με κάθε χρώμα x να καταλαμβάνει μία καλά καθορισμένη περιοχή (δίτιμη λογική). Μέσα στην κάθε περιοχή το κατηγορήμα $\text{ΧΡΩΜΑ}(\text{περιοχή}, x)$ λαμβάνει την τιμή 1 (αληθές) και έξω αυτήν λαμβάνει την τιμή 0 (ψευδές). Είναι προφανές ότι η δίτιμη λογική δεν επιτρέπει:

(α) Την εις βάθος έκφραση της σχέσης των χρωμάτων (για παράδειγμα ότι το δευτερεύον χρώμα πορτοκαλί αποτελεί συνδυασμό των πρωτεύοντων χρωμάτων κόκκινου και κίτρινου) όπως αυτή φαίνεται στο Σχήμα 6(α).

(β) Την ακριβή περιγραφή της απόχρωσης κάθε χρώματος (για παράδειγμα τα ποσοστά πρόσμιξης κόκκινου και κίτρινου - ή ακόμα και λευκού ή μαύρου - προκειμένου να δημιουργηθεί κάποιο πορτοκαλί, δηλαδή εάν η συγκεκριμένη απόχρωση του πορτοκαλί μοιάζει περισσότερο με το κόκκινο ή το κίτρινο, εάν είναι ανοιχτό ή σκούρο κλπ.)

(γ) Την οικονομική έκφραση της σχέσης περιοχής-χρώματος αφού η μεταβλητή x λαμβάνει οκτώ τιμές για το **Σχήμα 6(α)** αντί τριών που αντιστοιχούν στα βασικά χρώματα (ή πέντε που αντιστοιχούν στα τρία βασικά χρώματα, το λευκό και το μαύρο) από τα οποία προκύπτουν όλα τα υπόλοιπα.

Τα τρία αυτά προβλήματα αναπαράστασης μέσω της δίτιμης λογικής επιτείνονται εφόσον θεωρηθούν τα πρακτικά άπειρα χρώματα τα οποία μπορούν να προκύψουν από τον συνδυασμό δύο ή περισσότερων γειτονικών χρωμάτων του **Σχήματος 6(α)**¹⁰ σε διάφορα ποσοστά. Αυτό παρουσιάζεται σε απλουστευμένη μορφή στο **Σχήμα 6(β)**, όπου κάθε μία από τις περιοχές του **Σχήματος 6(α)** χωρίζεται σε υποπεριοχές χρωματισμένες με παραλλαγές του αρχικού χρώματος όπως αυτές προκύπτουν από την πρόσμιξή του με το χρώμα γειτονικών περιοχών.



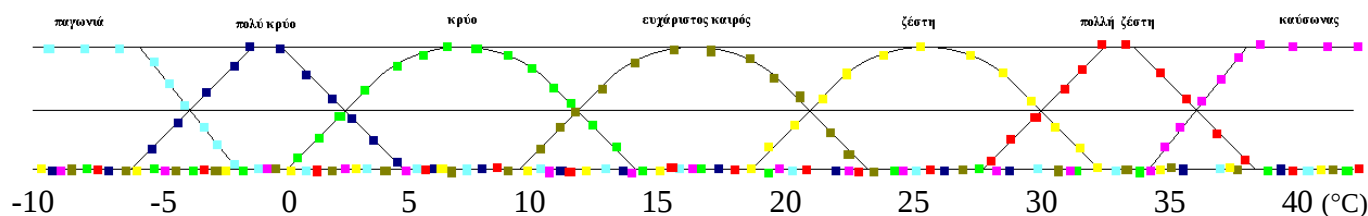
Σχήμα 7. Αναπαράσταση γειτονικών χρωμάτων μέσω δίτιμης και ασαφούς λογικής.

Η πληθώρα χρωμάτων που αναπαριστάται απλουστευμένα στο **Σχήμα 6(β)** μπορεί να εκφραστεί στην κατηγορική λογική ως κατηγορία της μορφής **ΧΡΩΜΑ3(περιοχή,κόκκινο%,κίτρινο%,μπλε%)** ή **ΧΡΩΜΑ5(περιοχή,κόκκινο%,κίτρινο%,μπλε%,λευκό%,μαύρο%)** όπου τα ποσοστά των τριών ή πέντε χρωμάτων, αντίστοιχα, αθροίζονται σε 100. Για παράδειγμα το γαλάζιο αναπαριστάται ως

¹⁰ Με τον ίδιο τρόπο που τα δευτερεύοντα χρώματα του **Σχήματος 6(α)** προκύπτουν από τον συνδυασμό γειτονικών βασικών χρωμάτων.

ΧΡΩΜΑ5(περιοχή,0,0,50,50,0) ή **ΧΡΩΜΑ5(περιοχή,0,0,30,70,0)** ανάλογα με την απόχρωση ενώ το τυρκουάζ αναπαριστάται ως **ΧΡΩΜΑ5(περιοχή,0,20,60,8,2)** ή **ΧΡΩΜΑ5(περιοχή,0,30,30,40,0)** ανάλογα με την απόχρωση.

Η ασαφής λογική έχει δημιουργηθεί ώστε να καλύψει την αδυναμία της δίτιμης λογικής στην έκφραση μερικού χαρακτηρισμού γεγονότων, προτάσεων και αντίστοιχων μεταβλητών. Κάθε χαρακτηριστικό της ασαφούς λογικής απεικονίζεται σε μία γραφική παράσταση όπου ο άξονας X αναπαριστά το εύρος δυνατών τιμών της μεταβλητής και ο άξονας Y το ποσοστό συμμετοχής (*degree of membership*) των τιμών της μεταβλητής στο χαρακτηριστικό. Αντί των τιμών 1 και 0 (δίτιμη λογική) το ποσοστό συμμετοχής μπορεί να λαμβάνει συνεχείς τιμές στο διάστημα $[0,1]$ οι οποίες εκφράζουν το κατά πόσο το χαρακτηριστικό εκφράζει τη συγκεκριμένη τιμή της μεταβλητής. Η καμπύλη που δημιουργείται από όλα τα ζεύγη (x,y) ονομάζεται συνάρτηση συμμετοχής (*membership function*) του χαρακτηριστικού. Αυτή μπορεί να πάρει πρακτικά οποιαδήποτε μορφή, δεν είναι αναγκαστικά ευθεία ή συνεχής, και συνήθως εμφανίζει ποσοστά συμμετοχής 0 στο ένα ή και στα δύο άκρα του εύρους τιμών της μεταβλητής και ποσοστά που αυξάνονται ανάμεσα. Επιπλέον, διαφορετικά αλλά γλωσσικά, υποκειμενικά ή εμπειρικά σχετιζόμενα χαρακτηριστικά μπορούν να συνδυαστούν στην ίδια γραφική παράσταση εκφράζοντας συνολικά τα διαφορετικά χαρακτηριστικά τα οποία αλληλοσυμπληρώνονται και εκφράζουν πληρέστερα τη μεταβλητή. Η αλληλοσυμπλήρωση χαρακτηριστικών επιτυγχάνεται με το άθροισμα των ποσοστών συμμετοχής των σχετιζόμενων χαρακτηριστικών να ισούται με 1 για κάθε τιμή της μεταβλητής. Ένα παράδειγμα δίνεται στο **Σχήμα 7**, όπου φαίνονται τρία γειτονικά χρώματα του **Σχήματος 6**, το κόκκινο (βασικό), το πορτοκαλί (δευτερεύον) και το κίτρινο (βασικό). Στο επάνω μέρος του **Σχήματος 7** παρουσιάζεται η έκφραση των τριών χρωμάτων στη δίτιμη λογική: το κάθε χρώμα λαμβάνει τιμή 1 στην αντίστοιχη περιοχή και 0 οπουδήποτε αλλού, συνεπώς γειτονικά, ενδιάμεσα χρώματα ή αποχρώσεις όχι μόνο δεν είναι δυνατό να αναπαρασταθούν αλλά ούτε και συνδέονται με το αρχικό χρώμα. Αντίθετα, στο κάτω μέρος του **Σχήματος 7** παρουσιάζεται η έκφραση κάθε χρώματος στην ασαφή λογική. Για παράδειγμα, το πορτοκαλί λαμβάνει ποσοστό συμμετοχής 1 στην περιοχή όπου χαρακτηρίζεται καθαρά ως πορτοκαλί (τα ποσοστά συμμετοχής των άλλων δύο χρωμάτων είναι 0), 0.5 στις περιοχές που συνδυάζεται ισόποσα με κόκκινο (αριστερά) ή κίτρινο (δεξιά) και 0 στις περιοχές όπου δεν συμμετέχει στη δημιουργία του χρώματος. Τέλος το παράδειγμα του **Σχήματος 8** φανερώνει την υποκειμενική έννοια της αίσθησης κρύου-ζέστης με μεταβλητή την θερμοκρασία. Εδώ οι συναρτήσεις συμμετοχής είναι συνεχείς καμπύλες ή τμηματικά συνεχείς συνδυασμοί ευθειών και καμπυλών. Μπορούν να πάρουν πρακτικά οποιαδήποτε μορφή και να έχουν οποιοδήποτε εύρος (μέσα σε κάποιο λογικό και κοινά αποδεκτό πλαίσιο), αρκεί το άθροισμα των ποσοστών συμμετοχών των επιμέρους χαρακτηριστικών να ισούται με 1 για κάθε δυνατή τιμή της θερμοκρασίας. Από το **Σχήμα 8** αυτό φαίνεται καθαρά η ευελιξία, περιγραφική ικανότητα και οικονομία έκφρασης της ασαφούς λογικής έναντι της έκφρασης του κρύου και ζέστης της παραγράφου 2.3.



Σχήμα 8. Αναπαράσταση αίσθησης της θερμοκρασίας μέσω δίτιμης και ασαφούς λογικής.

2.5. ΑΝΑΦΟΡΕΣ

1. Hodges W., 1977. **Logic**. Penguin Books: Harmondsworth, Middlesex, UK.
2. Yager R.R., Zadeh L.A. (eds.), 1992. **An Introduction to Fuzzy Logic Applications in Intelligent Systems**. Kluwer Academic Publishers: Boston, U.S.A.
3. Zadeh, L.A., 1996. Fuzzy Logic = Computing with Words, *IEEE Transactions on Fuzzy Systems* Vol. 2, pp. 103-111.



ΤΕΧΝΙΚΕΣ ΤΝ



Πανεπιστήμιο Πειραιώς
Τμήμα Μηχανικής Διοίκησης και Τεχνολογίας
Διαχείριση Πληροφοριών και Γλώσσες Προγραμματισμού



3. ΤΕΧΝΙΚΕΣ ΤΝ ΓΙΑ ΕΠΙΛΥΣΗ ΠΡΟΒΛΗΜΑΤΩΝ

Η ΤΝ απαιτεί:

- κατάλληλα σχήματα διαχείρισης συμβόλων για την αναπαράσταση του περιβάλλοντος, δηλαδή για την σύλληψη της γνώσης της σχετικής με το περιβάλλον,
- αποτελεσματικές διαδικασίες για την εξαγωγή και χρήση συμβολικά εκφρασμένης γνώσης προκειμένου να εκτελέσει ευφυείς λειτουργίες (επίλυση προβλημάτων).

Ετσι, αφενός ένα πρόγραμμα ΤΝ χειρίζεται συμβολικές δομές και όχι κατευθείαν αυτό που αναπαριστούν, και αφετέρου η ερμηνεία των καταστάσεων γίνεται από τον χρήστη, μέσα από την αναπαράστασή τους.

Καθότι τα περισσότερα προβλήματα της ΤΝ δεν έχουν απευθείας λύση (δεν είναι τετριμμένα) είναι απαραίτητη η εύρεση μίας μεθοδολογίας που (α) να οδηγεί στην λύση πιο αποτελεσματικά από ότι η τύχη (*guesswork*) και (β) να επιτρέπει την οπισθοδρόμηση (*backtracking*) εφόσον η πορεία δεν οδηγεί προς τη λύση. Στα επόμενα αναλύονται διάφορες τεχνικές ΤΝ με τα δύο αυτά χαρακτηριστικά.

3.1. ΑΝΑΖΗΤΗΣΗ

3.1.1. Επίλυση ως αναζήτηση στον χώρο του προβλήματος

Ως χώρος του προβλήματος χαρακτηρίζεται το σύνολο των καταστάσεων, δηλαδή όλοι οι συνδυασμοί των δυνατών τιμών των σημαντικών χαρακτηριστικών που αναπαριστούν το πρόβλημα. Λόγω της υπερπληθώρας (έκρηξης) των συνδυασμών αυτών (*combinatorial explosion*) για όλα εκτός από τα πιο περιορισμένα προβλήματα, η απαρίθμηση όλων των καταστάσεων (*states*) δεν είναι αποδοτική και μερικές φορές δεν είναι ούτε εφικτή.

Η αναζήτηση (*search*) αποτελεί ένα ταξίδι στον χώρο του προβλήματος: ξεκινώντας από την αρχική κατάσταση πραγματοποιείται μετάβαση (*state transition*) σε μία νέα κατάσταση, από εκεί – μέσω μεταβάσεως – σε μία νεότερη κατάσταση και ου τω καθεξής. Η επίλυση ανάγεται στην αναζήτηση που περιγράφει μία διαδρομή (*path*), δηλαδή ένα ταξίδι μέσω μεταβάσεων από την αρχική σε μία από τις τελικές καταστάσεις του προβλήματος.

Οι καταστάσεις αναπαριστώνται από συμβολικές δομές, οι οποίες όχι μόνο είναι επεξεργάσιμες από τον Η/Υ αλλά και είναι κατάλληλες για χειρισμό από την τεχνική ΤΝ, επί του προκειμένου από την αναζήτηση στον χώρο του προβλήματος. Είναι απαραίτητο να καθοριστούν τα εξής:

- Οι συμβολικές δομές (*symbolic structures*) οι οποίες αναπαριστούν επακριβώς την πλευρά του προβλήματος τη σχετική με την επίλυσή του.
- Οι διαδικασίες επεξεργασίας (*processing procedures*) οι οποίες αναγνωρίζουν, δημιουργούν, μετατρέπουν και διαγράφουν συμβολικές δομές. Σημειώνεται ότι οι διαδικασίες επεξεργασίας πρέπει να εκφράζουν και προωθούν αποκλειστικά και μόνο τις επιτρεπτές μεταβάσεις.
- Οι διαδικασίες ελέγχου (*control procedures*) οι οποίες οργανώνουν την εφαρμογή των διαδικασιών επεξεργασίας ώστε να είναι δυνατή η μετάβαση στην τελική κατάσταση.

Τα τρία αυτά χαρακτηριστικά μεγέθη είναι αλληλεξαρτώμενα.

Ενα παράδειγμα επίλυσης ως ακολουθίας μεταβάσεων αποτελεί το πρόβλημα του καλλιεργητή, της αλεπούς, της χήνας και του σταριού, ενός προβλήματος οργάνωσης ενεργειών στον χρόνο. Εστω ότι ο καλλιεργητής με την αλεπού, τη χήνα και το στάρι βρίσκονται στην μία όχθη ενός ποταμού και ότι ο καλλιεργητής θέλει να μεταφέρει την αλεπού, τη χήνα και το στάρι στην απέναντι όχθη. Σημειώνεται ότι δεν υπάρχει άλλος τρόπος πρόσβασης στην άλλη όχθη (γέφυρα ή δυνατότητα κολυμπιού). Ο καλλιεργητής έχει στη διάθεσή του μία βάρκα, η οποία όμως είναι μικρή (διθέσια), οπότε χωράνε μόνο δύο "επιβάτες", δηλαδή ο καλλιεργητής προκειμένου να οδηγή τη βάρκα και ένα από τα άλλα (αλεπού, χήνα, στάρι) σε κάθε μετακίνηση από όχθη σε όχθη. Αν μείνουν μόνες, η αλεπού τρώει την χήνα, ενώ αν μείνουν μόνα, η χήνα τρώει το στάρι. Με ποιες μετακινήσεις από όχθη σε όχθη θα επιτευχθεί ο καλλιεργητής, η αλεπού, η χήνα και το στάρι να φτάσουν στην απέναντι όχθη σώοι και αβλαβείς; Είναι φανερό από την παραπάνω περιγραφή ότι τα Ελληνικά (ή οποιαδήποτε γλώσσα) δεν είναι κατάλληλη για την αναπαράσταση του προβλήματος στον Η/Υ. Εναλλακτικά, το πρόβλημα μπορεί να αναπαρασταθεί από:

· τα παρακάτω σύμβολα:

K καλλιεργητής

A αλεπού

X χήνα

Σ στάρι

B βάρκα

O1 όχθη όπου βρίσκονται αρχικά ο καλλιεργητής, η αλεπού, η χήνα και το στάρι

O2 απέναντι όχθη, όπου πρέπει να μεταβούν ο καλλιεργητής, η αλεπού, η χήνα και το στάρι.

· τις παρακάτω συμβολικές δομές:

Αρχική κατάσταση: O1 K A X Σ B

O2

Τελική κατάσταση: O1

O2 K A X Σ B

Απαγορευμένες καταστάσεις (είναι επιτρεπτές όλες οι υπόλοιπες;¹¹)

O1 A X

O2 K Σ B

O1 X Σ

O2 K A B

O1 K Σ B

O2 A X

O1 K A B

O2 X Σ

οι οποίες εκφράζουν δύο ξένα μεταξύ τους σύνολα συμβόλων, όπου στο ένα σύνολο ανήκει αναγκαστικά το σύμβολο O1 και στο δεύτερο το σύμβολο O2.

Το σύμβολο B δεν επηρεάζει τις καταστάσεις, οπότε - λόγω της αφαίρεσης - αυτές μπορούν να ξαναγραφτούν ως εξής:

Αρχική κατάσταση: O1 K A X Σ

O2

Τελική κατάσταση: O1

O2 K A X Σ

Απαγορευμένες καταστάσεις (είναι επιτρεπτές όλες οι υπόλοιπες;¹²)

O1 A X

O2 K Σ

O1 X Σ

O2 K A

O1 K Σ

O2 A X

O1 K A

O2 X Σ

· τις παρακάτω διαδικασίες επεξεργασίας:

K

KA

KX

KΣ

Οι οποίες εκφράζουν το τρόπο μετάβασης κατά ένα ή δύο σύμβολα, από την όχθη που είναι αρχικά (παλιά κατάσταση) στη όχθη που είναι μετά την μετάβαση (νέα κατάσταση). Σημειώνεται ότι προκειμένου να εφαρμοστεί μία διαδικασία επεξεργασίας πρέπει τα σύμβολα να βρίσκονται στην ίδια όχθη.

· τις παρακάτω διαδικασίες ελέγχου:

Τα σύμβολα, οι συμβολικές δομές και οι διαδικασίες επεξεργασίας αποτελούν τα απαραίτητα στοιχεία για τη έκφραση του προβλήματος και της επίλυσης. Για κάθε μετάβαση, πρέπει να πραγματοποιείται έλεγχος σχετικά με το αν η νέα κατάσταση είναι επιτρεπτή. Επιπλέον, προκειμένου να δοθεί μία ευφυής λύση στο πρόβλημα (μικρότερος αριθμός μετακινήσεων από την αρχική μέχρι την τελική κατάσταση), πρέπει όχι μόνο να επιτυγχάνεται μετάβαση σε νέα κατάσταση αλλά και να αποφεύγονται οι κύκλοι, δηλαδή ακολουθίες μετακινήσεων με την πρώτη και τελευταία κατάσταση στην ακολουθία να ταυτίζονται. Ετσι, σημειώνεται ότι υπάρχουν κάποιες καταστάσεις οι οποίες, αν και επιτρεπτές, δεν προωθούν τη λύση του προβλήματος. Για παράδειγμα, η κατάσταση

¹¹ Στο ερώτημα του εάν όλες οι άλλες καταστάσεις είναι επιτρεπτές, αξίζει να σημειωθεί ότι το σύμβολο B δεν έχει καμία σχέση με τις καταστάσεις, αφού αναγκαστικά συνυπάρχει με το σύμβολο K. Αρα, οποιαδήποτε κατάσταση με το σύμβολο K στο ένα σύνολο (όχθη) και το σύμβολο B στο άλλο δεν είναι επιτρεπτές από τον ορισμό του προβλήματος (και όχι από τους περιορισμούς, όπως οι προαναφερθείσες καταστάσεις).

¹² Τώρα, όλες οι άλλες καταστάσεις είναι επιτρεπτές.

KAXΣ~	KAX~Σ	KA~XΣ	K~AXΣ	~KAXΣ
	KΑΣ~X	KX~ΑΣ	A~KAX	
	KΣX~A	KΣ~AX	X~KΑΣ	
	AXΣ~K	XΣ~KA	Σ~KAX	
		ΑΣ~KX		
		AX~KΣ		

αρχική κατάσταση

απαγορευμένες καταστάσεις

τελική κατάσταση

Σχήμα 9. Οι 16 καταστάσεις του χώρου του προβλήματος για συμβολική δομή σταθερού μήκους.

O1 A X Σ

O2 K

απλά δείχνει μετάβαση του K μόνου στη βάρκα στον O2, οπότε πρέπει να επαναλάβει την αντίστροφη μετάβαση στον O1 προκειμένου ένα από τα A, X και Σ να μεταβούν στην O2.

Το πρόβλημα είναι τώρα έτσι εκφρασμένο ώστε να είναι κατανοητό, αλλά όχι αναγκαστικά κατάλληλο για προγραμματισμό. Είναι φανερό ότι η επεξεργασία συνόλων με μεταβλητά μεγέθη δεν είναι η προτιμότερη συμβολική δομή. Μια συμβολική δομή σταθερού μήκους είναι προτιμότερη, για παράδειγμα συμβολικές δομές με ακριβώς 5 σύμβολα, όπου το σύμβολο ~ (ποτάμι) έχει εισαχθεί προκειμένου να ξεχωρίσει τα σύμβολα στη O1 από αυτά στην O2. Αυτή η αναπαράσταση είναι:

- ± πλήρης (εμπεριέχει όλα τα απαραίτητα στοιχεία του προβλήματος), διαφανής (κατανοητή από τον χρήστη),
- ± περιεκτική και αφαιρετική (καθιστά σαφή τα σημαντικά στοιχεία του προβλήματος, - π.χ. την όχθη στην οποία βρίσκεται κάθε σύμβολο - ενώ παραλείπει τα μη σημαντικά στοιχεία του προβλήματος - π.χ. το χρώμα της χήνας ή την ποσότητα/ποιότητα του σταριού -), οπότε επιτρέπει την οικονομική έκφραση του προβλήματος),
- ± ευνοεί τον προγραμματισμό (οι συμβολικές δομές αποθηκεύονται, προσπελαύνονται και μετατρέπονται με ευκολία), και
- ± είναι εύκολα υλοποιήσιμη¹³.

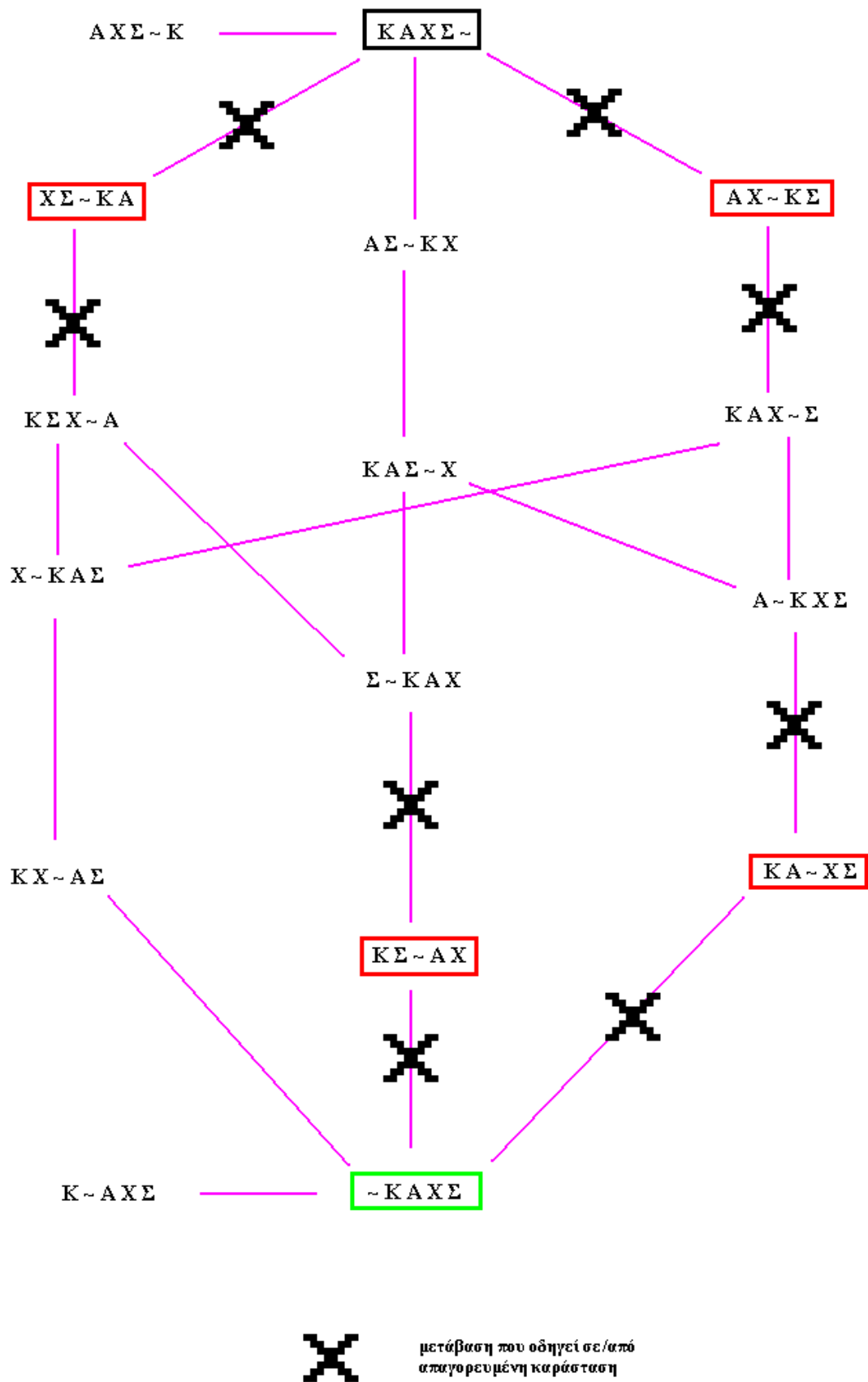
Καθίσταται λοιπόν και πάλι προφανές πώς η σωστή επιλογή αναπαράστασης επιτρέπει την ρητή έκφραση των περιορισμών που ενυπάρχουν στο πρόβλημα, προκειμένου να διευκολύνεται η επίλυση.

Το σύνολο καταστάσεων (επιτρεπτών και μη) αυτής της συμβολικής δομής φαίνεται στο **Σχήμα 9**. Υπάρχουν 16 δυνατές καταστάσεις (μία αρχική, μία τελική και 14 ενδιάμεσες), 12 από τις οποίες είναι επιτρεπτές.

Δεδομένης της συμβολικής δομής που έχει επιλεγεί, το δίκτυο (*graph*) των καταστάσεων του χώρου του προβλήματος περιέχει έναν κόμβο για κάθε κατάσταση και μία γραμμή για κάθε δυνατή μετάβαση από μία κατάσταση σε μία άλλη, η οποία ενώνει τους αντίστοιχους κόμβους. Το δίκτυο του προβλήματος φαίνεται στο **Σχήμα 10**.

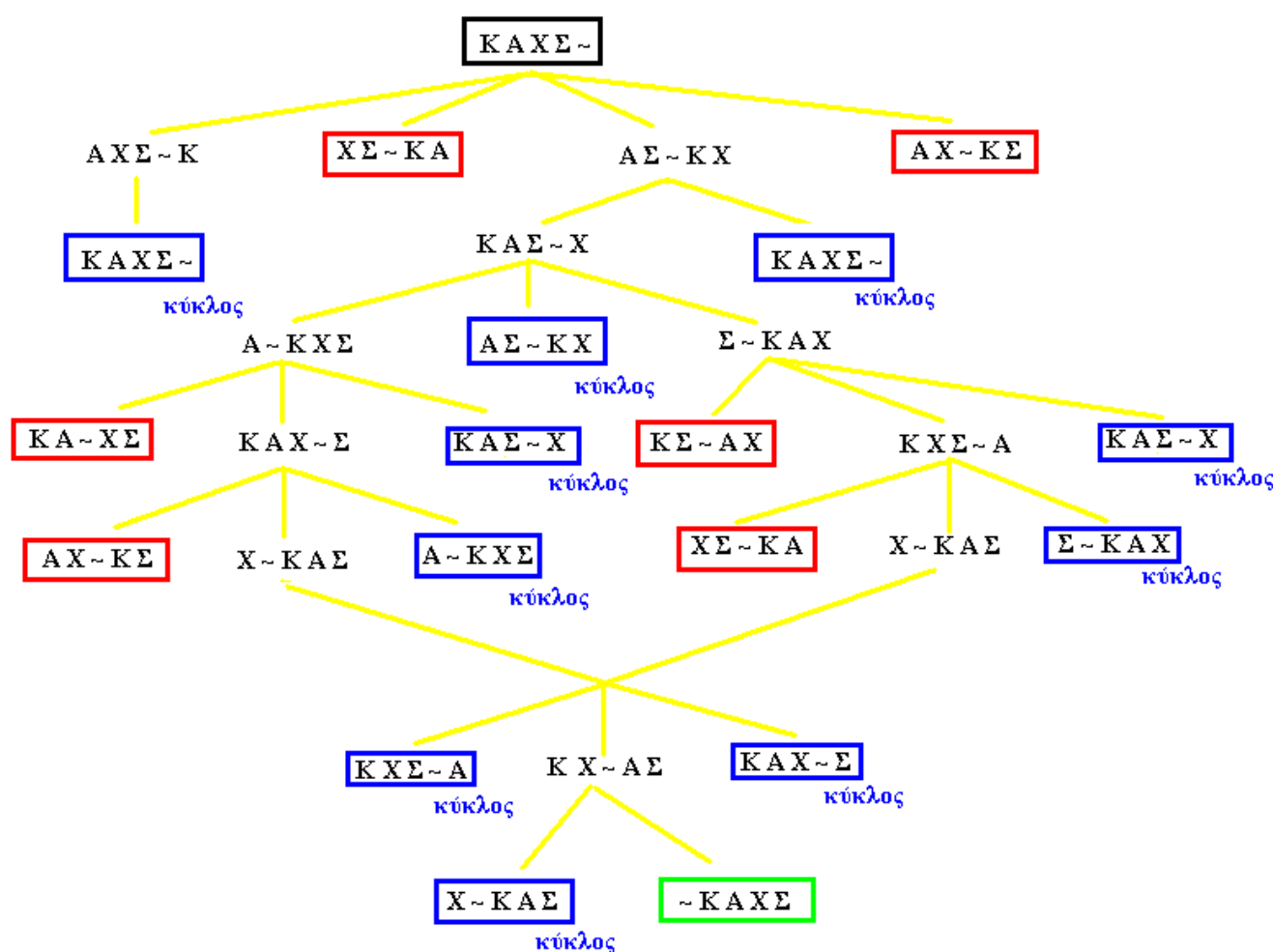
Το **Σχήμα 11** εκφράζει την πορεία προς τη λύση, χρησιμοποιώντας τις διαδικασίες επεξεργασίας και ελέγχου για την μετάβαση σε κάθε δυνατή νέα κατάσταση και τον έλεγχο των μη επιτρεπτών

¹³ Μία συμβολική δομή της μορφής συνόλου με μηδέν, 1, 2, 3, ή 4 σύμβολα, η οποία εκφράζει τα σύμβολα στο O2 (ή του O1) μόνο είναι μεν πιο οικονομική αλλά είναι σχεδόν ακατανόητη, άρα δεν είναι κατάλληλη για την έκφραση του προβλήματος. Παρ' όλα αυτά, υπάρχουν και άλλες συμβολικές δομές κατάλληλες για προγραμματισμό, π.χ. ένας δυαδικός πίνακας μεγέθους 4x1, με μία θέση για κάθε ένα από τα σύμβολα K, A, X, Σ και τιμή 0 ή 1 για το αν το αντίστοιχο σύμβολο βρίσκεται στον όχθη O1 ή O2.



Σχήμα 10. Δίκτυο του προβλήματος.

καταστάσεων και των κύκλων. Η πορεία προς τη λύση παρουσιάζει το σύνολο όλων των δυνατών μεταβάσεων και περιλαμβάνει όλες τις δυνατές διαδρομές. Οι μεταβάσεις είναι μη αμφίδρομες, οπότε η πορεία προς τη λύση αποκτά τη μορφή δένδρου (αντί για τη μορφή γράφου): ξεκινώντας από την αρχική κατάσταση (κορυφή του δένδρου), δημιουργούνται παρακλάδια για όλες τις δυνατές μεταβάσεις, κάθε μία από τις οποίες επιτυγχάνεται με την εφαρμογή μίας διαδικασίας επεξεργασίας. Οι διαδικασίες επεξεργασίας εφαρμόζονται κάθε φορά στην όχθη που περιέχει τον καλλιεργητή, άρα στην πλευρά του ~ που περιέχει το σύμβολο K. Επιπλέον, ο αριθμός των διαδικασιών επεξεργασίας που μπορούν να εφαρμοστούν είναι ανάλογος με τον αριθμό των συμβόλων που βρίσκονται στην ίδια πλευρά με το σύμβολο K όσον αφορά στο σύμβολο ~. Σε αυτή την περίπτωση, για κάθε κατάσταση δημιουργούνται τόσες νέες καταστάσεις (παρακλάδια) όσες είναι και οι εφαρμόσιμες διαδικασίες επεξεργασίας. Μέσω των διαδικασιών ελέγχου, από τις νέες καταστάσεις αποκλείονται αυτές που δημιουργούν απαγορευμένες καταστάσεις (κόκκινα τετράγωνα) ή κύκλους (μπλε τετράγωνα). Για κάθε μία από τις αποδεκτές καταστάσεις δημιουργούνται νέα παρακλάδια (μέσω των διαδικασιών επεξεργασίας) τα οποία είτε επεκτείνονται είτε σταματούν (μέσω των διαδικασιών ελέγχου) και η όλη διαδικασία επαναλαμβάνεται μέχρι την μετάβαση στην τελική κατάσταση. Οπως είναι φανερό, κύριες διαφορές της πορείας (**Σχήμα 11**) από το δίκτυο (**Σχήμα 10**) αποτελούν (α) η ανίχνευση απαγορευμένων καταστάσεων και κύκλων στην πορεία αλλά όχι στο γράφο, και (β) η προς τα κάτω (μη αμφίδρομη) κίνηση στην πορεία αλλά η αμφίδρομη επικοινωνία καταστάσεων στον γράφο.



Σχήμα 11. Πορεία προς τη λύση.

Η εξαντλητική (πλήρης) δημιουργία όλων των δυνατών μεταβάσεων από την αρχική κατάσταση είτε στην τελική κατάσταση είτε σε μία απαγορευμένη κατάσταση ή κύκλο αποτελεί μία τυπική έκφραση της

αναζήτησης, η οποία επιβάλλει την εύρεση λύσης αν κάτι τέτοιο είναι εφικτό. Αυτή η μέθοδος εκφράζεται ως εξής:

Βήμα 1. Εκκίνηση από την αρχική κατάσταση.

Βήμα 2. Εφαρμογή των εφαρμόσιμων διαδικασιών επεξεργασίας στην αρχική κατάσταση. Δημιουργία παρακλαδιών (ένα για κάθε εφαρμόσιμη διαδικασία επεξεργασίας), το καθένα από τα οποία εκφράζει μία νέα κατάσταση.

Βήμα 3. Εφαρμογή των διαδικασιών ελέγχου σε κάθε μία από τις νέες καταστάσεις. Διαγραφή νέων καταστάσεων οι οποίες δεν ικανοποιούν τις διαδικασίες ελέγχου (αποτελούν απαγορευμένες καταστάσεις ή κύκλους).

Βήμα 4. Επιλογή μίας από τις νέες καταστάσεις, την τρέχουσα κατάσταση.

Βήμα 5. Διαπίστωση ύπαρξης τρέχουσας κατάστασης.

Εάν ναι,

Βήμα 5.1. Διαπίστωση του εάν η τρέχουσα κατάσταση ταυτίζεται με την τελική κατάσταση.

Εάν ναι,

Μετάβαση στο **Βήμα 4** (προκειμένου να διαπιστωθεί αν υπάρχει και άλλος τρόπος μετάβασης στην τελική κατάσταση).

Εάν όχι,

Βήμα 5.1.1. Εφαρμογή των εφαρμόσιμων διαδικασιών επεξεργασίας στην τρέχουσα κατάσταση. Δημιουργία παρακλαδιών (ένα για κάθε εφαρμόσιμη διαδικασία επεξεργασίας), το καθένα από τα οποία εκφράζει μία νέα κατάσταση.

Βήμα 5.1.2. Εφαρμογή των διαδικασιών ελέγχου σε κάθε μία από τις νέες καταστάσεις. Διαγραφή νέων καταστάσεων οι οποίες δεν ικανοποιούν τις διαδικασίες ελέγχου. Μετάβαση στο **Βήμα 4**.

Εάν όχι,

Βήμα 5.2. Τέλος μεθόδου.

Το δένδρο αναζήτησης δημιουργείται από την πορεία προς τη λύση αφού παραληφθούν όλες οι μεταβάσεις που οδηγούν σε κύκλους ή μη επιτρεπτές καταστάσεις, δηλαδή διατηρώντας μόνο όσες ακολουθίες μεταβάσεων αποτελούν διαδρομές (δηλαδή αποτελούν επιλύσεις του προβλήματος). Επίσης μπορεί να δημιουργηθεί από το δίκτυο του προβλήματος, ξεκινώντας από την αρχική κατάσταση και προχωρώντας προς συνδεδεμένους κόμβους που δεν οδηγούν σε απαγορευμένη κατάσταση (**x** στο **Σχήμα 10**). Σημειώνεται ότι μόνο μία διέλευση από γραμμή του γράφου επιτρέπεται. Στο **Σχήμα 12** φαίνεται το δένδρο αναζήτησης (*search tree*) του προβλήματος. Είναι φανερό ότι υπάρχουν ακριβώς δύο επιλύσεις του προβλήματος, αποτελούμενες από επτά μεταβάσεις (οκτώ καταστάσεις) η καθεμία. Οι επιλύσεις έχουν κοινές τις πρώτες τρεις και τις τελευταίες τρεις καταστάσεις τους, άρα διαφέρουν κατά δύο καταστάσεις/μεταβάσεις. Επίσης στο δεξί μέρος του **Σχήματος 12** παρουσιάζονται οι δύο καταστάσεις οι οποίες δεν χρησιμοποιούνται ποτέ (αν και είναι επιτρεπτές) καθώς και οι τέσσερις απαγορευμένες καταστάσεις.

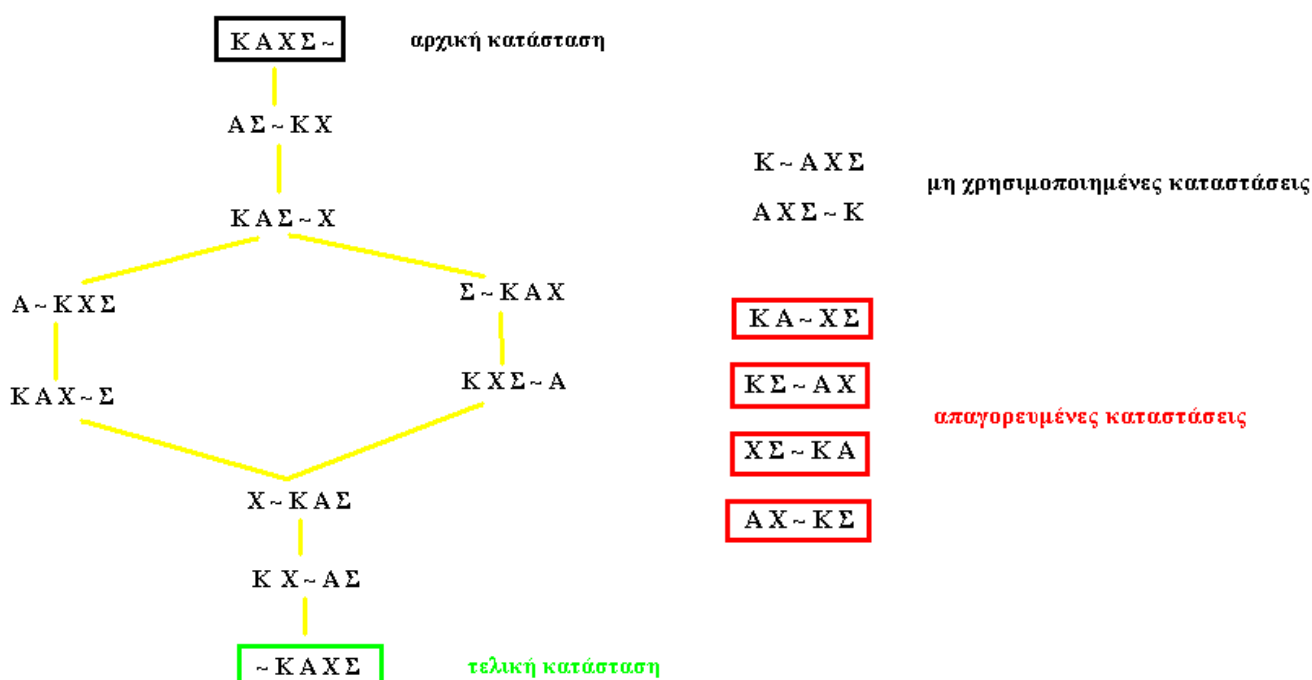
Με αυτόν τον τρόπο περιγράφεται μία μέθοδος επίλυσης προβλημάτων στην ΤΝ, η αναζήτηση, ως ακολουθία μεταβάσεων. Σημειώνεται πάντως ότι αυτή η περιγραφή δεν αποτελεί από μόνη της πρόγραμμα επίλυσης. Για τον προγραμματισμό στον Η/Υ απαιτούνται ακόμη:

(α) ένας τρόπος αποθήκευσης/χαρακτηρισμού καθώς και διαγραφής/αποχαρακτηρισμού μίας κατάστασης ως νέας,

(β) ένας τρόπος αποθήκευσης καταστάσεων ώστε να αναγνωρίζονται οι κύκλοι,

(γ) ένας τρόπος ελέγχου για ύπαρξη νέων καταστάσεων προκειμένου να εφαρμοστεί το **Βήμα 4**,

(δ) ένας τρόπος διατήρησης των παρακλαδιών που οδηγούν στην τελική κατάσταση (μια και ενδιαφέρει εξίσου η ακολουθία μεταβάσεων από την αρχική στην τελική λύση εξίσου με το αν υπάρχει λύση).



Σχήμα 12. Δένδρο αναζήτησης του προβλήματος – χαρακτηρισμός καταστάσεων.

Τα παραπάνω εκφράζονται από συμπληρωματικές διαδικασίες ελέγχου.

Σημειώνεται τέλος ότι κάθε διαδρομή μπορεί να χαρακτηρίζεται από ένα κόστος (*cost*). Αυτό μπορεί να αποδίδει τον αριθμό μεταβάσεων μέχρι την επίλυση (άρα πιο σύντομες διαδρομές είναι και πιο οικονομικές, δηλαδή έχουν μικρότερο κόστος) ή και τη δυνατότητα κάποιων μεταβάσεων να είναι πιο ακριβές από κάποιες άλλες. Στην περίπτωση ύπαρξης κόστους, ο σκοπός της αναζήτησης δεν είναι να προσδιοριστεί μία οποιαδήποτε επίλυση αλλά να βρεθεί η πιο οικονομική επίλυση (πχ. αυτή με τον μικρότερο αριθμό μεταβάσεων ή με το μικρότερο συνολικό κόστος).

3.1.2. Μέθοδοι αναζήτησης

Υπενθυμίζεται ότι ο στόχος της ΤΝ είναι (ιδιαίτερα σε πολύπλοκα προβλήματα) να ελαχιστοποιηθεί το κόστος της διαδρομής-επίλυσης. Έτσι, έχουν αναπτυχθεί διάφορες μέθοδοι αναζήτησης οι οποίες διαφέρουν στον τρόπο επιλογής της τρέχουσας κατάστασης στο **Βήμα 4** της παραγράφου 3.1. (και άρα στον τρόπο μετάβασης σε νέα κατάσταση)¹⁴. Διακριτικά χαρακτηριστικά των διάφορων μεθόδων αναζήτησης αποτελούν:

- (α) Εάν επιτυγχάνεται η εύρεση της πιο οικονομικής (βέλτιστης) λύσης (*optimal search*) ή απλά αναζητείται κάποια διαδρομή (*non-optimal search*).
- (β) Εάν η αναζήτηση πραγματοποιείται τυφλά (*blind search*) ή είναι καθοδηγούμενη (*informed search*), δηλαδή εάν η κάθε μετάβαση πραγματοποιείται ανεξάρτητα ή βάσει της ποιότητας της νέας κατάστασης (πόσο κοντύτερα εκτιμάται ότι η νέα κατάσταση πλησιάζει στην τελική κατάσταση) αντίστοιχα. Η τυφλή αναζήτηση είναι η πιο απλή: δεν εμπεριέχεται πληροφορία για τον χώρο του προβλήματος οπότε η μετάβαση γίνεται βάσει κάποιου συστηματικού κριτηρίου. Η καθοδηγούμενη αναζήτηση χρησιμοποιεί ευριστικές μεθόδους (*heuristics*) που αφορούν στην ποιότητα της μετάβασης.
- (γ) Εάν η μέθοδος είναι πλήρης (*complete*), δηλαδή εγγυάται ότι θα βρεθεί μία λύση, εφόσον υπάρχει.
- (δ) Εάν χρησιμοποιείται οπισθοδρόμηση σε περίπτωση μη εύρεσης λύσης.

Ο **Πίνακας 5** κατηγοριοποιεί τις διάφορες μεθόδους αναζήτησης βάσει των παραπάνω χαρακτηριστικών. Σημειώνεται ότι οι απαιτήσεις μνήμης και χρόνου έχουν υπολογιστεί για δένδρα αναζήτησης με *b* τον

¹⁴ Αυτό επιτυγχάνεται με κατάλληλες διαδικασίες ελέγχου.

μέσο αριθμό παρακλαδιών (*branching factor*) ανά κόμβο-κατάσταση, d το μέσο βάθος (*depth*) των παρακλαδιών, και e το μέσο βάθος από την αρχική στην τελική κατάσταση ($e \leq d$).

ΜΕΘΟΔΟΣ	ΒΕΛΤΙΣΤΗ	ΤΥΦΛΗ	ΠΛΗΡΗΣ	ΟΠΙΣΘΟ ΔΡΟΜΗΣΗ	ΜΝΗΜΗ	ΧΡΟΝΟΣ
Εξαντλητική	ναι	ναι	ναι	ναι	$O(bd)$ ή $O(b^d)$	$O(b^d)$
Σε βάθος	όχι	ναι	ναι	ναι	$O(be)$	$O(b^e)$
Σε πλάτος	όχι	ναι	ναι	ναι	$O(b^e)$	$O(b^e)$
Καλύτερη-πρώτα	όχι	όχι	ναι	ναι	-	-
Ακτινωτή	όχι	όχι	όχι	όχι	$O(bd)$	$O(bd)$
Αναρρίχηση	όχι	όχι	ναι	ναι	-	-
Περιορισμός παρακλαδιών	ναι	όχι	ναι	ναι	-	-
Περιορ. παρακλ. με υποεκτίμηση	ναι	όχι	ναι	ναι	-	-
Δυναμικός προγραμματισμός	ναι	όχι	ναι	ναι		
A^*	ναι	όχι	ναι	ναι	-	-

Πίνακας 5. Χαρακτηριστικά μεθόδων αναζήτησης.

Εξαντλητική (*British museum*)

Δημιουργούνται συστηματικά, αλλά ανεξάρτητα από την ποιότητας της μετάβασης, όλες οι δυνατές ακολουθίες μεταβάσεων που καταλήγουν είτε στην τελική κατάσταση είτε σε απαγορευμένη κατάσταση ή κύκλο¹⁵. Συνεπώς η εξαντλητική αναζήτηση είναι πλήρης (εντοπίζονται όλες οι λύσεις, εάν υπάρχουν). Επίσης είναι βέλτιστη μια και, μπορεί να επιλεχθεί η λύση με το μικρότερο κόστος. Παρ' όλα τα πλεονεκτήματά της, οι υψηλές απαιτήσεις μνήμης (για αποθήκευση όλων των δυνατών ακολουθιών μεταβάσεων) και ο μακρύς χρόνος αναζήτησης είναι καθαρά μειονεκτήματα της εξαντλητικής αναζήτησης, οπότε και μπορεί να παρατηρηθεί έκρηξη συνδυασμών, άρα αδυναμία του H/Y να παρακολουθήσει την αύξηση των παρακλαδιών μεταβάσεων στο δένδρο αναζήτησης. Αυτός είναι και ο βασικός λόγος που εξαντλητική αναζήτηση εφαρμόζεται μόνο εάν ο χώρος του προβλήματος είναι πολύ μικρός ή αν ζητούνται όλες οι δυνατές λύσεις του προβλήματος.

Σε βάθος (*depth first*)

Δημιουργούνται συστηματικά ακολουθίες μεταβάσεων οι οποίες συντίθενται από το ακρότερο (αριστερότερο ή δεξιότερο) μη εξερευνημένο παρακλάδι κάθε επιπέδου του δένδρου αναζήτησης. Εάν η ακολουθία καταλήγει σε απαγορευμένη κατάσταση ή κύκλο, πραγματοποιείται οπισθοδρόμηση από την τελευταία κατάσταση της ακολουθίας προς την αμέσως προηγούμενη κατάσταση (ένα επίπεδο προς τα επάνω) και μετάβαση σε άλλη νέα κατάσταση (το επόμενο ακρότερο και μη εξερευνημένο παρακλάδι ένα επίπεδο προς τα κάτω), από όπου συνεχίζεται η αναζήτηση. Η αναζήτηση τερματίζει στη πρώτη ακολουθία η οποία καταλήγει σε λύση. Εάν καμία ακολουθία δε καταλήξει σε λύση συμπεραίνεται ότι δεν υπάρχει λύση. Αυτός ο τρόπος αναζήτησης - αν και πλήρης - δεν βρίσκει αναγκαστικά την βέλτιστη λύση. Επιπλέον έχει σχετικά υψηλές απαιτήσεις μνήμης και χρόνου, ιδιαίτερα εάν το δένδρο αναζήτησης

¹⁵ Η συστηματική αναζήτηση επιτυγχάνεται χρησιμοποιώντας είτε αναζήτηση σε βάθος είτε σε πλάτος, αλλά χωρίς η αναζήτηση να τερματίζει στην περίπτωση εύρεσης λύσης παρά μόνο όταν έχουν εξερευνηθεί πλήρως όλες οι δυνατές ακολουθίες μεταβάσεων (βλ. **Σχήματα 10** και **11** μέχρι τις μεταβάσεις 29 και 48, αντίστοιχα).

δεν είναι ισορροπημένο (με κάποια παρακλάδια πολύ πιο μακριά από κάποια άλλα). Η αναζήτηση σε βάθος εκφράζεται ως εξής:

Βήμα 1. Δημιουργία μίας ουράς αποτελούμενης από την αρχική κατάσταση.

Βήμα 2. Διαπίστωση του εάν η ουρά είναι κενή η εάν η πρώτη κατάσταση της αποτελεί τελική κατάσταση.

Εάν όχι,

Βήμα 2.1. Αφαίρεση της πρώτης κατάστασης της ουράς. Προσθήκη καταστάσεων-παρακλαδιών της αφαιρούμενης κατάστασης στην αρχή της ουράς. Επιστροφή στο **Βήμα 2**.

Εάν ναι,

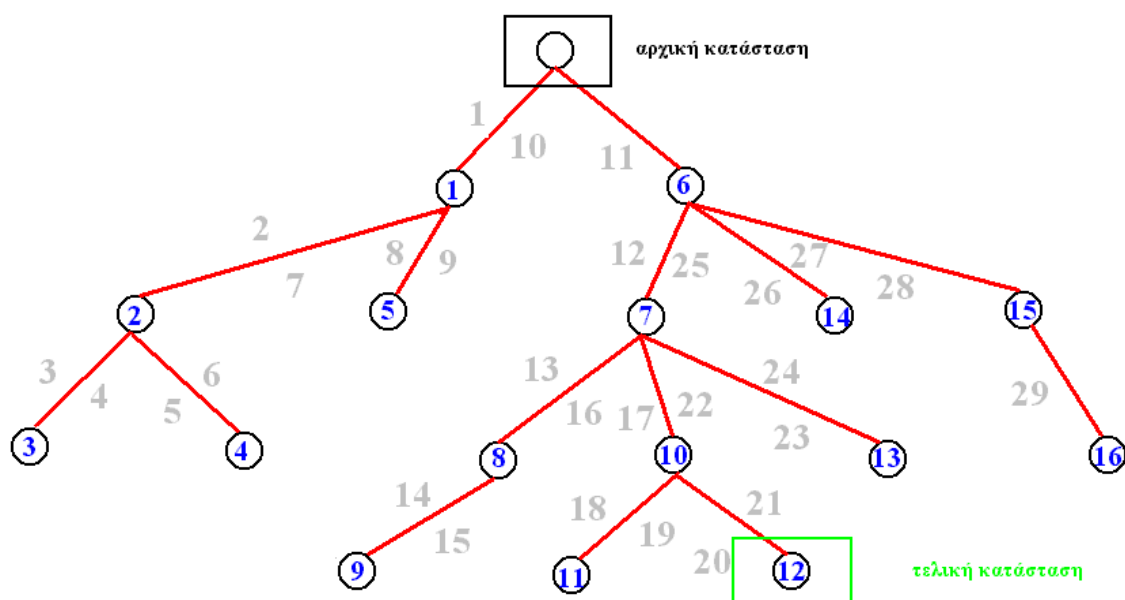
Βήμα 2.2. Τέλος μεθόδου. Διαπίστωση του εάν η πρώτη κατάσταση της ουράς αποτελεί τελική κατάσταση.

Εάν ναι,

Βήμα 2.2.1. Απόφαση ότι υπάρχει λύση.

Εάν όχι,

Βήμα 2.2.2. Απόφαση ότι δεν υπάρχει λύση.



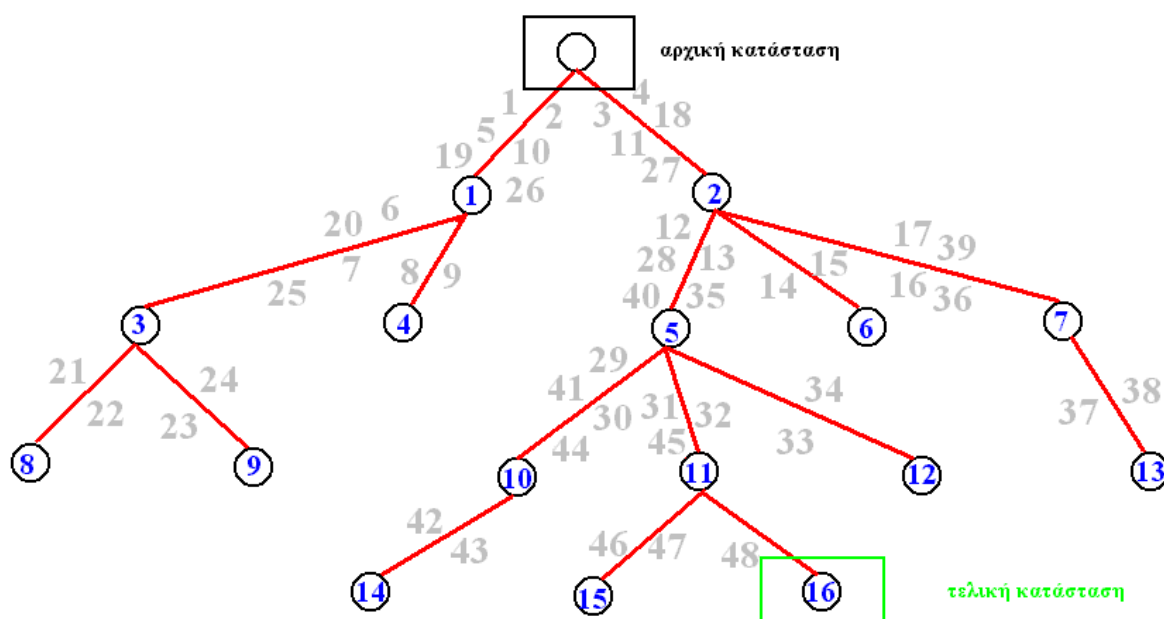
Σχήμα 13. Παράδειγμα αναζήτησης σε βάθος.

Ενα παράδειγμα της πορείας που ακολουθεί η αναζήτηση σε βάθος περιγράφεται στο **13**, όπου η σειρά εξερεύνησης των καταστάσεων φαίνεται μέσα στους κόμβους του δένδρου ενώ η σειρά των μεταβάσεων φαίνεται δίπλα στα παρακλάδια (μεταβάσεις 1-20 για την αναζήτηση σε βάθος και 1-29 για την εξαντλητική αναζήτηση μέσω αναζήτησης σε βάθος).

Σε πλάτος (breadth first)

Εξερευνώνται συστηματικά όλες οι μεταβάσεις-παρακλάδια ενός συγκεκριμένου επιπέδου (το οποίο αυξάνεται προοδευτικά προς τα κάτω από την αρχική κατάσταση) του δένδρου αναζήτησης. Εάν κάποια κατάσταση του συγκεκριμένου επιπέδου αποτελεί λύση η αναζήτηση τερματίζεται, αλλιώς η εξερεύνηση επαναλαμβάνεται για το επόμενο επίπεδο και μέχρις ότου εξαντληθούν τα επίπεδα του δένδρου αναζήτησης. Στην τελευταία περίπτωση συμπεραίνεται ότι δεν υπάρχει λύση. Αν και πλήρης, η αναζήτηση σε πλάτος έχει ιδιαίτερα υψηλές απαιτήσεις μνήμης και χώρου. Προτιμάται εάν το δένδρο αναζήτησης δεν είναι ισορροπημένο, αλλά είναι ιδιαίτερα δαπανηρή εάν όλες οι λύσεις βρίσκονται σε παρόμοια επίπεδα στο δένδρο αναζήτησης. Καθότι εντοπίζει τη λύση με τον μικρότερο αριθμό

μεταβάσεων, επιτυγχάνεται η βέλτιστη λύση σε περίπτωση μη ύπαρξης κόστους μεταβάσεων. Σημειώνεται όμως ότι σε κάθε άλλη περίπτωση δεν εντοπίζεται αναγκαστικά η βέλτιστη λύση. Η αναζήτηση σε πλάτος εκφράζεται ως εξής:



Σχήμα 14. Παράδειγμα αναζήτησης σε πλάτος.

Βήμα 1. Δημιουργία μίας ουράς αποτελούμενης από την αρχική κατάσταση.

Βήμα 2. Διαπίστωση του εάν η ουρά είναι κενή ή εάν η πρώτη κατάσταση της αποτελεί τελική κατάσταση.

Εάν όχι,

Βήμα 2.1. Αφαίρεση της πρώτης κατάστασης της ουράς. Προσθήκη καταστάσεων-παρακλαδιών της αφαιρούμενης κατάστασης στο τέλος της ουράς. Επιστροφή στο **Βήμα 2**.

Εάν ναι,

Βήμα 2.2. Τέλος μεθόδου. Διαπίστωση του εάν η πρώτη κατάσταση της ουράς αποτελεί τελική κατάσταση.

Εάν ναι,

Βήμα 2.2.1. Απόφαση ότι υπάρχει λύση.

Εάν όχι,

Βήμα 2.2.2. Απόφαση ότι δεν υπάρχει λύση.

Ενα παράδειγμα της πορείας που ακολουθεί η αναζήτηση σε βάθος περιγράφεται στο **Σχήμα 14**, όπου η σειρά εξερεύνησης των καταστάσεων φαίνεται μέσα στους κόμβους του δένδρου ενώ η σειρά των μεταβάσεων φαίνεται δίπλα στα παρακλάδια (μεταβάσεις 1-48 για την αναζήτηση σε πλάτος και 1-37 για την εξαντλητική αναζήτηση μέσω αναζήτησης σε πλάτος).

Η υπεροχή της αναζήτησης σε βάθος έναντι αναζήτησης σε πλάτος και αντίστροφα εξαρτάται από το πρόβλημα προς επίλυση:

± Αφενός η αναζήτηση σε βάθος συνήθως έχει μικρότερες απαιτήσεις μνήμης, καθώς καταγράφονται μόνο οι κόμβοι στο τρέχον παρακλάδι. Επιπλέον, και εφόσον υπάρχουν πολλές λύσεις σε παρόμοιο βάθος στο δένδρο, είναι δυνατό να βρεθεί η λύση με εξερεύνηση μικρού μόνο μέρους του δένδρου. Όμως, η αναζήτηση σε βάθος ενδέχεται να εξερευνά ένα παρακλάδι για πολύ χρόνο ενώ η επίλυση βρίσκεται σε πολύ μικρό βάθος αλλά σε άλλο τμήμα του δένδρου. Επίσης, μπορεί να

μην είναι κατάλληλη όταν υπάρχει μία μόνο λύση ή εφόσον ζητείται η λύση με τις λιγότερες μεταβάσεις (βέλτιστη εφόσον δεν υπάρχει αλλιώς ορισμένο κόστος διαδρομής).

± Αφετέρου η αναζήτηση σε πλάτος δεν δίνει προτεραιότητα στην εξερεύνηση παρακλαδιών μεγάλου βάθους όπου δεν βρίσκεται η λύση. Επιπλέον, πάντα βρίσκει τη η λύση με τις λιγότερες μεταβάσεις (βέλτιστη εφόσον δεν υπάρχει αλλιώς ορισμένο κόστος διαδρομής). Προτιμάται εφόσον ζητούνται οι συντομότερες λύσεις (πχ. μέχρι ορισμένο βάθος).

Λόγω του ότι οι προαναφερθείσες τρεις μέθοδοι αναζήτησης (**brute force search**) είναι εύκολο να καταλήξουν σε έκρηξη συνδυασμών - άρα δεν αποδίδουν σε πολύπλοκα προβλήματα με πολλές καταστάσεις - είναι απαραίτητος ο περιορισμός του χώρου αναζήτησης. Αυτό επιτυγχάνεται μέσω μεθόδων αναζήτησης οι οποίες θεωρούν ένα περιορισμένο αριθμό παρακλαδιών μόνο από κάθε υποψήφια κατάσταση, άρα μειώνουν μεν την πληρότητα της αναζήτησης αλλά αυξάνουν την αποτελεσματικότητά της ως προς το να βρίσκεται μια λύση σε ικανοποιητικό χρόνο. Προκειμένου η επίλυση να βρίσκεται ανάμεσα στα παρακλάδια τα οποία εξετάζονται (και όχι σε αυτά που απορρίπτονται) είναι απαραίτητη η χρήση ευριστικών μεθόδων. Οι καθοδηγούμενες μέθοδοι αναζήτησης είναι ιδιαίτερα κατάλληλες σε προβλήματα αναζήτησης όπου η τελική κατάσταση (ή οι τελικές καταστάσεις) δεν είναι γνωστή, οπότε στόχο αποτελεί η εύρεση μίας ικανοποιητικής λύσης σε περιορισμένο χρόνο.

Καλύτερη-πρώτα (*best first*)

Βασισμένη στην αναζήτηση σε βάθος, χρησιμοποιεί την παρακάτω ευριστική μέθοδο προκειμένου να μειώσει τις απαιτήσεις μνήμης και χώρου. Κατά τη συστηματική δημιουργία ακολουθιών μεταβάσεων, το επιλεγμένο παρακλάδι κάθε μετάβασης είναι αυτό που φέρνει την νέα κατάσταση πιο κοντά στην τελική κατάσταση (αντίθετα με την αναζήτηση σε βάθος, όπου είναι το επιλεγμένο παρακλάδι είναι απλά το ακρότερο και μη εξερευνημένο παρακλάδι). Αυτός ο τρόπος αναζήτησης είναι μεν πλήρης, αλλά δεν βρίσκει αναγκαστικά την βέλτιστη λύση. Οι απαιτήσεις μνήμης και χρόνου δεν είναι δυνατό να προσδιοριστούν μια και εξαρτώνται από το εκάστοτε πρόβλημα. Η καλύτερη-πρώτα αναζήτηση εκφράζεται ως εξής:

Βήμα 1. Δημιουργία μίας ουράς αποτελούμενης από την αρχική κατάσταση.

Βήμα 2. Διαπίστωση του εάν η ουρά είναι κενή η εάν η πρώτη κατάστασή της αποτελεί τελική κατάσταση.

Εάν όχι,

Βήμα 2.1. Αφαίρεση της πρώτης κατάστασης της ουράς. Προσθήκη καταστάσεων-παρακλαδιών της αφαιρούμενης κατάστασης στην ουρά. Ταξινόμηση όλων των καταστάσεων βάσει μικρότερης απόστασης από την τελική κατάσταση (εκτιμώμενης). Επιστροφή στο **Βήμα 2**.

Εάν ναι,

Βήμα 2.2. Τέλος μεθόδου. Διαπίστωση του εάν η πρώτη κατάσταση της ουράς αποτελεί τελική κατάσταση.

Εάν ναι,

Βήμα 2.2.1. Απόφαση ότι υπάρχει λύση.

Εάν όχι,

Βήμα 2.2.2. Απόφαση ότι δεν υπάρχει λύση.

Ακτινωτή (*beam*)

Βασισμένη στην αναζήτηση σε πλάτος, η διαφορά της από αυτή είναι ότι χρησιμοποιεί την παρακάτω ευριστική μέθοδο προκειμένου να αποφύγει την έκρηξη των παρακλαδιών στο δένδρο αναζήτησης. Εξερευνώνται συστηματικά οι καλύτερες (που φέρνουν τη νέα κατάσταση πιο κοντά στη λύση) n μεταβάσεις-παρακλάδια κάθε ενός επιπέδου του δένδρου, δημιουργώντας n υποψήφιες καταστάσεις-

λύσεις,. Η ακτινωτή αναζήτηση, αν και με χαμηλές απαιτήσεις μνήμης και χρόνου, δεν είναι πλήρης¹⁶ ούτε εγγυάται την εύρεση βέλτιστης λύσης. Εκφράζεται ως εξής:

Βήμα 1. Δημιουργία μίας ουράς αποτελούμενης από την αρχική κατάσταση.

Βήμα 2. Διαπίστωση του εάν η ουρά είναι κενή η εάν η πρώτη κατάστασή της αποτελεί τελική κατάσταση.

Εάν όχι,

Βήμα 2.1. Αφαίρεση όλων των καταστάσεων της ουράς. Προσθήκη καταστάσεων-παρακλαδιών όλων των αφαιρουμένων καταστάσεων. Ταξινόμηση καταστάσεων βάσει μικρότερης απόστασης από την τελική κατάσταση (εκτιμώμενης). Διατήρηση των n καλύτερων (πιο κοντινών στη λύση) καταστάσεων μόνο. Επιστροφή στο **Βήμα 2**.

Εάν ναι,

Βήμα 2.2. Τέλος μεθόδου. Διαπίστωση του εάν η πρώτη κατάσταση της ουράς αποτελεί τελική κατάσταση.

Εάν ναι,

Βήμα 2.2.1. Απόφαση ότι υπάρχει λύση.

Εάν όχι,

Βήμα 2.2.2. Απόφαση ότι δεν υπάρχει λύση.

Αναρρίχηση (hill climbing)

Βασισμένη στην αναζήτηση σε βάθος, χρησιμοποιεί την παρακάτω ευριστική μέθοδο προκειμένου να μειώσει τις απαιτήσεις μνήμης και χώρου. Κατά τη συστηματική δημιουργία ακολουθιών μεταβάσεων, το επιλεγμένο παρακλάδι κάθε μετάβασης είναι αυτό – μέσα από τα μη εξερευνημένα παρακλάδια του - το οποίο φέρνει την νέα κατάσταση πιο κοντά στην τελική κατάσταση (αντίθετα με την αναζήτηση σε βάθος, όπου είναι απλά το ακρότερο μη εξερευνημένο παρακλάδι). Αυτός ο τρόπος αναζήτησης είναι μεν πλήρης, αλλά δεν βρίσκει αναγκαστικά την βέλτιστη λύση. Οι απαιτήσεις της αναρρίχησης δεν είναι δυνατό να προσδιοριστούν μια και εξαρτώνται από το εκάστοτε πρόβλημα. Εκφράζεται ως εξής:

Βήμα 1. Δημιουργία μίας ουράς αποτελούμενης από την αρχική κατάσταση.

Βήμα 2. Διαπίστωση του εάν η ουρά είναι κενή η εάν η πρώτη κατάστασή της αποτελεί τελική κατάσταση.

Εάν όχι,

Βήμα 2.1. Αφαίρεση της πρώτης κατάστασης της ουράς. Προσθήκη καταστάσεων-παρακλαδιών της αφαιρούμενης κατάστασης, αφού ταξινομηθούν βάσει της μικρότερης απόστασης από την τελική κατάσταση (εκτιμώμενης), στην αρχή της ουράς. Επιστροφή στο **Βήμα 2**.

Εάν ναι,

Βήμα 2.2. Τέλος μεθόδου. Διαπίστωση του εάν η πρώτη κατάσταση της ουράς αποτελεί τελική κατάσταση.

Εάν ναι,

Βήμα 2.2.1. Απόφαση ότι υπάρχει λύση.

Εάν όχι,

Βήμα 2.2.2. Απόφαση ότι δεν υπάρχει λύση.

Μέσω περιορισμού παρακλαδιών (branch and bound)

Σε αντίθεση με τις προηγούμενες μεθόδους αναζήτησης, η αναζήτηση μέσω περιορισμού παρακλαδιών εξερευνά την εκάστοτε πιο οικονομική ακολουθία καταστάσεων (η οποία είναι γνωστή από το κόστος

¹⁶ Όπως φαίνεται και από τον αλγόριθμο, ενδέχεται κάποια κατάσταση η οποία οδηγεί στην τελική κατάσταση να διαγραφεί.

των μεταβάσεων της κάθε ακολουθίας) και όχι την καλύτερη εκτιμώμενη κατάσταση (ή καταστάσεις) βάσει της απόστασής τους από τη λύση. Έτσι, όχι μόνο διατηρεί της ακολουθίες της ακολουθίες μεταβάσεων οι οποίες χρήζουν περαιτέρω εξερεύνησης, αλλά πάντα αναπτύσσει την εκάστοτε πιο οικονομική ακολουθία μεταβάσεων. Λόγω του ότι αυτός ο τρόπος αναζήτησης τερματίζει όχι όταν βρεθεί μία λύση αλλά όταν η πιο οικονομική ακολουθία μεταβάσεων είναι λιγότερο οικονομική από την πιο οικονομική λύση, η αναζήτηση μέσω περιορισμού παρακλαδιών είναι πλήρης, εγγυάται την εύρεση βέλτιστης λύσης, ενώ οι απαιτήσεις της δεν είναι δυνατό να προσδιοριστούν μια και εξαρτώνται από το εκάστοτε πρόβλημα. Εκφράζεται ως εξής:

Βήμα 1. Δημιουργία μίας ουράς αποτελούμενης από την αρχική κατάσταση.

Βήμα 2. Διαπίστωση του εάν η ουρά είναι κενή η εάν η πρώτη κατάστασή της αποτελεί τελική κατάσταση.

Εάν όχι,

Βήμα 2.1. Αφαίρεση της πρώτης κατάστασης της ουράς. Προσθήκη των καταστάσεων-παρακλαδιών της αφαιρούμενης κατάστασης στην ουρά. Ταξινόμηση των καταστάσεων της ουράς βάσει του μικρότερου συνολικού κόστους τους (γνωστού). Επιστροφή στο **Βήμα 2**.

Εάν ναι,

Βήμα 2.2. Τέλος μεθόδου. Διαπίστωση του εάν η πρώτη κατάσταση της ουράς αποτελεί τελική κατάσταση.

Εάν ναι,

Βήμα 2.2.1. Απόφαση ότι υπάρχει λύση.

Εάν όχι,

Βήμα 2.2.2. Απόφαση ότι δεν υπάρχει λύση.

Μέσω περιορισμού παρακλαδιών με υποεκτίμηση (*branch and bound with underestimates*)

Η αναζήτηση μέσω περιορισμού παρακλαδιών με υποεκτίμηση συνδυάζει την καλύτερη-πρώτα αναζήτηση με την αναζήτηση μέσω περιορισμού παρακλαδιών. Είναι πλήρης, εγγυάται την εύρεση βέλτιστης λύσης, αλλά οι απαιτήσεις της δεν είναι δυνατό να προσδιοριστούν μια και εξαρτώνται από το εκάστοτε πρόβλημα. Η αναζήτηση μέσω περιορισμού παρακλαδιών με υποεκτίμηση εκφράζεται ως εξής:

Βήμα 1. Δημιουργία μίας ουράς αποτελούμενης από την αρχική κατάσταση.

Βήμα 2. Διαπίστωση του εάν η ακολουθία είναι κενή η εάν η πρώτη κατάστασή της αποτελεί τελική κατάσταση.

Εάν όχι,

Βήμα 2.1. Αφαίρεση της πρώτης κατάστασης της ουράς. Προσθήκη των καταστάσεων-παρακλαδιών της αφαιρούμενης κατάστασης στην ουρά. Ταξινόμηση των καταστάσεων της ουράς βάσει του μικρότερου συνολικού κόστους (γνωστού) καθώς και βάσει της μικρότερης απόστασης από την τελική κατάσταση (εκτιμώμενης). Επιστροφή στο **Βήμα 2**.

Εάν ναι,

Βήμα 2.2. Τέλος μεθόδου. Διαπίστωση του εάν η πρώτη κατάσταση της ουράς αποτελεί τελική κατάσταση.

Εάν ναι,

Βήμα 2.2.1. Απόφαση ότι υπάρχει λύση.

Εάν όχι,

Βήμα 2.2.2. Απόφαση ότι δεν υπάρχει λύση.

Δυναμικός προγραμματισμός

Η αναζήτηση μέσω δυναμικού προγραμματισμού (*dynamic programming*) συμπληρώνει την αναζήτηση μέσω περιορισμού παρακλαδιών. Ο δυναμικός προγραμματισμός βασίζεται στο γεγονός ότι η καλύτερη

ακολουθία μεταβάσεων μέσω μίας συγκεκριμένης κατάστασης είναι αυτή η οποία περιλαμβάνει την πιο οικονομική ακολουθία μεταβάσεων από την αρχική στη συγκεκριμένη κατάσταση (γνωστή), ακολουθούμενη από την πιο οικονομική ακολουθία μεταβάσεων από τη συγκεκριμένη στην επόμενη κατάσταση (εκτιμώμενη). Η αναζήτηση μέσω δυναμικού προγραμματισμού είναι πλήρης, εγγυάται την εύρεση βέλτιστης λύσης, ενώ οι απαιτήσεις της δεν είναι δυνατό να προσδιοριστούν μια και εξαρτώνται από το εκάστοτε πρόβλημα. Πάντως η διαγραφή ακολουθιών μεταβάσεων με ίδια αρχική κατάσταση και ίδια την επόμενη της συγκεκριμένης κατάστασης μειώνει τις απαιτήσεις μνήμης καθώς και χρόνου. Είναι ιδιαίτερα αποδοτική όταν πολλές ακολουθίες μεταβάσεων καταλήγουν στην ίδια (ενδιάμεση) κατάσταση. Εκφράζεται ως εξής:

Βήμα 1. Δημιουργία μίας ουράς αποτελούμενης από την αρχική κατάσταση.

Βήμα 2. Διαπίστωση του εάν η ουρά είναι κενή η εάν η πρώτη κατάστασή της αποτελεί τελική κατάσταση.

Εάν όχι,

Βήμα 2.1. Αφαίρεση της πρώτης κατάστασης της ουράς. Προσθήκη των καταστάσεων-παρακλαδιών της αφαιρούμενης κατάστασης στην ουρά. Ταξινόμηση των καταστάσεων της ουράς βάσει του μικρότερου συνολικού κόστους. Σε περίπτωση που μία κατάσταση-παρακλάδι επιτυγχάνεται μέσω διαφορετικών μεταβάσεων, διαγραφή όλων πλην αυτής με το μικρότερο κόστος. Επιστροφή στο **Βήμα 2**.

Εάν ναι,

Βήμα 2.2. Τέλος μεθόδου. Διαπίστωση του εάν η πρώτη κατάσταση της ουράς αποτελεί τελική κατάσταση.

Εάν ναι,

Βήμα 2.2.1. Απόφαση ότι υπάρχει λύση.

Εάν όχι,

Βήμα 2.2.2. Απόφαση ότι δεν υπάρχει λύση.

A*

Η αναζήτηση A* συνδυάζει την αναζήτηση μέσω περιορισμού παρακλαδιών με υποεκτίμηση και τον δυναμικό προγραμματισμό, άρα είναι ιδιαίτερα αποδοτική όταν και οι δύο αυτές μέθοδοι είναι αποδοτικές. Είναι πλήρης, εγγυάται την εύρεση βέλτιστης λύσης, ενώ οι απαιτήσεις της δεν είναι δυνατό να προσδιοριστούν μια και εξαρτώνται από το εκάστοτε πρόβλημα. Εκφράζεται ως εξής:

Βήμα 1. Δημιουργία μίας ουράς αποτελούμενης από την αρχική κατάσταση.

Βήμα 2. Διαπίστωση του εάν η ουρά είναι κενή η εάν η πρώτη κατάστασή της αποτελεί τελική κατάσταση.

Εάν όχι,

Βήμα 2.1. Αφαίρεση της πρώτης κατάστασης της ουράς. Προσθήκη των καταστάσεων-παρακλαδιών της αφαιρούμενης κατάστασης στην ουρά. Σε περίπτωση που μία κατάσταση-παρακλάδι επιτυγχάνεται μέσω διαφορετικών μεταβάσεων, διαγραφή όλων πλην αυτής με το μικρότερο κόστος. Ταξινόμηση των καταστάσεων της ουράς βάσει του μικρότερου συνολικού κόστους (γνωστού) καθώς και βάσει της μικρότερης απόστασης από την τελική κατάσταση (εκτιμώμενης). Επιστροφή στο **Βήμα 2**.

Εάν ναι,

Βήμα 2.2. Τέλος μεθόδου. Διαπίστωση του εάν η πρώτη κατάσταση της ουράς αποτελεί τελική κατάσταση.

Εάν ναι,

Βήμα 2.2.1. Απόφαση ότι υπάρχει λύση.

Εάν όχι,

Βήμα 2.2.2. Απόφαση ότι δεν υπάρχει λύση.

3.2. ΕΠΙΛΥΣΗ ΩΣ ΑΝΑΛΥΣΗ ΚΑΙ ΙΚΑΝΟΠΟΙΗΣΗ ΠΕΡΙΟΡΙΣΜΩΝ

Κάθε σύστημα επιδεικνύει περιορισμούς: τα τμήματά του σχετίζονται (συναρμολογούνται) μέσω καλά καθορισμένων σχέσεων. Έτσι, αν μέσω της ανάλυσης ενός συστήματος είναι δυνατό να καταστεί γνωστό ακριβώς το πώς τα τμήματά του επιτρέπεται να σχετίζονται, τότε αυτή η γνώση μπορεί να χρησιμοποιηθεί ώστε να επιτρέψει αφενός τη συναρμολόγηση ενός νέου συστήματος και αφετέρου την διαπίστωση του εάν ένα συγκεκριμένο σύστημα είναι κατασκευασμένο βάσει των επιτρεπτών σχέσεων (και άρα ανήκει στην κατηγορία συστημάτων που διέπονται από τους ίδιους περιορισμούς).

Για συστήματα που συναρμολογούνται σύμφωνα με καλά καθορισμένες όσο περισσότερα τμήματα συνδυάζονται τόσο αυξάνονται οι περιορισμοί σχετικά με το πώς μπορούν να συναρμολογηθούν τα υπόλοιπα τμήματα. Μάλιστα, αυτά ενδέχεται να μην μπορούν να συναρμολογηθούν, οπότε πρέπει να αποσυναρμολογηθούν κάποια ήδη συναρμολογημένα τμήματα και να δοκιμαστεί εκ νέου η συναρμολόγηση. Με άλλα λόγια, ακόμα και εάν και η λύση επιμέρους προβλημάτων είναι εύκολη, ο συνδυασμός των επιλύσεων μπορεί να μην είναι εφικτός ως λύση του συνολικού προβλήματος.

Έτσι, ενώ μία συλλογή τμημάτων φαινομενικά προσφέρει άπειρες δυνατότητες για τη δημιουργία μίας κατηγορίας συστημάτων, οι περιορισμοί μειώνουν σημαντικά τον αριθμό συστημάτων που δύνανται να συναρμολογηθούν. Παραδείγματα ικανοποίησης περιορισμών αποτελούν:

- Η συναρμολόγηση ενός ρολογιού.
- Το κόλλημα ενός σπασμένου πιάτου.
- Η συμπλήρωση ενός σταυρολέξου.
- Η αναγνώριση σχεδιαγραμμάτων τα οποία περιγράφουν γενικές όψεις αδιαφανών στερεών με επίπεδες πλευρές λευκού χρώματος, όπου ακριβώς τρεις έδρες και τρεις ακμές συναντώνται ώστε να δημιουργήσουν μία κορυφή. Ο φωτισμός είναι ομοιόμορφος ώστε να μην δημιουργούνται σκιάς, ενώ δεν επιτρέπονται ρωγμές ή άλλες χαρακτηριστικές γραμμώσεις στις επιφάνειες¹⁷.

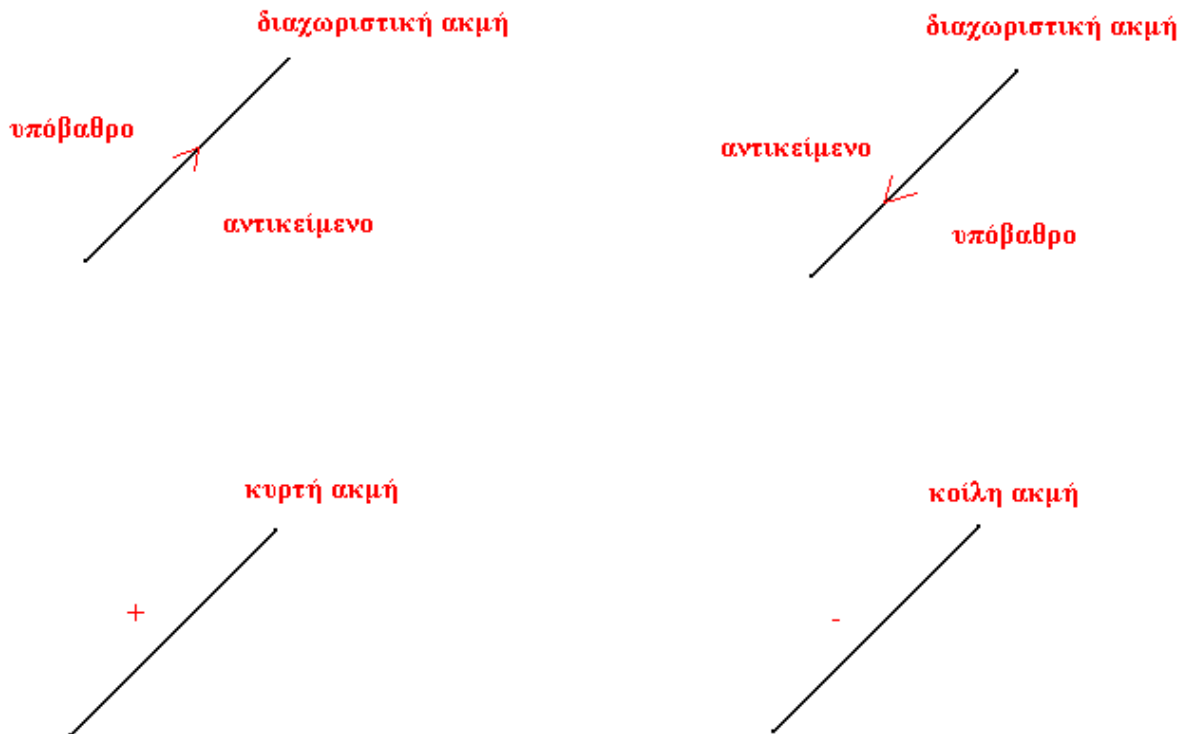
Το τελευταίο αποτελεί το παράδειγμα που θα χρησιμοποιηθεί προκειμένου να γίνει φανερή η ανάλυση και η ικανοποίηση περιορισμών ενός συστήματος. Η ανάλυση τέτοιων σχεδιαγραμμάτων φανερώνει τα εξής:

- 1) Οι γραμμές απαντώνται μόνο σε μερικούς τύπους, δηλαδή αναπαριστούν τους τέσσερις τύπους ακμών του **Σχήματος 15**. Αυτοί οι τύποι εκφράζουν εάν η αντίστοιχη ακμή φανερώνει πλευρές του ίδιου αντικειμένου που συναντώνται σχηματίζοντας είτε κυρτότητα είτε κοιλότητα ή εάν η αντίστοιχη ακμή φανερώνει μία πλευρά του αντικειμένου και το υπόβαθρο.
- 2) Οι κορυφές απαντώνται μόνο στους τέσσερις τύπους του **Σχήματος 16**. Αυτοί οι τύποι καθορίζονται από τον αριθμό των γραμμών που αντιστοιχούν στις ορατές ακμές καθώς και από τα γεωμετρικά χαρακτηριστικά (γωνίες) που αυτές σχηματίζουν.
- 3) Ο χαρακτηρισμός του τύπου των γραμμών των κορυφών δημιουργείται από τους (λίγους) επιτρεπτούς συνδυασμούς των τύπων του **Σχήματος 15** για κάθε τύπο κορυφής του **Σχήματος 16**. Είναι δυνατόν μόνο οι 18 χαρακτηρισμοί του **Σχήματος 17** έναντι των συνδυαστικά δυνατών $4^2 + 4^3 + 4^3 + 4^3 = 208$ (για Γ, Υ, Τ και Β τύπους κορυφών, αντίστοιχα).

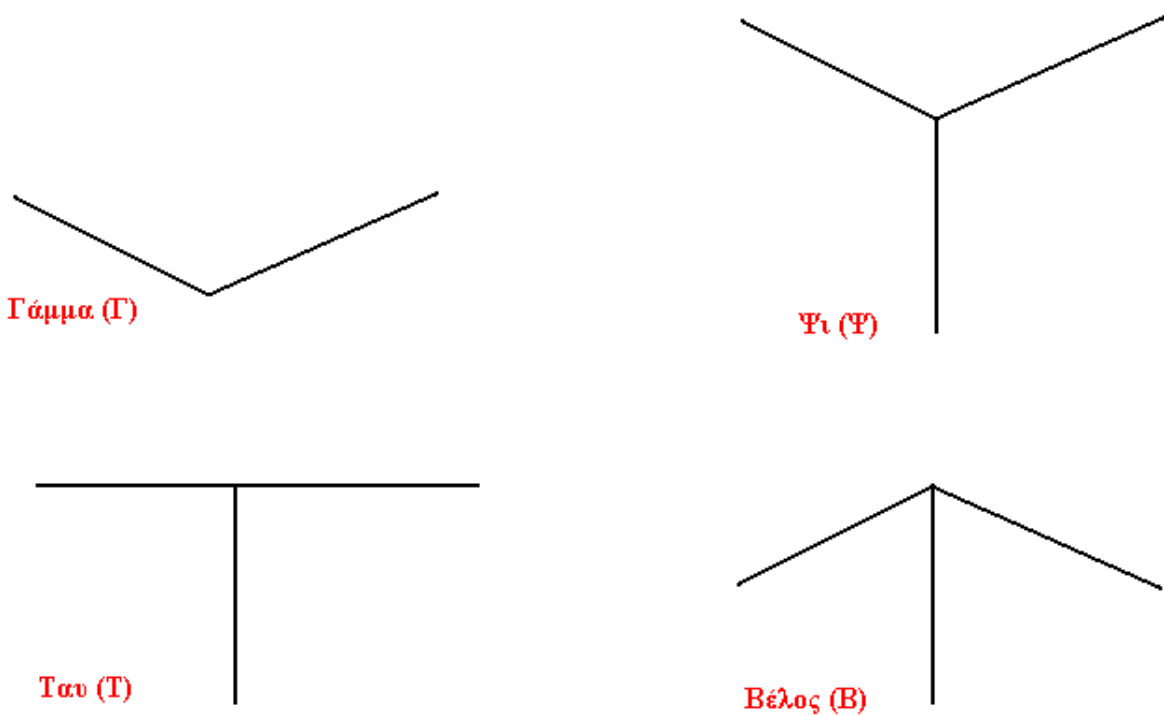
Έτσι, εάν είναι δυνατός (α) ο χαρακτηρισμός όλων των γραμμών ενός σχεδιαγράμματος σύμφωνα με τον τύπο τους όπως αυτός δίνεται και από τις δύο συνδεδεμένες κορυφές καθώς και (β) ο χαρακτηρισμός όλων των κορυφών έτσι ώστε κάθε κορυφή να λαμβάνει έναν χαρακτηρισμό σύμφωνα με τον τύπο της, τότε είναι δυνατόν να χρησιμοποιηθεί αυτή η γνώση για την αναγνώριση της δομής των αντικειμένων που απεικονίζονται στο σχεδιάγραμμα, για τον διαχωρισμό των αντικειμένων που απεικονίζονται μαζί, καθώς και για την ανίχνευση αντικειμένων τα οποία δεν είναι δυνατόν να κατασκευαστούν στις τρεις διαστάσεις. Ο χαρακτηρισμός των κορυφών και των γραμμών ενός σχεδιαγράμματος πραγματοποιείται μέσω της διάδοσης και ικανοποίησης περιορισμών (τύπων γραμμών και κορυφών) έτσι ώστε να ικανοποιούνται τα (α) και (β). Η τεχνική διάδοσης και ικανοποίησης περιορισμών είναι ιδιαίτερα

¹⁷ Αυτές οι προδιαγραφές αποτελούν μία περιορισμένη έκφραση του μικροκόσμου των κύβων. Όπως θα φανεί στα επόμενα, σε ένα τόσο περιορισμένο πρόβλημα, η επίλυση είναι δυσανάλογα πολύπλοκη και - αν και οι πολλαπλοί του περιορισμοί μειώνουν το πρόβλημα της έκρηξης των συνδυασμών - παρουσιάζει δυσανάλογα μεγάλες απαιτήσεις μνήμης και χρόνου.

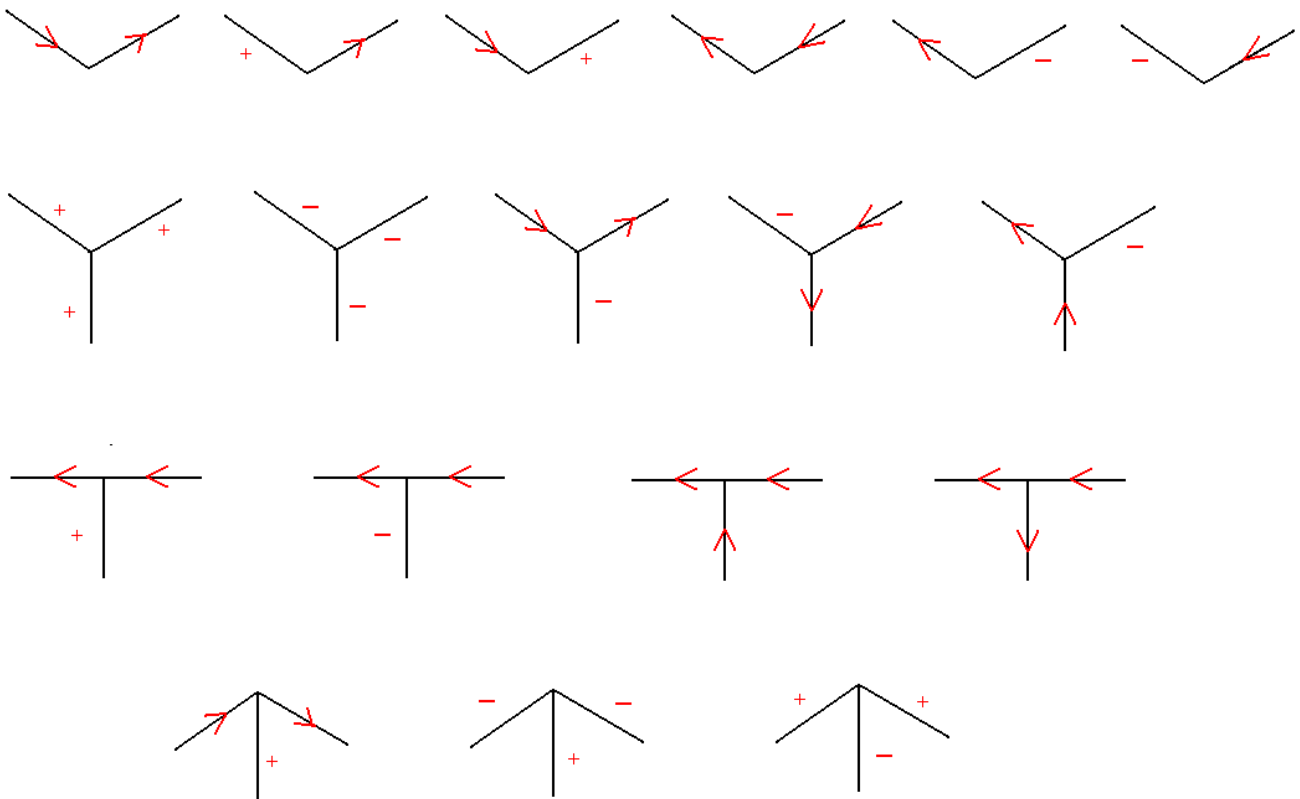
σημαντική στην επίλυση καθημερινών προβλημάτων όπου μια μικρή αλλαγή μπορεί να επιφέρει σημαντικές αλλαγές. Η ικανοποίηση περιορισμών εκφράζεται ως εξής (αλγόριθμος του Waltz (1972)):



Σχήμα 15. Τύποι γραμμών



Σχήμα 16. Τύποι κορυφών



Σχήμα 17. Χαρακτηρισμοί κορυφών

Βήμα 1. Για κάθε κορυφή του σχεδιαγράμματος:

Βήμα 1.1. Χαρακτηρισμός του τύπου της κορυφής (ένας από τους τέσσερις τύπους του Σχήματος 16).

Βήμα 1.2. Δημιουργία συνόλου με μέλη όλους τους χαρακτηρισμούς κορυφών (Σχήμα 17) που συμφωνούν με τον τύπο της κορυφής.

Βήμα 2. Δημιουργία ουράς με στοιχεία της τις κορυφές του σχεδιαγράμματος.

Βήμα 3. Ελεγχος του ότι η ουρά δεν είναι κενή.

Εάν ναι,

Βήμα 3.1. Επιλογή της πρώτης κορυφής (τρέχουσας κορυφής) από την ουρά. Για κάθε κορυφή που είναι συνδεδεμένη με την τρέχουσα κορυφή, έλεγχος του εάν κάποιοι χαρακτηρισμοί της τρέχουσας κορυφής είναι μη συμβατοί με όλους τους χαρακτηρισμούς της συνδεδεμένης κορυφής.

Εάν ναι,

Βήμα 2.1.1. Αφαίρεση των μη συμβατών χαρακτηρισμών από το σύνολο της τρέχουσας κορυφής. Ελεγχος του εάν το σύνολο χαρακτηρισμών της τρέχουσας κορυφής δεν είναι κενό.

Εάν ναι,

Βήμα 2.1.1.1. Τοποθέτηση της τρέχουσας κορυφής και όλων των συνδεδεμένων κορυφών στην αρχή της ουράς.

Εάν όχι,

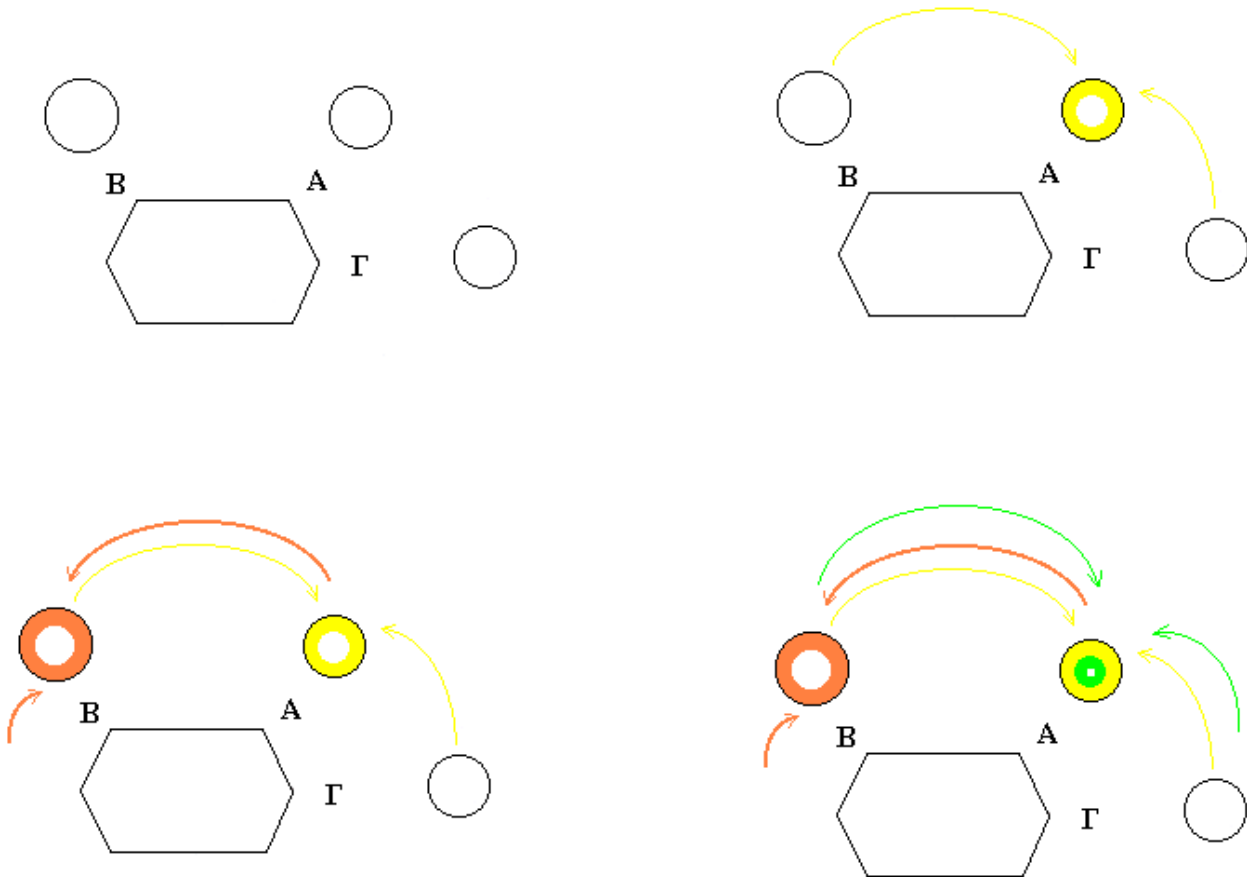
Βήμα 2.1.1.2. Τέλος μεθόδου. Απόφαση ότι ο συμβατός χαρακτηρισμός όλων των κορυφών δεν είναι εφικτός.

Εάν όχι,

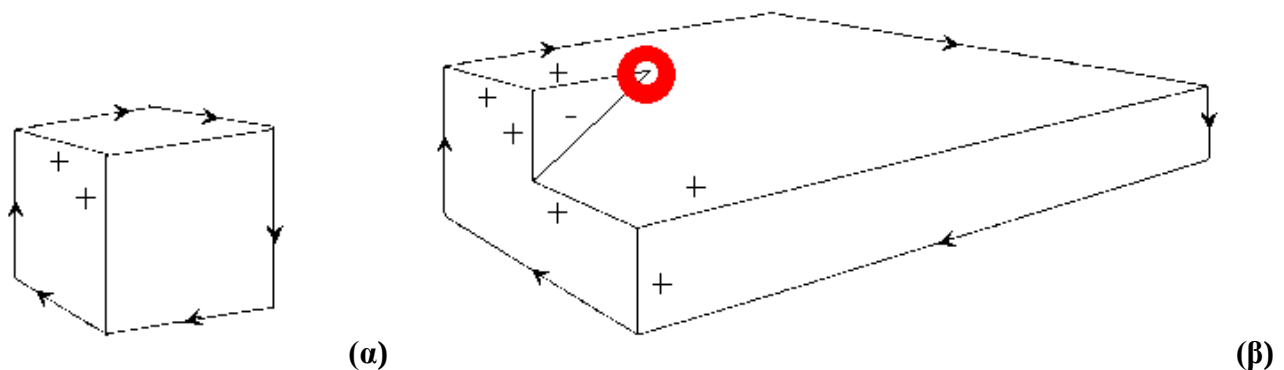
Βήμα 2.1.2. Αφαίρεση της τρέχουσας κορυφής από την ουρά.

Εάν όχι,

Βήμα 2.2. Τέλος μεθόδου, με επίδειξη των συμβατών χαρακτηρισμών για κάθε κορυφή. Η ύπαρξη περισσότερων από ενός χαρακτηρισμού για κάποιες κορυφές δίνει εναλλακτικούς τρόπους αναγνώρισης των αντικειμένων του σχεδιαγράμματος.



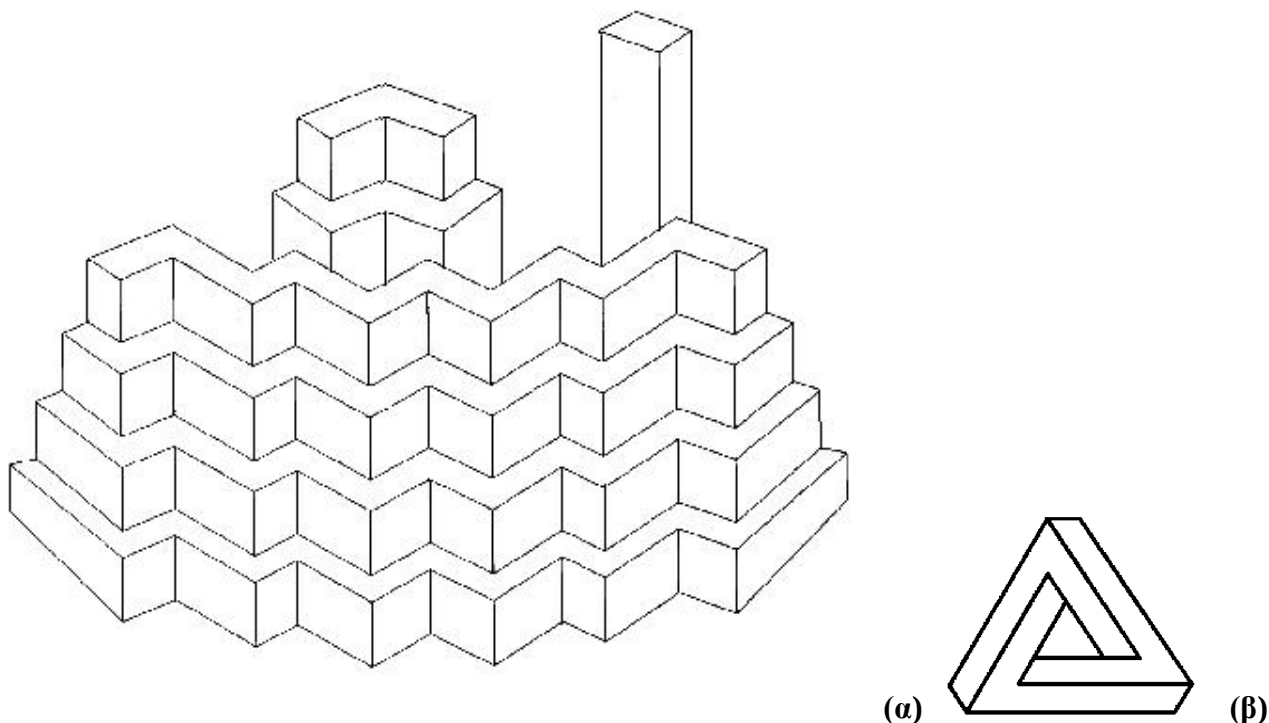
Σχήμα 18. Ικανοποίηση περιορισμών.



Σχήμα 19. Χαρακτηρισμός κορυφών – αναγνώριση σχεδιαγραμμάτων.

Η παραπάνω μέθοδος ικανοποίησης περιορισμών και διαδοχικών ελαττώσεων των αντίστοιχων συνόλων χαρακτηρισμών κορυφών φαίνεται στο **Σχήμα 18**, με σειρά επισκέψεων των κορυφών **A, B, A**. Επίσης

τα **Σχήματα 19(α-β)** δείχνουν περιπτώσεις επιτυχούς χαρακτηρισμού σχεδιαγράμματος καθώς και μη εφικτού συμβατού χαρακτηρισμού όλων των γραμμών του σχεδιαγράμματος, αντίστοιχα. Προκειμένου να μειωθούν οι απαιτήσεις μνήμης και χρόνου της μεθόδου, είθισται ο εξαρχής καθορισμός των γραμμών που περιβάλλουν το σχεδιάγραμμα ως εξωτερικών και ο χαρακτηρισμός τους ως



Σχήμα 20. Παραδείγματα σχεδιαγραμμάτων που αναγνωρίζονται εύκολα μέσω της ικανοποίησης περιορισμών.

διαχωριστικών ακμών (**Σχήμα 15**), γεγονός το οποίο μειώνει και απλοποιεί κατά πολύ τα βήματα της μεθόδου. Έτσι, ο αλγόριθμος του Waltz δύναται να αναγνωρίσει τη δομή του ιδιαίτερα πολύπλοκου αντικειμένου (ή τριών αντικειμένων;) που αναπαριστώνται στο **Σχήμα 20(α)** καθώς και να διαπιστώσει ότι το αντικείμενο του **Σχήματος 20(β)** δεν είναι κατασκευάσιμο στις τρεις διαστάσεις (**Βήμα 2.2.2.1.** της παραπάνω μεθόδου).

Σημειώνεται ότι η άρση των περιορισμών που αφορούν στον φωτισμό (πχ. εφόσον δημιουργούνται σκιές), στην ύπαρξη ρωγμών ή στην σύμπτωση περισσοτέρων των τριών ακμών για τη δημιουργία κορυφών κλπ., προκαλεί σημαντική αύξηση των επιτρεπτών τύπων κορυφών (περίπου 50) καθώς και των χαρακτηρισμών τους (περίπου 1900). Έτσι, παρατηρείται και πάλι το πρόβλημα της επέκτασης της μεθόδου σε χώρους προβλημάτων πέρα του μικροκόσμου των κύβων (έκρηξη συνδυασμών κλπ).

Τέλος, πρέπει να τονιστεί και πάλι η διαφορά ΦΝ και ΤΝ. Ένα παράδειγμα δίνεται στο **Σχήμα 21**, το οποίο αντιστοιχεί σε μη κατασκευάσιμο αντικείμενο. Ένα ΤΝ σύστημα ικανοποίησης περιορισμών θα ήταν δυνατόν εύκολα να διακρίνει το ότι η δομή του πύργου είναι τέτοια που δεν είναι κατασκευάσιμη στις τρεις διαστάσεις, αλλά θα είχε δυσκολία να δημιουργήσει το σχεδιάγραμμα του πύργου αφού το ξεχωρίσει από τα άλλα αντικείμενα (βουνά, ανθρώπους κλπ.) του σχεδίου. Σε αντίθεση, η ΦΝ εύκολα ξεχωρίζει τον πύργο, τους ανθρώπους, τα βουνά κλπ. και τα αναγνωρίζει ως τέτοια, αλλά θα ήταν σχεδόν αδύνατο να αναγνωρίσει τη μη κατασκευασιμότητα του πύργου.

3.3. ΑΝΑΦΟΡΕΣ

1. Waltz D., 1975. Understanding line drawings of scenes with shadows, in **The Psychology of Computer Vision** (P.H.Winston ed.), McGraw-Hill: New York, U.S.A.



Σχήμα 21. Επίδειξη της διαφοράς ΦΝ και ΤΝ για τον διαχωρισμό και την αναγνώριση αντικειμένων.



ΛΟΓΙΚΗ & ΓΝΩΣΗ



Πανεπιστήμιο Πειραιώς
Τμήμα Μηχανικής Διοίκησης και Τεχνολογίας
Διαχείριση Πληροφοριών και Γλώσσες Προγραμματισμού



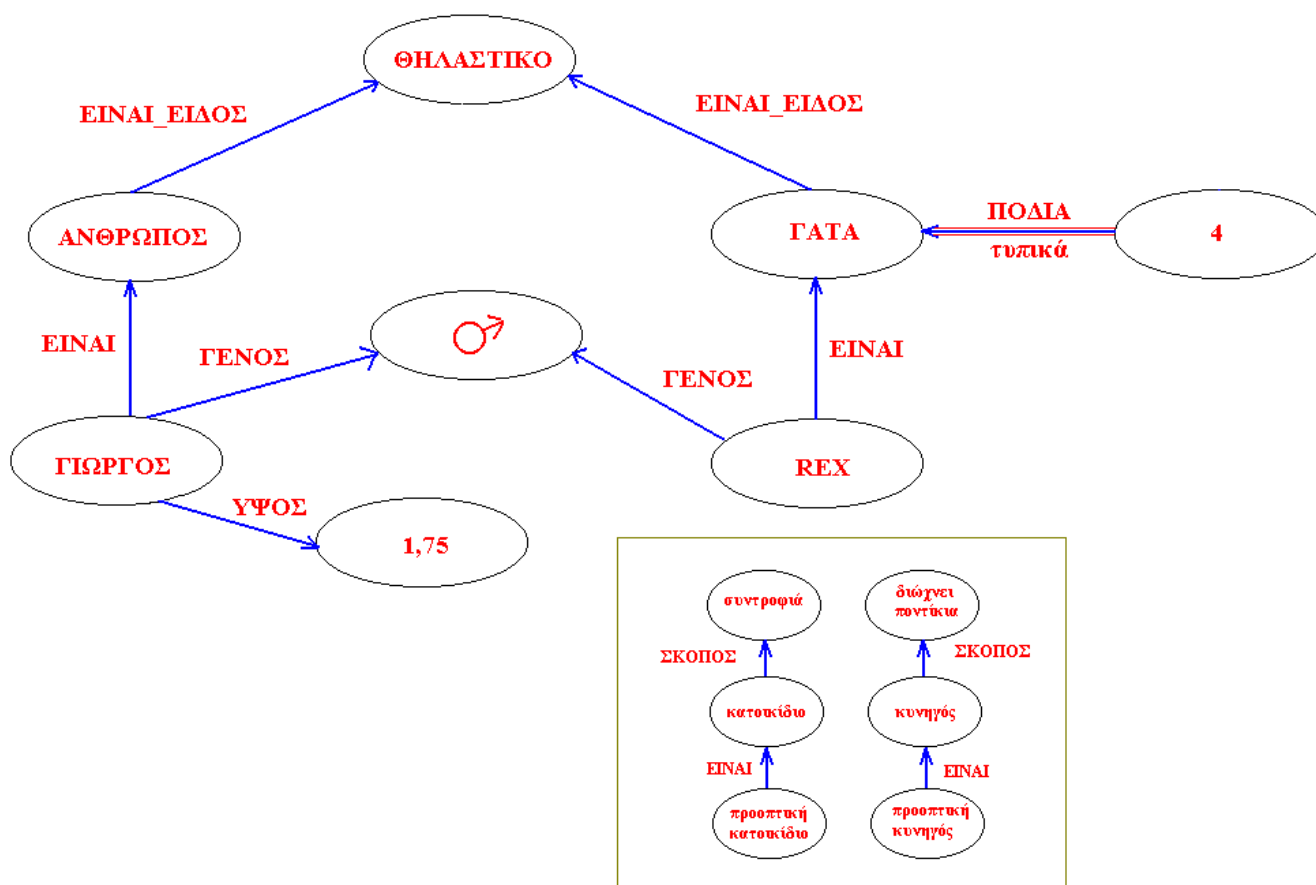
4. ΧΡΗΣΗ ΛΟΓΙΚΗΣ ΓΙΑ ΤΗΝ ΕΠΙΛΥΣΗ ΠΡΟΒΛΗΜΑΤΩΝ

Οι μορφές της λογικής οι οποίες περιγράφονται στην παράγραφο 2.3, και ιδιαίτερα η κατηγορική λογική, έχουν σημαντικές εφαρμογές στην υλοποίηση της καθημερινής γνώσης καθώς και στη συλλογιστική (*reasoning*). Για τον ίδιο σκοπό έχουν μάλιστα αναπτυχθεί γλώσσες λογικού προγραμματισμού (*logic programming*) οι οποίες είναι ιδιαίτερα κατάλληλες για την υλοποίηση αυτών των συστημάτων, υιοθετώντας ως δομή τους το τρόπο αναπαράστασης και σύνταξης (όρους και κατηγορήματα) της κατηγορικής λογικής. Οι δύο βασικότερες από αυτές της γλώσσες είναι η LISP και η PROLOG, οι οποίες λειτουργούν βασικά μέσω συμπλήρωσης/ταύτισης όρων στα κατηγορήματά τους.

4.1. ΚΑΘΗΜΕΡΙΝΗ ΓΝΩΣΗ

4.1.1. Σημασιολογικά δίκτυα (*semantic nets*)

Τα δίκτυα αυτά αποτελούν σχηματικό τρόπο έκφρασης των σχέσεων μεταξύ ομάδων αντικειμένων, αντικειμένων και χαρακτηριστικών τους. Οι ομάδες, τα αντικείμενα και τα χαρακτηριστικά τους αναπαριστώνται από κόμβους, ενώ οι σχέσεις μεταξύ τους εκφράζονται από κατευθυνόμενες ενώσεις μεταξύ των αντίστοιχων κόμβων. Ένα παράδειγμα δίνεται στο **Σχήμα 22**, για τις σχέσεις που περιγράφονται από το κείμενο: "Ο άνθρωπος είναι θηλαστικό. Ο Γιώργος είναι άνδρας και έχει ύψος 1,75. Η γάτα είναι θηλαστικό και τυπικά έχει τέσσερα πόδια. Ο Rex είναι γάτος. Ως κατοικίδιο, σκοπός του Rex είναι να διώχνει τα ποντίκια."



Σχήμα 22. Σημασιολογικό δίκτυο.

Κλασσικοί μηχανισμοί αναπαράστασης σχέσεων στα σημασιολογικά δίκτυα αποτελούν:

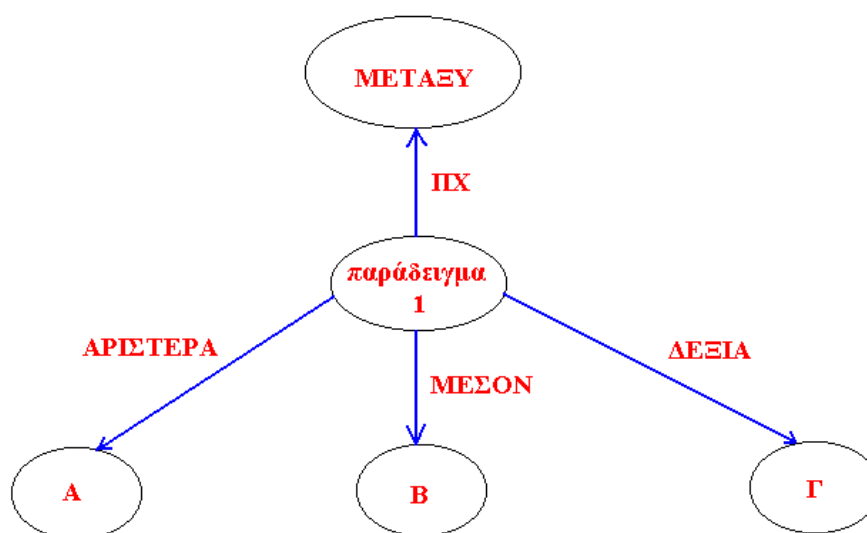
(α) Κληρονομικότητα. Η γνώση η σχετική με τα χαρακτηριστικά μίας ομάδας αντικειμένων χρησιμοποιείται για τη γνώση σχετικά με τα αντικείμενα της ομάδας. Για παράδειγμα, στο **Σχήμα 22** γίνεται φανερό ότι ο Rex είναι θηλαστικό (χωρίς αυτό να έχει δηλωθεί ειδικά για τον Rex ή για

οποιαδήποτε συγκεκριμένη γάτα) καθότι η ομάδα "γάτα" είναι θηλαστικό. Η κληρονομικότητα επιτυγχάνεται μέσω σχέσεων της μορφής "είναι", "είναι είδος" κλπ.

(β) Ανάθεση τυπικών (*default*) τιμών. Αποτελεί έκφραση της πιο πιθανής τιμής ενός χαρακτηριστικού ενός αντικειμένου. Για παράδειγμα, στο **Σχήμα 22** φαίνεται ότι η τυπική τιμή για τον αριθμό ποδιών της γάτας είναι τέσσερα, άρα ο Rex μάλλον έχει τέσσερα πόδια, χωρίς αυτό να χρειαστεί να δηλωθεί ειδικά για τον Rex.

(γ) Χρήση δαιμόνων. Οι δαίμονες αποτελούν ρουτίνες παραγωγής πληροφορίας/χαρακτηριστικού αντικειμένων ή ομάδων αντικειμένων μέσα από άλλες πληροφορίες/χαρακτηριστικά τους. Οι δαίμονες χρησιμοποιούνται μόνο αν είναι αναγκαίο να συλλεχθεί αυτή η πληροφορία (πχ. δαίμονας σχετικά με τον όγκο ενός αντικειμένου όταν στα χαρακτηριστικά του αντικειμένου περιλαμβάνονται οι διαστάσεις του αλλά όχι ο ίδιος ο όγκος του).

(δ) Προοπτική. Περιλαμβάνει τις διαφορετικές έννοιες κάτω από τις οποίες θεωρείται ένα αντικείμενο ή μία ομάδα αντικειμένων. Εφόσον ενεργοποιηθεί μία προοπτική αγνοούνται οι υπόλοιπες, ούτως ώστε να αποσαφηνιστεί η έννοια του αντικειμένου. Για παράδειγμα, στο **Σχήμα 22** φαίνονται οι "σκοποί" του Rex ως κατοικίδιο και ως κυνηγός.



Σχήμα 23. Παράδειγμα πολλαπλής σχέσης αντικειμένων.

Παρατηρείται ότι, σε κάποιες περιπτώσεις, τα σημασιολογικά δίκτυα αποτελούν εναλλακτική/σχηματική αναπαράσταση εκφράσεων της κατηγορικής λογικής, πχ. μέρος του δικτύου του **Σχήματος 22** αναπαριστά την έκφραση της κατηγορικής λογικής **ΕΙΜΑΙ(άνθρωπος,Γιώργος)**. Σημειώνεται πάντως ότι υπάρχουν περιπτώσεις όπου τα σημασιολογικά δίκτυα δεν είναι τόσο κατάλληλα για την έκφραση σχέσεων, επί παραδείγματι για σχέσεις μεταξύ περισσότερων από δύο αντικειμένων, όπου χρησιμοποιούνται ενδιάμεσοι κόμβοι προκειμένου να εκφραστεί το συγκεκριμένο αντικείμενο για το οποίο ισχύει η σχέση. Έτσι, για την έκφραση "Το A βρίσκεται μεταξύ του B και του Γ", που στην κατηγορική λογική εκφράζεται απλά ως **ΜΕΤΑΞΥ(A,B,Γ)**, το αντίστοιχο σημασιολογικό δίκτυο μπορεί να σχηματιστεί μόνο ως παράδειγμα της σχέσης **ΜΕΤΑΞΥ** (**Σχήμα 23**).

4.1.2. Σχήματα

Τα σχήματα (*schemata, frames, scenarios, scripts*, Minsky (1975)) αποτελούν έναν από τους πιο συνήθεις τρόπους έκφρασης γνώσης σχετικής με αντικείμενα, ενέργειες ή γεγονότα. Αφορούν στην αναγνώριση και κατανόηση του περιβάλλοντος με δομημένο τρόπο. Έχουν ως πηγή έμπνευσής τους την ευελιξία της ΦΝ αφενός όταν αντιμετωπίζει μία νέα κατάσταση (η οποία μοιάζει με κάποια γνωστή κατάσταση) και αφετέρου όταν προσαρμόζεται στην αλλαγή μίας κατάστασης.

Τα σχήματα αποτελούν παραλλαγή των σημασιολογικών δικτύων: αντιπροσωπεύουν πραγματικές καταστάσεις εκφρασμένες συνολικά ως κόμβοι/θέσεις (slots) που περιέχουν/συμπληρώνονται από συγκεκριμένες τιμές και αντίστοιχες κατευθυνόμενες συνδέσεις. Ισχύουν οι κλασσικοί μηχανισμοί αναπαράστασης σχέσεων των σημασιολογικών δικτύων (κληρονομικότητα, τυπικές τιμές, δαίμονες και προοπτική), οπότε είναι δυνατό να μεταβάλλονται οι θέσεις-λεπτομέρειες όπως χρειάζεται, καθώς και να εμπεριέχονται (οπότε και να επεξηγούνται) λεπτομέρειες οι οποίες είναι χαρακτηριστικές αλλά παραλείπονται λόγω του ότι είναι αυτονόητες. Με τον τρόπο αυτό είναι δυνατό να υλοποιηθεί ο ελλειπτικός, καθημερινός, λόγος και - μέσω των σχημάτων - να αποσαφηνίζονται/συμπληρώνονται τα δεδομένα ώστε να δίνεται σωστή ερμηνεία σε περίπτωση ελλιπών δεδομένων ή πολλαπλών και αμφίσημων εκδοχών. Επιπλέον σχήματα μπορούν να περιέχουν επιμέρους (πιο εξειδικευμένα) σχήματα. Παραδείγματα σχημάτων αποτελούν η αναγνώριση μίας καρέκλας (μαζί με την ανάσυρση των χαρακτηριστικών της), το παιδικό πάρτυ γενεθλίων, μία βόλτα παίρνοντας το λεωφορείο, ή μία έξοδος πηγαίνοντας στο εστιατόριο.

Δύο παραδείγματα δίνονται στα **Σχήματα 24** και **25** για τον ελέφαντα και την έξοδο του Γιάννη στο εστιατόριο, αντίστοιχα. Το σχήμα του ελέφαντα αποσαφηνίζει όλα τα χαρακτηριστικά (μαζί με τις αντίστοιχες τιμές) αυτού του ζώου, τις εναλλακτικές προοπτικές της προβολίδας καθώς και το δυνατό γένος και είδος κάθε συγκεκριμένου ελέφαντα. Μία υλοποίηση του σχήματος του εστιατορίου μπορεί να εκφραστεί με το εξής κείμενο:

Ο Γιάννης πήγε στο εστιατόριο.

Κάθισε.

Διάβασε το μενού.

Παρήγγειλε κοτόπουλο.

Δεν ήθελε ποτό.

Εφαγε το κοτόπουλο.

Αφησε μεγάλο φιλοδώρημα.

Εφυγε από το εστιατόριο.

Από το σχήμα του **Σχήματος 25** είναι φανερό ότι υπήρχε μενού και όχι μπουφές για την επιλογή του γεύματος, ότι έφαγε κοτόπουλο και ότι δεν ήπια κρασί. Καθίσταται πιθανό ότι ο Γιάννης ήταν μόνος, ενώ συμπεραίνεται ότι του άρεσε το κοτόπουλο (αφού άφησε μεγάλο φιλοδώρημα). Το τελευταίο δίνεται από ένα ξεχωριστό, επιμέρους σχήμα, το σχήμα του φιλοδωρήματος που καθορίζει το ποσοστό του φιλοδωρήματος ανάλογο της ποιότητας του γεύματος. Παρ' όλο που δεν γίνεται φανερό πώς ήρθε και πώς έφυγε ο Γιάννης, αν είχε κλείσει τραπέζι ή με ποιόν τρόπο πλήρωσε το λογαριασμό, η κατανόηση του ελλειπτικού κειμένου επιτυγχάνεται με ευκολία.

4.1.3. Επεξεργασία φυσικής γλώσσας (natural language processing)

Ορμώμενοι από την εξέταση του Turing, δημιουργούνται ολοένα και πιο εξελιγμένα προγράμματα (chatbots ή chatterbots ή crash dummies of communication) τα οποία επικοινωνούν με τον άνθρωπο σε φυσική γλώσσα με τέτοιον τρόπο ώστε να προσομοιώνουν επιτυχώς - για κάποιο χρονικό διάστημα - την ανθρώπινη συμπεριφορά και επικοινωνία. Αποτελούν σχετικά μικρές βάσεις δεδομένων (λέξεις της αγγλικής - συνήθως - γλώσσας) συνδυασμένα με σειρά κανόνων για τη δημιουργία "ευφυών" προτάσεων. Τα προγράμματα αυτά έχουν απλή δομή συνήθως με τη μορφή κανόνων εκφρασμένων μέσω κατηγορικής λογικής, σημασιολογικών δικτύων και σχημάτων (πχ. κανόνας του φιλοδωρήματος της παραγράφου 4.1.2) και υλοποιημένα σε κάποια γλώσσα λογικού προγραμματισμού. Μπορούν να ξεγελάσουν τον συνομιλητή για περιορισμένο χρονικό διάστημα, αλλά - όσο εξζητημένα και αν είναι - αποτυγχάνουν εύκολα (και συχνά) όταν αντιμετωπίζουν το ευρύτατο πεδίο ερωτήσεων/απαντήσεων του συνομιλητή τους (ΦΝ). Το ενδιαφέρον, ο συναγωνισμός, αλλά και η δυσκολία δημιουργίας ενός προγράμματος επικοινωνίας σε φυσική γλώσσα είναι τέτοια που κάθε χρόνο διεξάγεται ο διαγωνισμός Loebner για το πιο πετυχημένο πρόγραμμα.

ΕΛΕΦΑΣ

Συνομοταξία	σπονδυλωτό
Ομοταξία	θηλαστικό
Γένος-Είδος	Αφρικάνικος σάβαννας δασών Ασιατικός
Τροφή	χορτοφάγο
Μέγεθος	(πολύ) μεγάλο
Χρώμα	γκρίζο
Προβοσκίδα	μακριά
ΣΚΟΠΟΣ	όσφρηση αφή χειρισμός νερό+τροφή
Χαυλιόδοντες	2
Πόδια	4 κολώνες
Δάκτυλα	5 μπροστά, 4 πίσω
Ουρά	οστά, δέρμα, τρίχες
	...

Σχήμα 24. Σχήμα ελέφαντα:
χαρακτηριστικά και θέσεις.

ΕΣΤΙΑΤΟΡΙΟ

Αφιξη	ταξί αυτοκίνητο μετρό λεωφορείο πόδια
Ωρα	μεσημέρι βράδυ
Συνδαιτημόνες	μόνος με σύντροφο με συντροφιά
Τραπέζι	κλεισμένο παράθυρο ορχήστρα μακριά από ηχεία
Επιλογή γεύματος	μπουφές μενού
Πιάτο (ένα ή περισσότερα)	ορεκτικό της ώρας κρέας ψάρι σαλάτα γλυκό φρούτο
Ποτό (ένα ή περισσότερα)	λευκό κρασί κόκκινο κρασί σαμπάνια σύζο μπύρα νερό
Λογαριασμός	μετρητά πιστωτική φιλοδώρημα %
Αναχώρηση	αυτόνομα κλήση ταξί

Σχήμα 25. Σχήμα εστιατορίου:
χαρακτηριστικά και θέσεις.

Το κλασσικό πρόγραμμα επικοινωνίας σε φυσική γλώσσα είναι η ELIZA¹⁸ (Weizenbaum, 1966), η οποία προσομοιώνει πειστικά (για περιορισμένο χρονικό διάστημα) έναν ψυχοθεραπευτή: διεισδυτική και ήρεμη, θέτει σύντομες αλλά κατάλληλες ερωτήσεις προκειμένου να κάνει τον ασθενή να ξανοιχτεί (πχ. "Πώς σε κάνει αυτό να αισθάνεσαι;" ή "Πες μου περισσότερα"). Χωρίς ουσιαστικό ίχνος εξυπνάδας (πχ. ευριστικών μεθόδων) στον πρόγραμμα, λειτουργεί ανιχνεύοντας λέξεις κλειδιά (*keyword matching*), πχ. "μητέρα" ή "καταπιεσμένος/η" προκειμένου να θέσει τις ανάλογες ερωτήσεις μέσα από μία βάση δεδομένων-ερωτήσεων. Αν η ανίχνευση λέξεων-κλειδιών αποτύχει, η ELIZA θέτει γενικές ερωτήσεις προκειμένου να συλλέξει περισσότερες πληροφορίες (και λέξεις-κλειδιά). Συχνά, μάλιστα, αντιστρέφει την απάντηση (δυστυχώς, όχι πάντα με επιτυχία):

ΦΝ: *I am having a very bad day*

ELIZA: *did you come to me because you were having a very bad day?*

ή

ΦΝ: *I have come to talk to you.*

ELIZA: *oh, you have come to talk to me ?*

Παρ' όλα αυτά, εύκολα αποκαλύπτεται η περιορισμένη ικανότητά της για διάλογο, πχ.

ΦΝ: *I am doing fine thank you.*

ELIZA: *how long have you been doing fine thank i?*

Κάποια άλλα ενδιαφέροντα προγράμματα επικοινωνίας σε φυσική γλώσσα είναι τα εξής:

- ± Ο FRANK, ο οποίος αποτελεί κοντινό συγγενή της ELIZA.
- ± Ο CLAUDE (Brian McLaughlin), ιδιάζων χαρακτήρας, αλλά ιδιαίτερα ποιητικός και εκκεντρικός. Είναι ενδιαφέρον πώς – σε αντίθεση με τη ELIZA – ο περίεργος και πολύπλοκος τρόπος έκφρασης του CLAUDE καλύπτει αποτελεσματικά την έλλειψη ουσιαστικής κατανόησης του διαλόγου. Ένα παράδειγμα δίνεται παρακάτω:

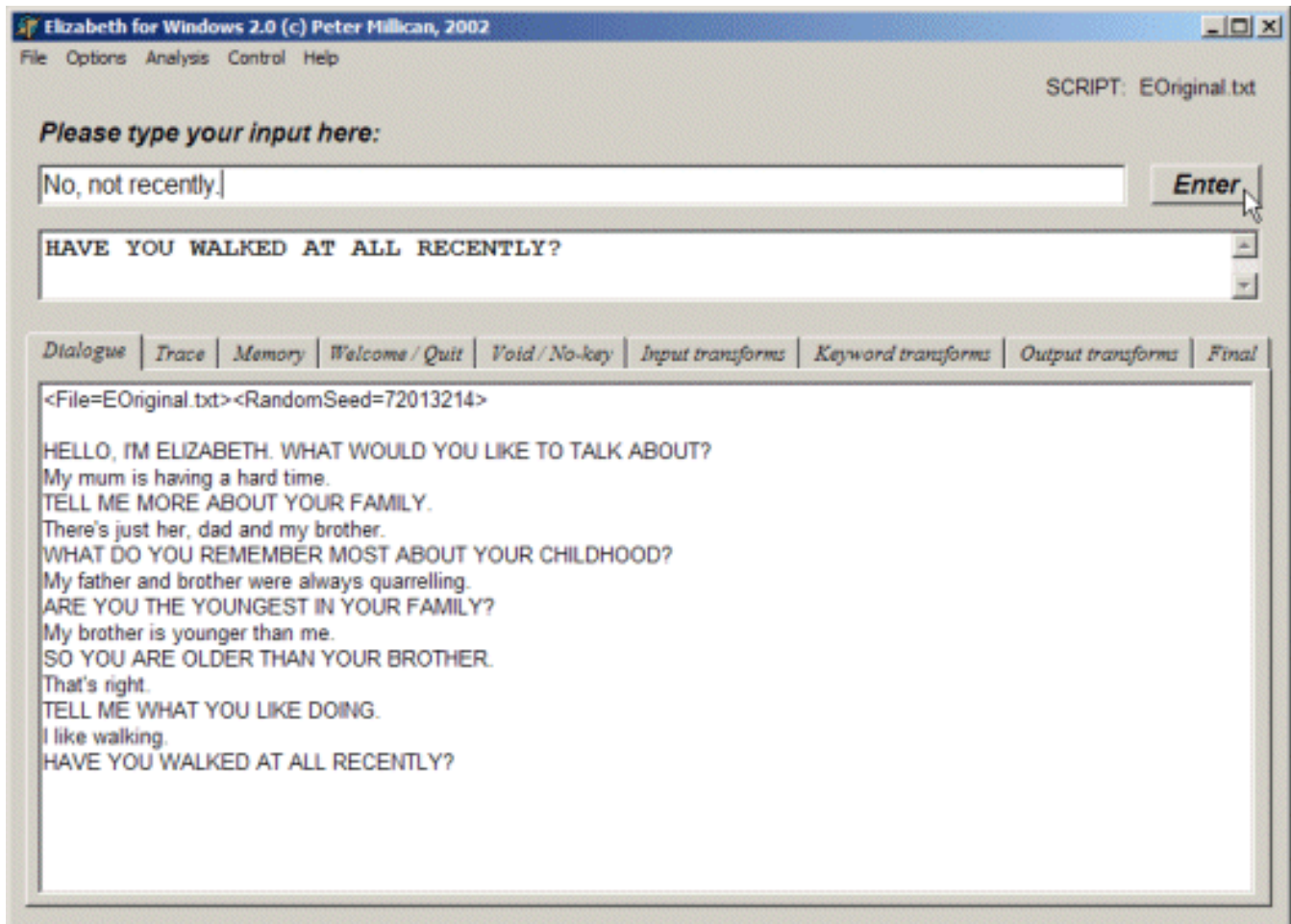
Claude	<i>Believe me. You wouldn't want to know. But I woudn't swear to it. I hope you don't mind me asking, Simon, but have you ever cheated a law clerk?</i>
User	<i>Not as yet, No.</i>
Claude	<i>No. I suppose not. Of course, it's all relative, you know. People say ministers couldn't run true to form. But I bet they could, if they tried.</i>
User	<i>I suppose so.</i>
Claude	<i>You're so smart, Simon! I never say any good stuff like that. However, I can't be bothered with that. My sister agreed to find trash. That's probably because she was gloomy. The last I heard she had moved to Savannah and was biting a creep. But, it's like they say: Life isn't all whiney women and song.</i>

- ± Η ELIZABETH (Peter Millican), απόγονος της ELIZA με καλύτερη βάση δεδομένων και εκτεταμένο τρόπο αναζήτησης απαντήσεων. Η ELIZABETH μπορεί να χειρίζεται πιο πολύπλοκες εκφράσεις και μετασχηματισμούς. Ξεκινά τη συζήτηση με έναν τυχαία επιλεγμένο χαιρετισμό (από

¹⁸ Το όνομά της (δανεισμένο από την Eliza Doolittle του "Ωραία μου Κυρία") φανερώνει ακριβώς το ότι σκοπός του προγράμματος είναι να ξεγελάσει τον συνομιλητή της στο ότι είναι κάτι άλλο (ψυχοθεραπευτής) από αυτό που πραγματικά είναι (ένα *chatbot*).

τους αποθηκευμένους) και οι απαντήσεις της βασίζονται αποκλειστικά στις προτάσεις του συνομιλητή της μέσω της παρακάτω διαδικασίας:

- Ανάλυση της πρότασης του συνομιλητή.
- Αναγνώριση λέξεων-κλειδιών στην πρόταση και τυχαία επιλογή ενός από τους υπάρχοντες μετασχηματισμούς τους.
- Δημιουργία απάντησης (ένα παράδειγμα δίνεται παρακάτω).

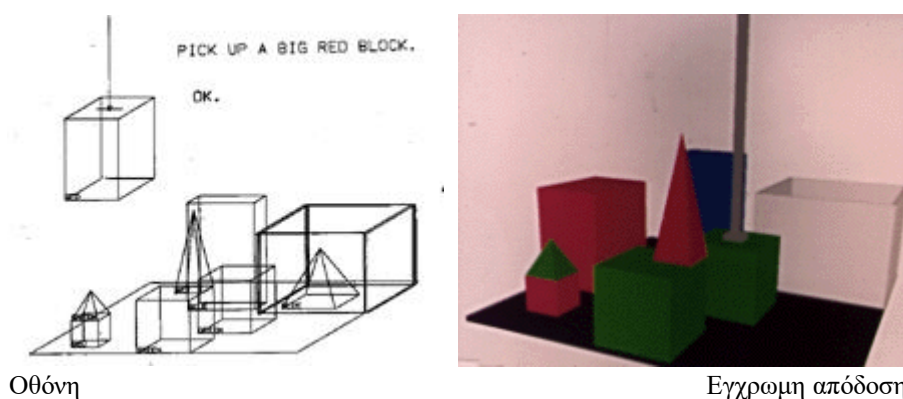


- ± Ο SANTA (Rich Waugh & Rey Barry) για τη δημιουργία ενός προσομοιωτή του Αη Βασίλη που δέχεται παραγγελίες για πρωτοχρονιάτικα δώρα.

4.1.4. Συστήματα γνώσης (knowledge-based systems)

Δεδομένου του προβλήματος της καθημερινής γνώσης (όπως φάνηκε από τις αποτυχίες της παραγράφου 4.1.3 και την πολυπλοκότητα έκφρασης των παραγράφων 4.1.1. και 4.1.2.) αντί για την παραγωγή συστημάτων ΤΝ γενικής χρήσης, αναπτύχθηκε η εναλλακτική μεθοδολογία μίμησης της ΦΝ σε "μικροκόσμους" (microworlds), δηλαδή περιορισμένα και καλά καθορισμένα περιβάλλοντα (χώρους προβλήματος). Η θεωρία πίσω από τους μικροκόσμους ήταν ότι η ΤΝ όφειλε να παράγει ευφυΐα σε ένα περιορισμένο περιβάλλον. Μόλις αυτό επιλυνόταν, η πολυπλοκότητα του περιβάλλοντος θα αυξανόταν (χαλάρωση περιορισμών περιβάλλοντος) προκαλώντας επέκταση στην ΤΝ. Αφού αυτό επαναλαμβανόταν διαδοχικά, η ΤΝ θα έφτανε σε ένα σημείο που θα επέλυε πραγματικά προβλήματα και περιβάλλοντα. Ήταν μία θεωρία αμοιβαία κλιμακούμενης πολυπλοκότητας περιβάλλοντος και ΤΝ. Ένα από τα πιο κλασσικά παραδείγματα μικροκόσμου αποτελεί ο μικρόκοσμος των κύβων με διαχείριση του από το SHRDLU (Winograd, 1972), ένα σύστημα γνώσης το οποίο στηρίζεται σε κανόνες της μορφής που περιγράφηκε στην παράγραφο 4.2.1. Το SHRDLU έλαβε το όνομά του από τα επτά πιο

συνηθισμένα γράμματα της Αγγλικής γλώσσας. Αποτελεί συνδυασμό επικοινωνίας σε φυσική γλώσσα αφενός και επίλυσης προβλημάτων μετακίνησης και τοποθέτησης αντικειμένων του τεχνητού μικροκόσμου των κύβων (κύβων, σφαιρών, κώνων, πυραμίδων κλπ. διαφόρων μεγεθών και χρωμάτων, βλ. **Σχήμα 26**) αφετέρου. Περιγράφει κύβους και έναν ρομποτικό βραχίονα που χρησιμοποιείται για την μετακίνηση των κύβων¹⁹. Είναι ενδιαφέρον ότι τέσσερις απλές ιδέες επιτρέπουν την ικανοποιητική προσομοίωση της κατανόησης και επικοινωνίας με το περιβάλλον/άνθρωπο και εισήγαγαν ένα πρώτο δείγμα ρομποτικής. Οι τέσσερις αυτές ιδέες είναι οι εξής:



Σχήμα 26. SHRLDU

- Περιορισμένο και καλά καθορισμένο περιβάλλον. 50 λέξεις είναι αρκετές για την περιγραφή και διαχείρισή του περιβάλλοντος. Τέτοιες είναι (α) ουσιαστικά όπως "block" και "cone" για την περιγραφή των κύβων, (β) επίθετα όπως "big" και "blue" για τον χαρακτηρισμό των κύβων, και (γ) ρήματα όπως "place on" and "move to" για τον καθορισμό της (τρέχουσας) θέσης τους. Επιπλέον, οι συνδυασμοί των λέξεων αυτών δημιουργούν απλές προτάσεις τις οποίες μπορεί εύκολα να αναλύσει και συνθέσει το SHRLDU.
- Ενσωμάτωση μία πρώτης έννοιας εκμετάλλευσης του προηγούμενου διαλόγου για την κατανόηση αμφίβολων εντολών. Έτσι σε ακολουθία εντολών "put the green cone on the red block" και μετά "take the cone off", "the cone" μάλλον σημαίνει τον κώνο που μόλις μετακινήθηκε. Υπάρχει η δυνατότητα ελέγχου προς τα πίσω στον διάλογο προκειμένου η κατανόηση να καταστεί σωστή, πχ. χρησιμοποιώντας επίθετα ως προσδιοριστικά. "the green cone?". Αρα πραγματοποιείται φυσική επεξεργασία λόγου και διάλογος με σκοπό την εκτέλεση της εντολής.
- Έλεγχος της δυνατότητας εκτέλεσης εντολής. Λόγω της μνήμης του σχετικά με τον προηγούμενο διάλογο, το SHRLDU μπορεί να διαπιστώσει αν κάτι είναι εφικτό ή όχι (πχ. να τοποθετήσει πυραμίδες ή κώνους τον έναν πάνω στον άλλον). Αρα, σε κάθε βήμα, πραγματοποιείται επίλυση του προβλήματος που εκφράζεται μέσω της εντολής.
- Εκμάθηση. είναι δυνατή η αποθήκευση νέων ονομάτων σε αντικείμενα ή σε συνδυασμούς τους. Έτσι, σε εντολή "a steeple is a small triangle on top of a tall rectangle", το SHRLDU όχι μόνον μπορεί να απαντήσει σε επόμενες ερωτήσεις που αφορούν το "steeple" αλλά μπορεί ακόμη και να το κτίσει.

Ένα παράδειγμα του διαλόγου με το SHRLDU φαίνεται παρακάτω:

Person: PICK UP A BIG RED BLOCK.
Computer: OK. (does it)
Person: GRASP THE PYRAMID.
Computer: I DON'T UNDERSTAND WHICH PYRAMID YOU MEAN.

¹⁹ Στην πραγματικότητα υπήρχαν μόνο περιγραφές των κύβων, του βραχίονα και των κινήσεων, άρα γίνεται προσομοίωση του περιβάλλοντος και των κινήσεων μέσα σε αυτό.



Person: FIND A BLOCK WHICH IS TALLER THAN THE ONE YOU ARE HOLDING AND PUT IT INTO THE BOX.

Computer: BY "IT", I ASSUME YOU MEAN THE BLOCK WHICH IS TALLER THAN THE ONE I AM HOLDING.

Computer: OK. (does it)

Person: WHAT DOES THE BOX CONTAIN?

Computer: THE BLUE PYRAMID AND THE BLUE BLOCK.

Person: WHAT IS THE PYRAMID SUPPORTED BY?

Computer: THE BOX.

Person: HOW MANY BLOCKS ARE NOT IN THE BOX?

Computer: FOUR OF THEM.

Person: IS AT LEAST ONE OF THEM NARROWER THAN THE ONE WHICH I TOLD YOU TO PICK UP?

Computer: YES, THE RED CUBE.

Person: IS IT SUPPORTED?

Computer: YES, BY THE TABLE.

Person: CAN THE TABLE PICK UP BLOCKS?

Computer: NO.

Person: CAN A PYRAMID BE SUPPORTED BY A BLOCK?

Computer: YES.

Person: CAN A PYRAMID SUPPORT A PYRAMID?

Computer: I DON'T KNOW.

Person: STACK UP TWO PYRAMIDS.

Computer: I CAN'T.

Person: WILL YOU PLEASE STACK UP BOTH OF THE RED BLOCKS AND EITHER A GREEN CUBE OR A PYRAMID?

Computer: OK. (does it)

Person: WHICH CUBE IS SITTING ON THE TABLE?

Computer: THE LARGE GREEN ONE WHICH SUPPORTS THE RED PYRAMID.

Person: IS THERE A LARGE BLOCK BEHIND A PYRAMID?

Computer: YES, THREE OF THEM: A LARGE RED ONE, A LARGE GREEN CUBE, AND THE BLUE ONE.

Person: PUT A SMALL ONE ONTO THE GREEN CUBE WHICH SUPPORTS A PYRAMID.

Computer: OK. (does it)

Person: PUT THE LITTLEST PYRAMID ON TOP OF IT.

Computer: OK. (does it)

Person: DOES THE SHORTEST THING THE TALLEST PYRAMID'S SUPPORT SUPPORTS SUPPORT ANYTHING GREEN?

Computer: YES, THE GREEN PYRAMID.

Person: WHAT COLOR IS IT?

Computer: BY "IT", I ASSUME YOU MEAN THE SHORTEST THING THE TALLEST PYRAMID'S SUPPORT SUPPORTS.

Computer: RED

Person: HOW MANY THINGS ARE ON TOP OF GREEN CUBES?

Computer: I'M NOT SURE WHAT YOU MEAN BY "ON TOP OF" IN THE PHRASE "ON TOP OF GREEN CUBES".

DO YOU MEAN:

1 - DIRECTLY ON THE SURFACE

2 - ANYWHERE ON TOP OF ?



Person: 2
Computer: THREE OF THEM.
Person: HAD YOU TOUCHED ANY PYRAMID BEFORE YOU PUT THE GREEN ONE ON THE LITTLE CUBE?
Computer: YES, THE GREEN ONE.
Person: WHEN DID YOU PICK IT UP?
Computer: WHILE I WAS STACKING UP THE RED CUBE, A LARGE RED BLOCK AND A LARGE GREEN CUBE.
Person: WHY?
Computer: TO GET RID OF IT.
Person: WHY DID YOU DO THAT?
Computer: TO CLEAN OFF THE RED CUBE.
Person: WHY DID YOU CLEAR OFF THAT CUBE?
Computer: TO PUT IT ON A LARGE GREEN CUBE.
Person: WHY DID YOU DO THAT?
Computer: TO STACK UP THE RED CUBE, A LARGE RED BLOCK AND A LARGE GREEN CUBE.
Person: WHY DID YOU DO THAT?
Computer: BECAUSE YOU ASKED ME TO.
Person: HOW DID YOU DO IT?
Computer: BY PUTTING A LARGE RED BLOCK ON THE TABLE ; THEN LETTING GO OF IT ; THEN PUTTING A LARGE GREEN CUBE ON IT ; THEN LETTING GO OF THAT CUBE ; THEN PUTTING THE RED CUBE ON THAT CUBE; THEN LETTING GO OF THAT CUBE.
Person: HOW MANY OBJECTS DID YOU TOUCH WHILE YOU WERE DOING IT?
Computer: FOUR OF THEM.
Person: WHAT DID THE RED CUBE SUPPORT BEFORE YOU STARTED TO CLEAN IT OFF?
Computer: THE GREEN PYRAMID.
Person: THERE WERE FIVE BLOCKS TO THE LEFT OF THE BOX THEN.
Computer: NO, ONLY FOUR OF THEM: THE RED CUBE, TWO LARGE GREEN CUBES AND A LARGE RED BLOCK.
Person: PUT THE BLUE PYRAMID ON THE BLOCK IN THE BOX.
Computer: OK. (does it)
Person: IS THERE ANYTHING WHICH IS BIGGER THAN EVERY PYRAMID BUT IS NOT AS WIDE AS THE THING THAT SUPPORTS IT?
Computer: YES, THE BLUE BLOCK.
Person: DOES A STEEPLE
Computer interrupting: SORRY, I DON'T KNOW THE WORD "STEEPLE".
Person: A "STEEPLE" IS A STACK WHICH CONTAINS TWO GREEN CUBES AND A PYRAMID.
Computer: I UNDERSTAND.
Person: ARE THERE ANY STEEPLES NOW?
Computer: NO.
Person: BUILD ONE.
Computer: OK. (does it)
Person: CALL THE BIGGEST BLOCK "SUPERBLOCK".
Computer: OK.
Person: HAVE YOU PICKED SUPERBLOCK UP SINCE WE BEGAN?
Computer: YES.
Person: WHY DID YOU DROP IT?



Computer: BY "IT", I ASSUME YOU MEAN THE SUPERBLOCK.
I CAN'T EXPLAIN A NON-EXISTENT EVENT.

Person: IS THERE ANYTHING TO THE RIGHT OF THE RED PYRAMID?

Computer: YES, FOUR THINGS: THE BOX , THE RED CUBE, THE BLUE PYRAMID AND
THE BLOCK NAMED SUPERBLOCK

Person: THANK YOU.

Computer: YOU'RE WELCOME!

Μία απλουστευμένη υλοποίηση του SHRLDU περιγράφεται παρακάτω. Χρησιμοποιούνται:

- Οι συμβολικές δομές οι οποίες αναπαριστούν επακριβώς τα χαρακτηριστικά και την τρέχουσα κατάσταση των αντικειμένων του μικροκόσμου των κύβων και του ρομποτικού βραχίονα (ο οποίος κινεί τα αντικείμενα). Εδώ οι συμβολικές δομές παίρνουν τη μορφή σχημάτων εκφρασμένων μέσω κατηγορικής λογικής, πχ.

ΑΝΤΙΚΕΙΜΕΝΟ-KYBOΣ(κύβος5)

ΕΙΝΑΙ(κόνος)

ΧΡΩΜΑ(κόκκινο)

ΘΕΣΗ(3,2,2)2,2)

ΑΠΟ_ΠΑΝΩ(κύβος2)

ΑΠΟ_ΚΑΤΩ(κύβος1)

ΑΝΤΙΚΕΙΜΕΝΟ-BΡΑΧΙΟΝΑΣ

ΘΕΣΗ(3.5,2.5,4)

ΚΡΑΤΑΕΙ(τίποτα)

- Οι διαδικασίες επεξεργασίας αποτελούν διαδικασίες ενέργειας (*action procedures*) οι οποίες μετασχηματίζουν την τρέχουσα κατάστασή των αντικειμένων στο χώρο προκειμένου να δημιουργήσουν την επιθυμητή (τελική) κατάσταση. Είναι κατανεμημένες σε δύο επίπεδα και έχουν τη μορφή ρουτινών, οι οποίες μπορούν να καλέσουν άλλες ρουτίνες ή και τον εαυτόν τους:

Ψηλότερο επίπεδο

ΤΟΠΟΘΕΤΗΣΕ(κύβοςA,χώροςA²⁰)

ΒΑΛΕ(κύβοςA,ΚΑΝΕ_ΧΩΡΟ(κύβοςA,χώροςA))

Χαμηλότερο επίπεδο

ΒΑΛΕ(κύβοςA,θέσηA)

ΠΙΑΣΕ(κύβοςA)

ΜΕΤΑΚΙΝΗΣΕ_ΑΝΤΙΚΕΙΜΕΝΟ(κύβοςA,θέσηA)

ΑΦΗΣΕ(κύβοςA)

ΠΙΑΣΕ(κύβοςA)

x= ΑΝΤΙΚΕΙΜΕΝΟ-BΡΑΧΙΟΝΑΣ.ΚΡΑΤΑΕΙ(*)

Εάν x¹ τίποτα

ΑΠΑΛΛΑΞΟΥ_ΑΠΟ(x)

y= ΑΝΤΙΚΕΙΜΕΝΟ-KΥΒΟΣ(κύβοςA).ΑΠΟ_ΠΑΝΩ(*)

Εάν y¹ τίποτα

ΚΑΘΑΡΙΣΕ_ΕΠΑΝΩ_ΜΕΡΟΣ(y)

ΜΕΤΑΚΙΝΗΣΕ_ΒΡΑΧΙΟΝΑΣ(θέσηA)

²⁰ Ο χώροςA μπορεί να είναι είτε κάποιος κύβος είτε κάποια θέση.

ΑΠΑΛΛΑΞΟΥ_ΑΠΟ(κύβοςA)
 ΒΑΛΕ(κύβοςA,KANE_ΧΩΡΟ(χώροςA))

ΚΑΘΑΡΙΣΕ_ΕΠΑΝΩ_ΜΕΡΟΣ(κύβοςA)
 x=ΑΝΤΙΚΕΙΜΕΝΟ-ΚΥΒΟΣ(κύβοςA).ΑΠΟ_ΠΑΝΩ(*)
 Καθόσον x^1 τίποτα
 ΑΠΑΛΛΑΞΟΥ_ΑΠΟ(κύβοςA)
 x=ΑΝΤΙΚΕΙΜΕΝΟ-ΚΥΒΟΣ(κύβοςA).ΑΠΟ_ΠΑΝΩ(*)

ΜΕΤΑΚΙΝΗΣΕ_ΒΡΑΧΙΟΝΑ(θέσηA)

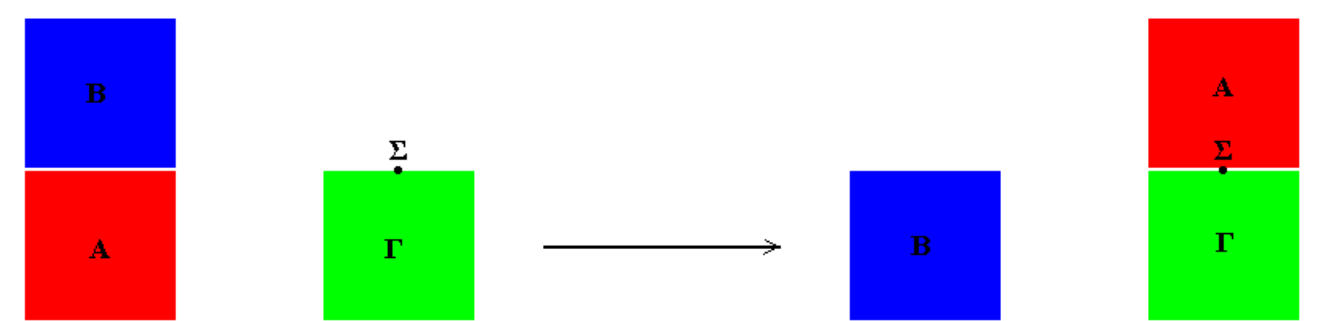
ΑΦΗΣΕ(κύβοςA)

ΜΕΤΑΚΙΝΗΣΕ_ΑΝΤΙΚΕΙΜΕΝΟ(κύβοςA,θέσηA)
 ΜΕΤΑΚΙΝΗΣΕ_ΒΡΑΧΙΟΝΑ(θέσηA)

ΚΑΝΕ_ΧΩΡΟ(κύβοςA,χώροςA)
 x=ΑΝΤΙΚΕΙΜΕΝΟ-ΚΥΒΟΣ(*).ΘΕΣΗ(χώροςA)
 Καθόσον x^1 τίποτα
 ΑΠΑΛΛΑΞΟΥ_ΑΠΟ(x)
 x=ΑΝΤΙΚΕΙΜΕΝΟ-ΚΥΒΟΣ(x).ΑΠΟ_ΚΑΤΩ(*)

- Οι διαδικασίες ελέγχου είναι ενσωματωμένες στις διαδικασίες επεξεργασίας. Ενώ είναι επιπλέον υπεύθυνες για την αλλαγή των πεδίων των συμβολικών δομών μετά από την κλήση οποιασδήποτε διαδικασίας επεξεργασίας.

Ένα απλό παράδειγμα φαίνεται στο **Σχήμα 27**, όπου η αρχική κατάσταση φαίνεται στο αριστερό μέρος του **Σχήματος 27** και η τελική κατάσταση (ΤΟΠΟΘΕΤΗΣΕ(A,Σ)) φαίνεται στο δεξί μέρος.



Σχήμα 27. Παράδειγμα μετακίνησης και τοποθέτησης αντικειμένων του τεχνητού μικροκόσμου των κύβων - απλουστευμένη υλοποίηση του SHRLDU.

4.2. ΕΜΠΕΙΡΗ ΓΝΩΣΗ

Αν και το SHRLDU αποτέλεσε ένα ιδιαίτερα πετυχημένο πρόγραμμα ΤΝ, η επέκτασή του σε λιγότερο περιορισμένα περιβάλλοντα ήταν αποτυχής. Μάλιστα, ο Winograd πρώτος αποστασιοποιήθηκε από το κατασκευασμά του, πιστεύοντας ότι η ΤΝ οδηγεί σε αδιέξοδο. Παρόλα αυτά, το SHRLDU απέδειξε ότι κατάλληλα δομημένα συστήματα ΤΝ μπορούν να δρουν ως ειδικοί σε καλά καθορισμένα περιβάλλοντα



<KANONAS 3>	EAN	<το ζώο είναι θηλαστικό> ΑΛΗΘΗΣ	Λ
		<το ζώο τρώει κρέας> ΑΛΗΘΗΣ	
	TOTE	<το ζώο είναι σαρκοβόρο> ΑΛΗΘΕΣ	
<KANONAS 4>	EAN	<το ζώο είναι θηλαστικό> ΑΛΗΘΗΣ	Λ
		<το ζώο έχει μυτερά δόντια> ΑΛΗΘΗΣ	Λ
		<το ζώο έχει νύχια> ΑΛΗΘΗΣ	Λ
		<τα μάτια του ζώου κοιτούν μπροστά> ΑΛΗΘΗΣ	
	TOTE	<το ζώο είναι σαρκοβόρο> ΑΛΗΘΕΣ	
<KANONAS 5>	EAN	<το ζώο είναι σαρκοβόρο> ΑΛΗΘΗΣ	Λ
		<το ζώο έχει καφέ ανοιχτό χρώμα> ΑΛΗΘΗΣ	Λ
		<το ζώο έχει μαύρες πιτσίλες> ΑΛΗΘΗΣ	Λ
	TOTE	<το ζώο είναι λεοπάρδαλη> ΑΛΗΘΕΣ	

(β) της αρχικής βάσης δεδομένων

Το ζώο έχει τρίχες
Το ζώο έχει καφέ ανοιχτό χρώμα
Το ζώο έχει μαύρες πιτσίλες
Το ζώο έχει νύχια
Το ζώο έχει μυτερά δόντια
Τα μάτια του ζώου κοιτούν μπροστά

(γ) του συμπεράσματος

Το ζώο είναι λεοπάρδαλη

Η συλλογιστική καθορίζει τον τρόπο με τον οποίο το σύστημα κανόνων οδηγείται μέσα από τα δεδομένα και τους κανόνες στην επαλήθευση ή στη διάψευση των συμπερασμάτων. Βασικό πλεονέκτημα της αποτελεί η δυνατότητα επεξήγησης της πορείας προς την επαλήθευση ή τη διάψευση, για παράδειγμα το πώς διαπιστώθηκε κάποιο γεγονός (προϋπόθεση, επακόλουθο ή συμπέρασμα) καθώς και το γιατί ερωτήθηκε ο χρήστης σχετικά με κάποιο γεγονός. Για την επίτευξη της σύνθεσης/ανάλυσης υπάρχουν δύο είδη συλλογιστικής, η συλλογιστική προς τα εμπρός και η συλλογιστική προς τα πίσω.

Η συλλογιστική προς τα εμπρός

Ξεκινώντας από γεγονότα και δεδομένα της βάσης δεδομένων χρησιμοποιούνται οι κανόνες προκειμένου να δημιουργηθούν νέα γεγονότα και δεδομένα (επακόλουθα) τα οποία εμπλουτίζουν τη βάση δεδομένων. Η διαδικασία αυτή συνεχίζεται μέχρις ότου είτε να προκύψει το ζητούμενο συμπέρασμα είτε να καταστεί βέβαιο ότι αυτό δε μπορεί να προκύψει. Έτσι, η συλλογιστική προς τα εμπρός χρησιμοποιείται όταν ζητείται τι μπορεί να προκύψει από ένα σύνολο κανόνων και κάποια αρχική βάση δεδομένων (δηλαδή για συστήματα σύνθεσης). Εκφράζεται ως εξής:

Βήμα 1. Για κάθε κανόνα,

Βήμα 1.1. Απόπειρα ικανοποίησης του συνδυασμού των προϋποθέσεων βάσει των γεγονότων/δεδομένων της βάσης δεδομένων. Ελεγχος του εάν ο κανόνας ενεργοποιείται.

Εάν ναι,

Βήμα 1.1.1. Προσθήκη των νέωνεπακολούθων στη βάση δεδομένων.

Βήμα 2. Διαπίστωση του εάν η βάση δεδομένων έχει αυξηθεί.

Εάν ναι,

Βήμα 2.1. Επιστροφή στο Βήμα 1.

Εάν όχι,

Βήμα 2.2. Τέλος μεθόδου. Αναφορά όλων των νέων επακολούθων της βάσης δεδομένων.

Η συλλογιστική προς τα εμπρός είναι εξαντλητική. Αν και είναι δυνατό να τίθενται ερωτήσεις αληθείας στον χρήστη κάθε φορά που δεν ικανοποιείται μία προϋπόθεση, κάτι τέτοιο δεν είναι κατευθυνόμενο (άρα δεν είναι και ιδιαίτερα αποδοτικό). Γι' αυτόν τον λόγο, έχει αναπτυχθεί σειρά στρατηγικών (*conflict resolution strategies*) οι οποίες επιτρέπουν στη συμπερασματική μηχανή να αυξήσει την αποδοτικότητά της. Οι στρατηγικές αυτές περιλαμβάνουν:

- Την εξέταση των πιο γενικών κανόνων πρώτα (προκειμένου να εμπλουτιστεί η αρχική βάση δεδομένων).
- Τη μη εφαρμογή του ίδιου κανόνα στα ίδια δεδομένα.
- Την εφαρμογή των κανόνων στα πιο πρόσφατα στοιχεία της βάσης δεδομένων, έτσι ώστε να επαυξηθεί η βάση δεδομένων και να προχωρήσει η συλλογιστική συστηματικά/κατευθυνόμενα.
- Την προτίμηση για εφαρμογή των πιο ειδικών κανόνων έναντι των πιο γενικών (κατά την πορεία της συλλογιστικής διαδικασίας).

Σημειώνεται πάντως ότι τα πιο σημαντικό στοιχείο του συστήματος κανόνων αποτελεί ο τρόπος σύνταξης των προϋποθέσεων-επακολούθων των κανόνων καθώς και επιπλέον διαδικασίες ελέγχου της συμπερασματικής μηχανής. Οι τελευταίες εξαρτώνται από το εκάστοτε πρόβλημα προς επίλυση (*problem-dependent*) και δύνανται να καθορίζουν το πεδίο δράσης των στρατηγικών πχ. ότι αρχικά θα προτιμούνται οι πιο γενικοί κανόνες ώστε να εμπλουτιστεί ικανοποιητικά η βάση δεδομένων και κατόπιν θα εφαρμοστεί η στρατηγική της προτίμησης των πιο ειδικών κανόνων προκειμένου η αναζήτηση να επικεντρωθεί και καταστεί πιο κατευθυνόμενη. Αν, για παράδειγμα, υπάρχουν οι κανόνες

$\langle KANONAS A \rangle$ $EAN \quad \langle X \text{ πουλί} \rangle \text{ ΑΛΗΘΗΣ}$
 $TOTE \quad \langle X \text{ πετάει} \rangle \text{ ΑΛΗΘΕΣ}$

$\langle KANONAS B \rangle$ $EAN \quad \langle X \text{ πουλί} \rangle \text{ ΑΛΗΘΗΣ}$ Λ
 $\langle X \text{ είναι πιγκουίνος} \rangle \text{ ΑΛΗΘΗΣ}$
 $TOTE \quad \langle X \text{ κολυμπάει} \rangle \text{ ΑΛΗΘΕΣ}$

και ένα κομμάτι της βάσης δεδομένων που αναφέρεται στο ότι

ο Chilly-Willy είναι πιγκουίνος
όλοι οι πιγκουίνοι είναι πουλιά

ενδέχεται (α) στην αρχή της συλλογιστικής διαδικασίας να προτιμηθεί ο κανόνας A προκειμένου να εμπλουτιστεί η βάση δεδομένων με το χρήσιμο γεγονός ότι *ο Chilly-Willy είναι πουλί*, ενώ (β) αργότερα να είναι προτιμότερο να εφαρμοστεί ο κανόνας B και η συμπερασματική μηχανή να επικεντρώσει στο ότι *ο Chilly-Willy κολυμπάει* καθότι έτσι η συμπερασματική μηχανή επιτυγχάνει μείωση του τρέχοντος χώρου του προβλήματος μέσα στον οποίο πιθανώς να έγκειται η επαλήθευση/διάψευση του συμπεράσματος.

Συλλογιστική προς τα πίσω

Αρχικά αναζητείται κάποιος κανόνας ο οποίος περιέχει το ζητούμενο συμπέρασμα ως επακόλουθο. Αφού εντοπιστούν οι προϋποθέσεις οι οποίες πρέπει να ικανοποιηθούν προκειμένου να ενεργοποιηθεί ο κανόνας, πραγματοποιείται εκ νέου αναζήτηση των κανόνων οι οποίοι περιέχουν αυτές τις προϋποθέσεις και η διαδικασία συνεχίζεται μέχρις ότου είτε οι προϋποθέσεις ανάγονται σε αληθή γεγονότα/δεδομένα της βάσης δεδομένων (οπότε το ζητούμενο επαληθεύεται) είτε καταστεί φανερό ότι οι προϋποθέσεις αυτές δεν είναι δυνατό να ικανοποιηθούν (οπότε το ζητούμενο διαψεύδεται). Λόγω του ότι είναι πιο

κατευθυνόμενη, η συλλογιστική προς τα πίσω χρησιμοποιείται εάν το ζητούμενο συμπέρασμα είναι εξειδικευμένο (πχ. μία υπόθεση που αφορά σε κάποια συγκεκριμένα δεδομένα της βάσης δεδομένων) και ζητείται η επαλήθευσή/διάψευσή του²¹. Εφαρμόζεται ως εξής:

Βήμα 1. Για κάθε πρωτογενές συμπέρασμα²².

Βήμα 1.1. Εξέταση κάθε κανόνα που περιέχει το πρωτογενές συμπέρασμα ως συμπέρασμα:

Βήμα 1.1.1. Έλεγχος του εάν ο κανόνας ενεργοποιείται. (απόπειρα ικανοποίησης του συνδυασμού των προϋποθέσεων βάσει των γεγονότων/δεδομένων της βάσης δεδομένων).

Εάν ναι,

Βήμα 1.1.1.1. Αναφορά του πρωτογενούς αποτελέσματος.

Εάν όχι,

Βήμα 1.1.1.2. Διαγραφή του πρωτογενούς αποτελέσματος.

Εάν δεν είναι δυνατός ο έλεγχος (κάποιες προϋποθέσεις δεν είναι γνωστό αν ικανοποιούνται)

Βήμα 1.1.1.2. Αναδρομικός έλεγχος του εάν η κάθε προϋπόθεση ικανοποιείται.

Όπως και στη συλλογιστική προς τα εμπρός, είναι δυνατό να τίθενται ερωτήσεις αληθείας στον χρήστη κάθε φορά που δεν ικανοποιείται μία προϋπόθεση. Όμως, αντί της συνεχώς επαυξανόμενης βάσης δεδομένων της συλλογιστικής προς τα εμπρός, στη συλλογιστική προς τα πίσω αυξάνεται ο αριθμός των προϋποθέσεων που πρέπει να ικανοποιηθούν προκειμένου να επαληθευτεί το ζητούμενο συμπέρασμα.. Στη συλλογιστική προς τα πίσω, οι ερωτήσεις προς τον χρήστη μοιάζουν κατευθυνόμενες, μιας και γίνονται όλο και πιο λεπτομερείς. Γι' αυτό το λόγο, η συλλογιστική αυτή είναι πιο αποδοτική από τη συλλογιστική προς τα εμπρός.

Καθώς η συλλογιστική προς τα εμπρός παρουσιάζει προβλήματα συνδυαστικής έκρηξης σε μεγάλες βάσεις δεδομένων και για πολλούς κανόνες, αλλά είναι ιδιαίτερα αποτελεσματική και διεξοδική σε μικρές βάσεις δεδομένων και για λίγους κανόνες, είναι δυνατός ο συνδυασμός των δύο συλλογιστικών οπότε χρησιμοποιείται αρχικά η συλλογιστική προς τα πίσω για την απόδειξη πιο γενικών προϋποθέσεων ακολουθούμενη από τη συλλογιστική προς τα εμπρός για την απόδειξη του ζητούμενου.

4.2.2. Εμπειρα συστήματα (ΕΣ, expert systems)

Η δομή των ΕΣ είναι ίδια με αυτή των συστημάτων κανόνων. Έτσι, ένα ΕΣ πρέπει να μπορεί να επεξηγήσει τον τρόπο με τον οποίο φτάνει σε ένα αποτέλεσμα καθώς και να μπορεί να απαντά σε ερωτήσεις σχετικά με αυτό. Η κύρια διαφορά των ΕΣ και των συστημάτων κανόνων έγκειται:

(α) Στο θέμα το οποίο επιλύουν. Ενώ αυτό είναι γενικότερο για τα συστήματα κανόνων, τα ΕΣ προσεγγίζουν προβλήματα σε σημαντικούς και πολύ εξειδικευμένους/περιορισμένους τομείς (πχ. ιατρική, μαθηματικά, μηχανολογία, γεωλογία, επιστήμη υπολογιστών, επιχειρήσεις, νομική, άμυνα, εκπαίδευση), τα οποία απαιτούν έναν ή περισσότερους ειδικούς (πχ. γιατρό, ορυκτολόγο). Τα προβλήματα αυτά μπορεί να εκφράζονται ως προβλήματα διάγνωσης (πάθηση, μηχανική βλάβη, λάθος μαθητή κλπ.), κατασκευαστικά προβλήματα (ενός κτιρίου ή υπολογιστικού συστήματος), ή προβλήματα επεξήγησης (πχ. γεωλογικών δεδομένων). Τα συμπεράσματα στα οποία καταλήγουν τα ΕΣ αποτελούν αποφάσεις με τη μορφή παροχής εξειδικευμένης γνώσης, διάγνωσης και συμβουλών.

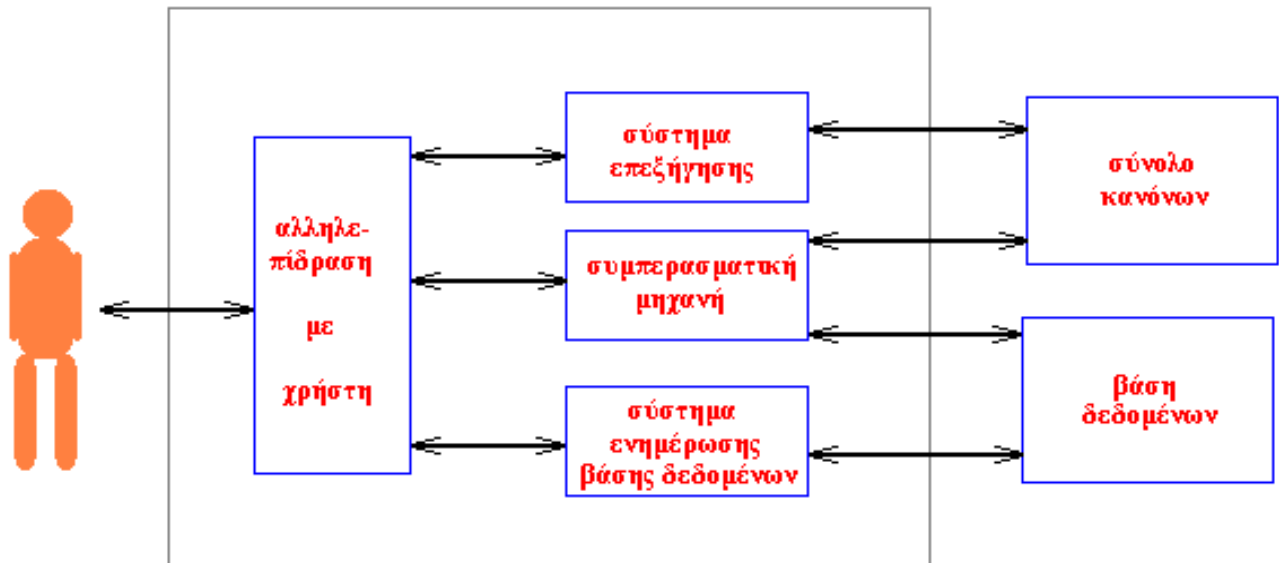
(β) Στην πολυπλοκότητά της δομής τους. Η κωδικοποίηση της πιο βαθιάς, εξειδικευμένης γνώσης είναι ευριστικής μορφής, βασισμένη περισσότερο σε εμπειρικούς κανόνες (οι οποίοι είναι διαισθητικοί) παρά σε συγκεκριμένα γεγονότα ή βεβαιότητες. Έτσι, απαιτείται όχι μόνο η έκφραση διαισθητικών κανόνων οι οποίοι απομακρύνονται αισθητά από τη δηλωτική γνώση, αλλά και στη σύνθεση κανόνων οι οποίοι εκφράζουν βαθιά, διαδικαστική γνώση του θέματος το οποίο επιλύουν. Συνεπώς, ο τρόπος

²¹ Σε τέτοιες περιπτώσεις η συλλογιστική προς τα εμπρός είναι καθαρά μη αποδοτική από άποψη εφαρμογής κανόνων καθώς και από άποψη άσκοπου (μη κατευθυνόμενου) εμπλουτισμού της βάσης δεδομένων.

²² Για όλα τα ζώα στο συγκεκριμένο παράδειγμα.

αναπαράστασης της γνώσης καθώς και της συλλογιστικής σε ένα ΕΣ εξαρτάται κατά πολύ από το συγκεκριμένο πρόβλημα.

ΕΣ



Σχήμα 28. Βασική δομή ΕΣ.

Η δημιουργία ενός ΕΣ απαιτεί την εξαγωγή γνώσης (*knowledge acquisition*) από τον ειδικό, γνώση η οποία είναι δύσκολο όχι μόνο να εξαχθεί αλλά και να αναπαρασταθεί με τέτοιο τρόπο ώστε να καταστεί διαχειρίσιμη από ένα σύστημα ΤΝ υλοποιημένο σε H/Y²³. Η δημιουργία ενός ΕΣ αποτελεί την ευθύνη του μηχανικού γνώσης (*knowledge engineer*), ενός εξειδικευμένου προγραμματιστή ο οποίος συνεργάζεται αφενός με τον ειδικό και αφετέρου με τους χρήστες προκειμένου να εξάγει τη γνώση και να υλοποιήσει κατάλληλα το σύστημα (από άποψη πληροφορίας, κατάλληλης γλώσσας προγραμματισμού, δομής ΕΣ και ικανοποιητικής αλληλεπίδρασης με τον χρήστη). Οι πρώτες προσπάθειες δημιουργίας του ΕΣ (έμπειρης γνώσης και αντίστοιχων κανόνων) είναι σχεδόν πάντα ανεπιτυχείς. Απαιτείται σειρά από συνεχώς βελτιούμενα ΕΣ τα οποία αφενός προσεγγίζουν τον τρόπο σκέψης και λήψης αποφάσεων του ειδικού και αφετέρου έχουν τη δυνατότητα (φαινομενικά) αβίαστης αλληλεπίδρασης με τον χρήστη όσον αφορά στις ερωτήσεις του ΕΣ προκειμένου να συλλεγεί πληροφορία καθώς και στις ερωτήσεις του χρήστη σχετικά με τις αποφάσεις του ΕΣ. Το Σχήμα 28 παρουσιάζει τα κυριότερα μέρη ενός ΕΣ.

Λόγω του ότι η δημιουργία ενός ΕΣ απαιτεί πολύ χρόνο καθώς και υπολογιστική προσπάθεια, πρέπει να πληρούνται τα εξής προκειμένου να αποφασιστεί η υλοποίησή του:

- Τα οφέλη πρέπει τουλάχιστον να αντισταθμίζουν το κόστος κατασκευής του ΕΣ.
- Η έμπειρη γνώση πρέπει να μη είναι εύκολα προσβάσιμη αλλά να είναι απαραίτητη ή ιδιαίτερα χρήσιμη σε πληθώρα περιπτώσεων. Εφόσον η εξειδικευμένη γνώση είναι εύκολο να βρεθεί τότε μάλλον δεν είναι απαραίτητο το ΕΣ, ενώ εάν η γνώση είναι πολύ εξειδικευμένη και η πρόσβαση σε αυτή δύσκολη ή/και ακριβή τότε η δημιουργία ενός ΕΣ είναι συμφέρουσα.
- Το πρόβλημα πρέπει να μην αφορά σε κινητική επιδεξιότητα (καθαρά διαδικαστική γνώση), η οποία δε μπορεί να εκφραστεί μέσω δηλωτικής γνώσης (άρα κατηγορικής λογικής, σχημάτων και κανόνων).
- Το πρόβλημα πρέπει να είναι καλά δομημένο και να μη εμπεριέχει πολλή καθημερινή γνώση, η οποία είναι δύσκολο να περιγραφεί και αναπαρασταθεί. Με άλλα λόγια, η δηλωτική γνώση καλά καθορισμένων και περιορισμένων πεδίων ενδείκνυται για ΕΣ, ενώ η πλατιά, γενικευμένη, εμπειρική γνώση όχι.

²³ Αυτό γίνεται εύκολα κατανοητό από το γεγονός ότι ενώ η γνώση του ειδικού είναι διαδικαστική, πρέπει να αναπαρασταθεί μέσω κανόνων σε δηλωτική μορφή (βλέπε σχετικά της παραγράφου 1.4.3.).

(ε) Πρέπει να μην είναι δυνατή η επίλυση του προβλήματος με άλλες υπολογιστικές τεχνικές. Αν, για παράδειγμα, υπάρχει κάποιος αλγόριθμος ο οποίος υλοποιεί τη λύση, τότε το ΕΣ δεν ενδείκνυται (λόγω κόστους, χρόνου – πολυπλοκότητας - και δυσκολίας κατασκευής).

(στ) Το πρόβλημα πρέπει να έχει κατάλληλο μέγεθος, δηλαδή να επαρκεί η γνώση ενός ή λίγων ειδικών προκειμένου να επιλυθεί το πρόβλημα σε μικρό χρονικό διάστημα (το πολύ σε μία ώρα).

(ζ) Οι ειδικοί οι οποίοι θα προμηθεύσουν τη γνώση πρέπει να είναι πρόθυμοι να συνεργαστούν, ενώ πρέπει να έχουν επιπλέον την ικανότητα μετάδοσης της γνώσης τους. Εφόσον ένας ειδικός αισθάνεται ότι απειλείται από το έτοιμο ΕΣ, προφανώς δεν θα μεταδώσει τη γνώση του σωστά και με σαφή τρόπο.

Από τα παραπάνω περιορίζεται σημαντικά ο αριθμός των προβλημάτων των οποίων η επίλυση μέσω ΕΣ κρίνεται σκόπιμη. Για τέτοια προβλήματα όμως, τα οφέλη είναι σημαντικότερα (οικονομία και αμεσότητα στην επίλυση). Παραδείγματα επιτυχημένων εμπορικών ΕΣ αποτελούν τα εξής:

- ± *ATTENDING* στην συμβουλευτική και την εκπαίδευση της αναισθησιολογίας,
- ± *EXPERT-D* στη διάγνωση δερματολογικών νοσημάτων, όπου και επιδεικνύεται ακρίβεια 84%,
- ± *CAA* στη διάγνωση αρρυθμιών στη καρδιολογία,
- ± *SYSTEM D* στη διάγνωση 50 νευρολογικών νοσημάτων όπου κύριο σύμπτωμα αποτελεί η ζάλη,
- ± *ONCOCIN* στην υποστήριξη και διόρθωση της θεραπευτικής αγωγής καρκινοπαθών,
- ± *CASNET* στη διάγνωση, θεραπεία και πρόγνωση 150 οφθαλμολογικών νοσημάτων, και ιδιαίτερα του γλαυκώματος,
- ± *MYCIN* στη διάγνωση μολυσματικών νοσημάτων στην παθολογία,
- ± *ANTICIPATOR* στην παροχή συμβουλών για αντιβιοτική θεραπεία μολυσματικών νοσημάτων στην παθολογία,
- ± *CADUCEUS* στη διάγνωση 500 περίπου νοσημάτων στην εσωτερική παθολογία,
- ± *PUFF* στη διάγνωση άσθματος, βρογχίτιδας, εμφυσήματος και άλλων νοσημάτων στην πνευμονολογία,
- ± *CENTAUR* στη διάγνωση νοσημάτων στη πνευμονολογία με 90% ακρίβεια διάγνωσης,
- ± *AI/RHEUM* στη διάγνωση 26 νοσημάτων στη ρευματολογία, με ακρίβεια μεταξύ 87% και 100%, ανάλογα με την κατηγορία του νοσήματος,
- ± *ISP* στην υποστήριξη του σχεδιασμού χειρουργικών επεμβάσεων,
- ± *SEER* στην ανάλυση ηλεκτροεγκεφαλογραφημάτων στη ψυχιατρική, και
- ± *HEADMED* στην παροχή ψυχοφαρμακολογικών συμβουλών.

Παρακάτω παρουσιάζονται δύο παραδείγματα ΕΣ, ένα απλό παράδειγμα (πρότυπο) ΕΣ²⁴ και ένα κλασσικό ΕΣ (*MYCIN*, Shortcliffe (1976)).

Πρότυπο ΕΣ

Το πρόβλημα αφορά στο τι βλάβη έχει ένα αυτοκίνητο, δεδομένων κάποιων φανερών προβλημάτων. Υπάρχουν τρία προβλήματα: με τα μπουζί, με τη μπαταρία και με τη μίζα. Η βάση δεδομένων του ΕΣ απαρτίζεται από τους εξής κανόνες:

<KANONAS 1>	<i>EAN</i>	<η βενζίνη φτάνει στη μηχανή>	<i>ΑΛΗΘΗΣ</i>	Λ
		<η μηχανή γυρίζει>	<i>ΑΛΗΘΗΣ</i>	
	<i>TOTE</i>	<το πρόβλημα έγκειται στα μπουζί>	<i>ΑΛΗΘΕΣ</i>	
<KANONAS 2>	<i>EAN</i>	<η μηχανή γυρίζει>	<i>ΨΕΥΔΕΣ</i>	Λ
		<ανάβουν τα φώτα>	<i>ΨΕΥΔΕΣ</i>	
	<i>TOTE</i>	<το πρόβλημα έγκειται στη μπαταρία>	<i>ΑΛΗΘΕΣ</i>	
<KANONAS 3>	<i>EAN</i>	<η μηχανή γυρίζει>	<i>ΨΕΥΔΗΣ</i>	Λ
		<ανάβουν τα φώτα>	<i>ΑΛΗΘΗΣ</i>	

²⁴ Λόγω της απλουστευμένης μορφής του, αυτό το ΕΣ προσεγγίζει ένα σύστημα κανόνων.

TOTE <το πρόβλημα έγκειται στη μίζα> ΑΛΗΘΕΣ

<KANONAS 4>

EAN <υπάρχει βενζίνη στο ντεπόζιτο> ΑΛΗΘΗΣ

TOTE <η βενζίνη φτάνει στη μηχανή> ΑΛΗΘΕΣ

Υποθέτοντας ότι δεν είναι γνωστή η βλάβη, το παρόν ΕΣ προσπαθεί να επαληθεύσει/διαψεύσει κάθε μία από τις βλάβες ξεχωριστά:

α) Πρόβλημα με τα μπουζί. Ο κανόνας 1 είναι σχετικός, άρα το ΕΣ προσπαθεί να επαληθεύσει/διαψεύσει το εάν η βενζίνη φτάνει στη μηχανή και εάν η μηχανή γυρίζει. Για το πρώτα από αυτά, ο κανόνας 4 είναι σχετικός, άρα το ΕΣ πρέπει να επαληθεύσει/διαψεύσει το εάν υπάρχει βενζίνη στο ντεπόζιτο. Αφού δεν υπάρχουν κανόνες με αυτό το επακόλουθο, τίθεται η παρακάτω ερώτηση στην χρήστη "Είναι αληθές ότι υπάρχει βενζίνη στο ντεπόζιτο;" Εφόσον η απάντηση είναι "ναι", το κομμάτι αυτό δεδομένων προστίθεται στη βάση δεδομένων. Τώρα το ΕΣ αποφαινεται ότι, αφού υπάρχει βενζίνη στο ντεπόζιτο, τότε η βενζίνη φτάνει στη μηχανή (κανόνας 4). Απομένει λοιπόν να διευκρινιστεί εάν η μηχανή γυρίζει. Κάτι σχετικό δεν υπάρχει στη βάση δεδομένων και δεν υπάρχουν κανόνες οι οποίοι να οδηγούν σε αυτό, άρα τίθεται η ερώτηση στη χρήστη "Είναι αληθές ότι η μηχανή γυρίζει;" Εστω ότι η απάντηση είναι "όχι". Αφού δεν υπάρχουν άλλοι κανόνες οι οποίοι να μπορούν να χρησιμοποιηθούν προκειμένου να επαληθευτεί το πρόβλημα με τα μπουζί (κανόνας 1), προκύπτει ότι αυτή η βλάβη δεν υφίσταται.

(β) Πρόβλημα με τη μπαταρία. Δεδομένης της πληροφορίας του χρήστη ότι η μηχανή δεν γυρίζει (το οποίο έχει προστεθεί στη βάση δεδομένων), απομένει στον κανόνα 2 να αποδειχτεί ότι τα φώτα ανάβουν. Αφού δεν υπάρχουν σχετικοί κανόνες με αυτό το επακόλουθο, τίθεται η παρακάτω ερώτηση στην χρήστη "Είναι αληθές ότι τα φώτα ανάβουν;" Εστω ότι η απάντηση είναι "όχι". Το κομμάτι αυτό δεδομένων προστίθεται στη βάση δεδομένων. Τώρα το ΕΣ αποφαινεται ότι, αφού η μηχανή δεν γυρίζει και τα φώτα δεν ανάβουν, υπάρχει βλάβη στη μπαταρία (κανόνας 2).

Κάποια ΕΣ σταματούν εδώ, έχοντας αποδείξει κάποια από τις ενδεχόμενες βλάβες. Καθόσον όμως είναι δυνατό να υπάρχουν περισσότερες από μία βλάβες, είναι σύνηθες να εξετάζονται όλες οι ενδεχόμενες βλάβες.

(γ) Πρόβλημα με τη μίζα. Ο κανόνας 3 είναι σχετικός, αλλά καθόσον τα φώτα δεν ανάβουν οι προϋποθέσεις δεν πληρούνται, προκύπτει ότι η βλάβη δεν έγκειται στη μίζα.

Η αλληλεπίδραση ΕΣ-χρήστη έχει λοιπόν κάποια τέτοια μορφή:

ΕΣ: "Είναι αληθές ότι υπάρχει βενζίνη στο ντεπόζιτο;"
Χρήστης: "Ναι."
ΕΣ: "Είναι αληθές ότι η μηχανή γυρίζει;"
Χρήστης: "Όχι."
ΕΣ: "Είναι αληθές ότι τα φώτα ανάβουν;"
Χρήστης: "Όχι."
ΕΣ: "Συμπεραίνω ότι το πρόβλημα έγκειται στη μπαταρία."

Οπως φαίνεται και από αυτό το παράδειγμα, η συλλογιστική προς τα πίσω είναι τι σύνηθες εργαλείο ενός ΕΣ διαγνωστικής, όπου η αναζήτηση πραγματοποιείται σε βάθος και με οπισθοδρόμηση (δηλαδή εξερευνούνται όλοι οι δυνατοί τρόποι να αποδειχτεί κάθε ενδεχόμενο, το ένα μετά το άλλο). Η δυνατότητα επεξήγησης του γιατί το ΕΣ ρωτά κάτι ή του πώς το ΕΣ φτάνει σε κάποιο συμπέρασμα λαμβάνει κάποια τέτοια μορφή για το παρόν παράδειγμα:

ΕΣ: "Είναι αληθές ότι υπάρχει βενζίνη στο ντεπόζιτο;"
Χρήστης: "Ναι."
ΕΣ: "Είναι αληθές ότι η μηχανή γυρίζει;"

Χρήστης: "Όχι."
ΕΣ: "Είναι αληθές ότι τα φώτα ανάβουν;"
Χρήστης: "Γιατί;"
ΕΣ: "Προσπαθώ να συμπεράνω εάν το πρόβλημα έγκειται στη μπαταρία. Ισχύει ότι δεν είναι αληθές ότι η μηχανή γυρίζει. Εφόσον δεν είναι αληθές ότι τα φώτα ανάβουν, τότε το πρόβλημα έγκειται στη μπαταρία. Λοιπόν, είναι αληθές ότι τα φώτα ανάβουν;"
Χρήστης: "Όχι."
ΕΣ: "Συμπεραίνω ότι το πρόβλημα έγκειται στη μπαταρία."
Χρήστης: "Πώς;"
ΕΣ: "Από τον κανόνα 2, EAN < η μηχανή γυρίζει> ΨΕΥΔΕΣ (από την απάντηση του χρήστη) Λ <ανάβουν τα φώτα> ΨΕΥΔΕΣ (από την απάντηση του χρήστη)."

Η επεξήγηση αφορά στη σειρά των κανόνων που χρησιμοποιούνται προκειμένου να δοθεί απάντηση. Δυστυχώς συχνά δε θεωρείται ιδιαίτερα χρήσιμη από τον χρήστη. Αυτό συμβαίνει κυρίως γιατί αναφέρεται στην πιο επιφανειακή γνώση του θέματος (η οποία εκφράζεται μέσω των σχετικών κανόνων) και όχι στη βαθιά γνώση (στο τι αναπαριστούν αυτοί οι κανόνες σχετικά με τη δομή του προβλήματος και τον εμπειρικό συλλογισμό του ειδικού). Για παράδειγμα, στο παραπάνω παράδειγμα η ιδανική επεξήγηση θα ήταν ότι και η μηχανή και τα φώτα απαιτούν τη λειτουργία της μπαταρίας, το οποίο αποτελεί τη βάση του κανόνα 2. Η δημιουργία επεξηγήσεων αποτελεί ένα ευρύ και ενδιαφέρον πεδίο έρευνας το οποίο επικεντρώνει στην αποδοτική αλληλεπίδραση ΕΣ-χρήστη: πώς να παρουσιαστεί ένας συλλογισμός προς το συμπέρασμα με τέτοιο τρόπο ώστε να γίνει κατανοητός από τον χρήστη και τι σημαίνει αυτό σχετικά με την αναπαράσταση της βαθιάς γνώσης του προβλήματος²⁵. Ετσι, βασικούς σκοπούς της επεξηγηματικής ικανότητας ενός ΕΣ αποτελούν αφενός η εναλλακτική έκφραση της επεξήγησης (εάν η αρχική εξήγηση δε γίνει κατανοητή από τον χρήστη) και αφετέρου η επεξήγηση σε διάφορα επίπεδα γνώσης (από το πιο επιφανειακό σταδιακά στο πιο βαθύ), το ΕΣ δεν μπορεί να εκφράσει την επεξήγηση με άλλο τρόπο.

Κλασσικό ΕΣ (MYCIN)

Το MYCIN αποτελεί ένα από τα πρώιμα - και πλέον κλασσικά - ΕΣ, το οποίο έχει επηρεάσει το σχεδιασμό των περισσότερων εμπορικών ΕΣ. Αποσκοπεί αφενός στη διάγνωση ορισμένων μολυσματικών ασθενειών του αίματος και αφετέρου στον καθορισμό της κατάλληλης αντιμικροβιακής θεραπείας. Επιπλέον διαθέτει τη δυνατότητα λεπτομερούς επεξήγησης των αποφάσεων που λαμβάνει.

Λόγω του ότι για τη ακριβή διάγνωση των μολυσματικών ασθενειών αίματος τις οποίες χειρίζεται το MYCIN απαιτείται καλλιέργεια του αίματος του ασθενούς (τα αποτελέσματα της οποίας προκύπτουν μετά από 48 ώρες, χρόνος μέσα στον οποίο ο ασθενής ενδέχεται να έχει ήδη πεθάνει), είναι απαραίτητο η διάγνωση να πραγματοποιηθεί άμεσα έστω και με περιορισμένα δεδομένα (ελλιπείς πληροφορίες). Η προτεινόμενη θεραπεία αναγκαστικά λοιπόν καλύπτει μία ομπρέλλα από πιθανές αιτίες των συμπτωμάτων. Επιπλέον, η επιλογή της θεραπείας βασίζεται στην ευαισθησία του οργανισμού, στον εντοπισμό και το είδος της μόλυνσης καθώς και στην αποτελεσματικότητα του φαρμάκου.

Το MYCIN αποτελεί ΕΣ ανάλυσης μέσω συλλογιστικής προς τα πίσω με αναζήτηση σε βάθος και οπισθοδρόμηση. Απαρτίζεται από περίπου 500 κανόνες, όπου κάθε κανόνας συνοδεύεται από έναν βαθμό βεβαιότητας ο οποίος καθορίζει το πόσο ισχυρή είναι σχέση προϋποθέσεων-επακολούθων²⁶. Ο βαθμός βεβαιότητας λαμβάνει τιμές μέσα από το διάστημα [0,+1], όπου το 0 χαρακτηρίζει την πλήρη έλλειψη βεβαιότητας στο επακόλουθο και το 1 χαρακτηρίζει την πλήρη βεβαιότητα σε αυτό. Το παρακάτω αποτελεί γλωσσική (στα Αγγλικά) έκφραση ενός από τους κανόνες του MYCIN:

²⁵ Σημειώνεται ότι αυτό λειτουργεί παράλληλα με τον τρόπο με τον οποίο συμπεραίνει ένας ειδικός, ο οποίος γνωρίζει τις προϋποθέσεις ενός επακόλουθου, αλλά συχνά παραλείπει να επεξηγήσει δηλαδή να εκφράσει τη βαθιά, την έμπειρη γνώση του.

²⁶ Χαρακτηριστικό το οποίο υιοθετήθηκε αργότερα από πολλά ΕΣ.

IF the infection is pimary-bacteremia AND
the site of the culture is one of the sterile sites AND
the suspected portal of entry is the gastrointestinal tract
THEN there is suggestive evidence (0.7) that infection is bacteroid.

όπου το 0.7 εκφράζει την (αρκετά ισχυρή) βεβαιότητα στο επακόλουθο δεδομένης της αληθείας των προϋποθέσεων. Καθότι οι προϋποθέσεις ενδέχεται να προέρχονται από άλλους κανόνες (ως επακόλουθα τους), μπορεί κάποιες από αυτές να συνοδεύονται από βαθμό βεβαιότητας. Σε αυτή την περίπτωση οι βαθμοί βεβαιότητας όλων των προϋποθέσεων συνδυάζονται (μέσω του αριθμητικού τελεστή **MIN** για προϋποθέσεις συνδυασμένες μέσω του λογικού τελεστή **Λ** και μέσω του **MAX** για προϋποθέσεις συνδυασμένες μέσω του **V**). Ο εξαγόμενος βαθμός βεβαιότητας του συνδυασμού των προϋποθέσεων πολλαπλασιάζεται με τον βαθμό βεβαιότητας του κανόνα προκειμένου να προκύψει ο βαθμός βεβαιότητας στο επακόλουθο του κανόνα. Έτσι, εάν οι προϋποθέσεις του παραπάνω κανόνα έχουν τους εξής βαθμούς βεβαιότητας:

the infection is pimary-bacteremia (0.3) AND
the site of the culture is one of the sterile sites (0.9) AND
the suspected portal of entry is the gastrointestinal tract (1)

ο συνδυασμός τους λαμβάνει βαθμό βεβαιότητας $\text{MIN}(0.3, 0.9, 1) = 0.3$ ενώ ο βαθμός βεβαιότητας στο επακόλουθο *that infection is bacteroid* ισούται με $0.3 \cdot 0.7 = 0.21$.

Η γλώσσα προγραμματισμού η οποία χρησιμοποιήθηκε για την υλοποίηση του MYCIN είναι η LISP, άρα το ΕΣ εκφράζεται – στο κατώτερο επίπεδό του - καθαρά μέσω κατηγορικής λογικής, με κάθε κανόνα να αναπαριστάται ως μία έκφραση της κατηγορικής λογικής. Έτσι είναι δυνατή η χρήση δεδομένων καθώς και αποτελεσμάτων άλλων κανόνων ως όροι στο κατηγορημα-έκφραση του αντίστοιχου κανόνα, κάτι που προσδίδει μεγάλη ευελιξία και οικονομία έκφρασης στο ΕΣ. Μειονέκτημα αυτής της αναπαράστασης αποτελεί η πυκνή επεξηγηματική ικανότητα του MYCIN η οποία μειώνει τη διαφάνειά του κατά τη συλλογιστική και επεξηγηματική λειτουργία του.

Η αλληλεπίδραση χρήστη-MYCIN έχει τρία στάδια: κατά τη διάρκεια του πρώτου σταδίου συλλέγονται αρχικά δεδομένα τα οποία επιτρέπουν μία γενική διάγνωση (ομάδα παθήσεων). Κατά τη διάρκεια του δεύτερου σταδίου οι ερωτήσεις είναι πιο κατευθυνόμενες προκειμένου να επαληθευτούν/διαψευθούν κάποιες υποθέσεις, ενώ στο τέλος δίνεται κάποια πιο ειδική (αλλά ακόμα γενική) διάγνωση. Κατά τη διάρκεια του τρίτου σταδίου οι ερωτήσεις αποσκοπούν στην επιλογή κατάλληλης θεραπείας βάσει της διάγνωσης και της κατάστασης του ασθενούς. Επεξήγηση είναι δυνατό να δοθεί σε οποιοδήποτε σημείο της αλληλεπίδρασης χρήστη-ΕΣ, μετά από ερώτηση του χρήστη σχετικά με το γιατί ερωτήθηκε κάτι ή γιατί προέκυψε κάποια απόφαση, ενώ το MYCIN είναι ικανό να προτείνει εναλλακτικές θεραπείες εφόσον η πρώτη δεν κριθεί κατάλληλη.

Προκειμένου να μειωθεί ο τρέχων χώρος αναζήτησης του προβλήματος και να καταστεί πιο αποδοτική η συμπερασματική μηχανή χωρίς να ερωτάται ο χρήστης πληθώρα ερωτήσεων, χρησιμοποιούνται κάποιες ευριστικές μέθοδοι. Αρχικά τίθενται κάποιες σταθερές ερωτήσεις στον χρήστη, μέσω των οποίων το σύστημα παίρνει κάποιες γενικές κατευθύνσεις προκειμένου να αποκλείσει κάποιες ομάδες αιματολογικών παθήσεων και να επικεντρώσει σε κάποιες συγκεκριμένες ομάδες παθήσεων. Με αυτόν το τρόπο όχι μόνο μειώνεται σημαντικά ο χώρος του προβλήματος, αλλά και η σειρά των ερωταπαντήσεων γίνεται φιλικός προς τον χρήστη αφού προσομοιώνεται ουσιαστικά μία ιατρική επίσκεψη. Οι επόμενες ευριστικές μέθοδοι αφορούν στη σειρά εξέτασης των κανόνων από τη συμπερασματική μηχανή: προτιμούνται οι κανόνες με μεγάλους βαθμούς βεβαιότητας των συνδυασμών των προϋποθέσεων, ενώ δεν εξετάζονται κανόνες με βαθμούς βεβαιότητας των συνδυασμών προϋποθέσεων μικρότερους από 0.2.

Το MYCIN αναπτύχθηκε ώστε να (α) εξερευνήσει και προσομοιώσει τον τρόπο με τον οποίο οι ειδικοί ιατροί εκτελούν αυτές τις διαγνώσεις τους βασισμένοι σε ελλιπείς πληροφορίες, (β) εκτιμήσει την

ικανότητα ενός ΕΣ σε ένα πρακτικό, πραγματικό πρόβλημα, (γ) υποστηρίζει ειδικευόμενους ή επιμελητές ιατρούς (ή ακόμη και έμπειρους ιατρούς, δημιουργώντας ένα συμβούλιο ειδικών) στη διάγνωση τους. Αν και η απόδοση του MYCIN αποδείχτηκε συγκρίσιμη με αυτή των ειδικών ιατρών – και μάλιστα σε πολλές υποθέσεις υπερείχε των διαγνώσεων των ειδικών ιατρών του νοσοκομείου του Stanford –, δεν χρησιμοποιήθηκε ποτέ στην πράξη. Οι λόγοι της μη πρακτικής εφαρμογής του ήταν καθαρά νομικοί και ηθικοί, πχ. ποιός ευθύνεται σε περίπτωση λανθασμένης διάγνωσης και θάνατο του ασθενούς; Κάποια στοιχεία του MYCIN (πχ. το να θέτει άσκοπες ερωτήσεις, για παράδειγμα το εάν ο ασθενής είναι αλκοολικός πριν μάθει εάν ο ασθενής είναι νήπιος) διορθώθηκαν στις επόμενες εκδόσεις (NEOMYCIN). Οι νέες αυτές εκδόσεις υλοποιούν την κατηγοριοποίηση των παθήσεων βάσει των συμπτωμάτων μέσω σχήματος (παράγραφος 4.1.2), οπότε η επίλυση εμπλέκει την μετάβαση από τις πιο γενικές στις πιο ειδικές κατηγορίες παθήσεων καθώς και το ανάλογο (πιο εξειδικευμένο) ερωτηματολόγιο. Έτσι, το PUFF προέκυψε από το EMYCIN με πεδίο εξειδίκευσης το πρόβλημα των καρδιακών παθήσεων, ενώ το NEOMYCIN απορρέει από τα MYCIN και EMYCIN και έχει ως βασικό του στόχο την εκπαίδευση νέων ιατρών οι οποίοι δύνανται να ελέγξουν τη διάγνωση τους με αυτή του ΕΣ και σε περίπτωση ασυμφωνίας να ανατρέξουν στο σημείο της λανθασμένης απόφασης.

4.2.3. Ασαφή έμπειρα συστήματα (fuzzy expert systems)

Τα ασαφή ΕΣ αποτελούν επέκταση των ΕΣ της παραγράφου 4.2.2. Βασική πηγή έμφυσης τους είναι η ικανότητα της ΦΝ να χειρίζεται ανακριβή, αμφίσημα, ελλιπή, ποιοτικά ή γλωσσικά δεδομένα και πληροφορίες. Έτσι, τα ασαφή ΕΣ διαχειρίζονται τις μεταβλητές μέσω ασαφών (αντί δίτιμων) χαρακτηριστικών²⁷.

Ένα ασαφές ΕΣ έχει την ίδια δομή και τρόπο λειτουργίας με ένα κλασσικό ΕΣ (Σχήμα 28). Η βάση δεδομένων του απαρτίζεται από κανόνες της μορφής EAN-TOTE. Οι μεταβλητές-προϋποθέσεις λαμβάνουν κάποια ακριβή τιμή (ή κάποιο συγκεκριμένο διάστημα τιμών), η οποία εκφράζεται μέσω ποσοστών συμμετοχής από τις αντίστοιχες συναρτήσεις συμμετοχής που περιέχουν τη συγκεκριμένη τιμή. Αυτό επιτρέπει στους κανόνες να εκφράζονται ποιοτικά, με τρόπο που προσομοιώνει τη γλωσσική έκφραση της ΦΝ. Για παράδειγμα, ανατρέχοντας στο Σχήμα 8, ένας κανόνας ενός κλασσικού ΕΣ της μορφής:

<KANONAS ΕΣ>	EAN	<θερμοκρασία=0> ²⁸	ΑΛΗΘΗΣ
	TOTE	<φόρεσε καπέλλο και κασκόλ>	ΑΛΗΘΕΣ

εκφράζεται μέσω των παρακάτω δύο κανόνων του ασαφούς ΕΣ:

<KANONAS I ασαφούς ΕΣ>	EAN	<θερμοκρασία $\hat{I}$ πολύ κρύο>	ΑΛΗΘΗΣ
	TOTE	<φόρεσε καπέλλο και κασκόλ >	ΑΛΗΘΕΣ
<KANONAS II ασαφούς ΕΣ>	EAN	<θερμοκρασία $\hat{I}$ κρύο>	ΑΛΗΘΗΣ
	TOTE	<φόρεσε κασκόλ >	ΑΛΗΘΕΣ

²⁷ Όπως αναφέρθηκε στην παράγραφο 2.4., η ασαφής λογική εκφράζει μία μεταβλητή μέσω διαφορετικών αλλά σχετιζόμενων χαρακτηριστικών τα οποία αλληλοσυμπληρώνονται (όσον αφορά στα ποσοστά συμμετοχής στις αντίστοιχες συναρτήσεις συμμετοχής) και συνολικά καλύπτουν το εύρος τιμών της μεταβλητής.

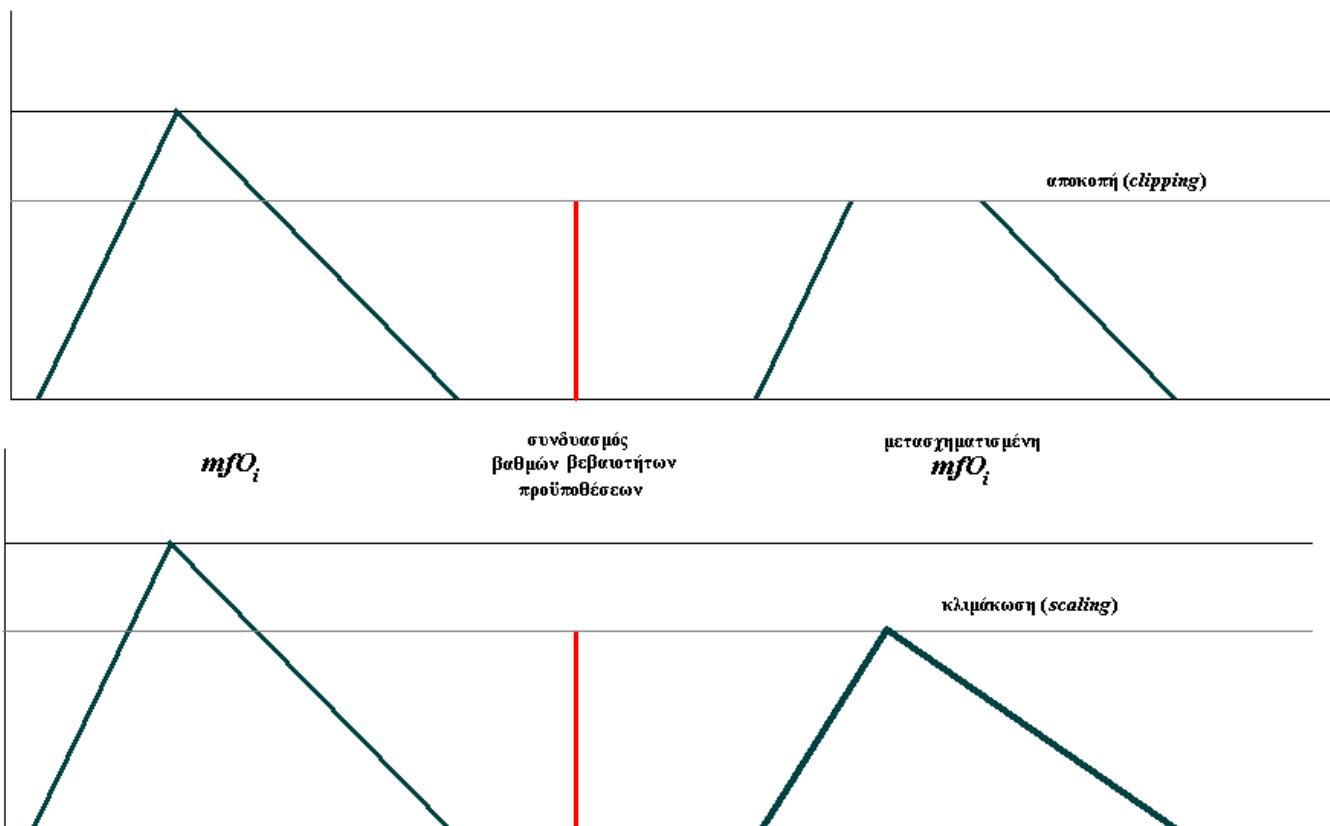
²⁸ Η για διάστημα τιμών της θερμοκρασίας [-5,2]:

<KANONAS ΕΣ>	EAN	<θερμοκρασία>-5>	ΑΛΗΘΗΣ Λ
		<θερμοκρασίαΕ2>	ΑΛΗΘΗΣ
	TOTE	<φόρεσε καπέλλο και κασκόλ>	ΑΛΗΘΕΣ

Το αποτέλεσμα είναι ότι τα εάν θα φορέσει κανείς καπέλλο και κασκώλ ή μόνο καπέλλο εκφράζεται ομαλά ως συνάρτηση της θερμοκρασίας στο ασαφές ΕΣ: για θερμοκρασίες με ποσοστό συμμετοχής στο χαρακτηριστικό *πολύ κρύο* αλλά όχι στο χαρακτηριστικό *κρύο* θα φορεθούν και τα δύο, για ποσοστό συμμετοχής χαρακτηριστικό *κρύο* αλλά όχι στο χαρακτηριστικό *πολύ κρύο* θα φορεθεί μόνο το κασκώλ, ενώ για θερμοκρασίες με ποσοστά συμμετοχής και στα δύο χαρακτηριστικά τον εάν θα φορεθούν και καπέλλο και κασκώλ ή μόνο το δεύτερο εξαρτάται από τα ποσοστά συμμετοχής. Η μετάβαση μεταξύ των δύο επακολουθών είναι ομαλή και εξαρτάται από όλους τους κανόνες τους σχετικούς με τα δύο επακόλουθα και τα ποσοστά συμμετοχής τους. Μία τέτοια ομαλή μετάβαση μεταξύ διαφορετικών (αλλά σχετιζόμενων/επικαλυπτόμενων) επακολουθών αποκτά ιδιαίτερη σημασία σε προβλήματα ελέγχου (*control*), πχ. στη κίνηση ενός ρομποτικού βραχίονα. Επιπλέον είναι πιο εύκολα κατανοητή από τον χρήστη, άρα πιο εύκολη στην έκφραση (υλοποίηση) καθώς και στην κατανόηση των αντίστοιχων κανόνων καθώς και της συλλογιστικής (διαφάνεια του ασαφούς ΕΣ). Τέλος, σε πολλές περιπτώσεις επιτυγχάνεται η έκφραση των περιορισμών και σχέσεων προϋποθέσεων-επακολουθών του προβλήματος μέσω πιο λίγων κανόνων.

Τα παρακάτω στάδια ακολουθούνται για την δημιουργία και λειτουργία ενός ασαφούς ΕΣ:

- Στάδιο ασαφοποίησης (*fuzzification stage*). Όλες οι μεταβλητές του προβλήματος (σχετικές είτε με προϋποθέσεις είτε με επακόλουθα) εκφράζονται μέσω της ασαφούς λογικής (μέσω συναρτήσεων και ποσοστών συμμετοχής).



Σχήμα 29. Μετασχηματισμοί αποκοπής και κλιμάκωσης της συνάρτησης συμμετοχής του επακολουθού ενός κανόνα ασαφούς ΕΣ.

- Συμπερασματικό στάδιο (*inference stage*). Οι EAN-TOTE κανόνες εκφράζουν ποιοτικά τη σχέση μεταξύ προϋποθέσεων και επακολουθών ως εξής

EAN	(I_1 είναι mfI_{1i})	ΑΛΗΘΗΣ	Λ/Υ
	(I_2 είναι mfI_{2j})	ΑΛΗΘΗΣ	Λ/Υ
...			Λ/Υ

(I_n είναι mfI_{nk}) ΑΛΗΘΗΣ
TOTE (O είναι mfO_i)

όπου $I_1, I_2, \dots, I_n$ είναι οι ασαφώς εκφρασμένες προϋποθέσεις, O είναι το ασαφώς εκφρασμένο επακόλουθο, και $mfI_{1i}, mfI_{2j}, \dots, mfI_{nk}$ και mfO_i είναι οι αντίστοιχες συναρτήσεις συμμετοχής των μεταβλητών που σχετίζονται με τον κανόνα. Οι βαθμοί βεβαιότητας των προϋποθέσεων υπολογίζονται από τα ποσοστά συμμετοχής τους στις αντίστοιχες συναρτήσεις συμμετοχής, και συνδυάζονται μέσω των λογικών τελεστών **MIN** ή **MAX** για Λ και V λογικούς τελεστές, αντίστοιχα (όπως στο MYCIN, παράγραφος 4.2.2.) ώστε να αποδώσουν το βαθμό βεβαιότητας του επακολούθου O . Αυτός μετασχηματίζει τη συνάρτηση συμμετοχής mfO_i με κάποιον τρόπο. Οι δύο πιο συνήθεις μετασχηματισμοί της συνάρτησης συμμετοχής του επακολούθου φαίνονται στο **Σχήμα 29**.

- Φάση σύνθεσης (composition stage). Οι κανόνες οι οποίοι αναφέρονται στην ίδια μεταβλητή-επακόλουθο και των οποίων οι βαθμοί βεβαιότητας (για τις διάφορες συναρτήσεις συμμετοχής είναι μη μηδενικοί συνδυάζονται (πχ. αθροίζονται), δημιουργώντας τρόπον τινά μία σύμπλοκη συνάρτηση συμμετοχής.
- Φάση απο-ασαφοποίησης (de-fuzzification stage). Κάθε επακόλουθο λαμβάνει μία τιμή (crisp value) η οποία προέρχεται από την μίας τιμής (πχ. το κέντρο βάρους της σύμπλοκης συνάρτησης συμμετοχής).

Τα βασικά πλεονεκτήματα των ασαφών ΕΣ έναντι των ΕΣ επικεντρώνουν στην:

- (α) Ευρωστία λειτουργίας του ασαφούς ΕΣ. Η λειτουργία καθίσταται δυνατή ακόμη και με ελλιπή ή ανακριβή δεδομένα. Η ομαλή μετάβαση μεταξύ διαφορετικών επακολούθων ενισχύει τη διαφάνεια του ασαφούς ΕΣ καθώς και την εφαρμογή του σε προβλήματα ελέγχου.
- (β) Ευελιξία. Η απόδοση του συστήματος είναι εύκολο να μεταβληθεί, πχ. μέσω αλλαγής του αριθμού, των ορίων ή των μορφών των συναρτήσεων συμμετοχής των μεταβλητών ή μέσω προσθήκης/διαγραφής/μετατροπής των κανόνων.
- (γ) Οικονομία. Συνήθως, μικρός αριθμός κανόνων επαρκεί για ικανοποιητική λειτουργία.

4.3. ΑΝΑΦΟΡΕΣ

1. Minsky, M., 1975. A framework for representing knowledge (MIT-AI Laboratory Memo 306, June, 1974) reprinted in **The Psychology of Computer Vision** (P.H.Winston), McGraw-Hill, New York, U.S.A.
2. Shortcliffe, E.H., 1976. **Computer-based medical consultations: MYCIN**. Elsevier Publishing Corporation Inc., New York, U.S.A.
3. Weizenbaum, J. 1966. ELIZA - A Computer Program For the Study of Natural Language Communication Between Man and Machine, *Communications of the ACM*, Vol. 9, pp. 36-45.
4. Winograd, T., 1972. Procedures as a representation for data in a computer program for understanding natural language, *Cognitive Psychology*, Vol. 3., pp. 1-191. Also in **Understanding Natural Language** (1972), Academic Press, New York, U.S.A.



Πανεπιστήμιο Πειραιώς
Τμήμα Μηχανικής Διοίκησης και Τεχνολογίας
Διαχείριση Πληροφοριών και Γλώσσες Προγραμματισμού





ΕΚΜΑΘΗΣΗ



Πανεπιστήμιο Πειραιώς
Τμήμα Μηχανικής Διοίκησης και Τεχνολογίας
Διαχείριση Πληροφοριών και Γλώσσες Προγραμματισμού



5. ΜΗΧΑΝΙΚΗ ΕΚΜΑΘΗΣΗ

Ένα από τα σκληρότερα επιχειρήματα των πολέμιων της ΤΝ είναι ότι τα συστήματα ΤΝ δεν μπορούν να μάθουν έτσι ώστε να είναι ικανά να αλλάξουν και να προσαρμοστούν στις απαιτήσεις του περιβάλλοντός τους. Η εκμάθηση του περιβάλλοντος προκειμένου να επιτευχθεί η αλληλεπίδραση με αυτό αποτελεί σημαντικό βήμα στην ΤΝ²⁹.

5.1. ΣΤΡΑΤΗΓΙΚΕΣ ΕΚΜΑΘΗΣΗΣ ΤΕΧΝΙΚΩΝ ΤΝ

Για την εκπαίδευση ενός συστήματος ΤΝ είναι απαραίτητη η ύπαρξη διδάσκοντος, δηλαδή η παρέμβαση του χρήστη/προγραμματιστή στο σύστημα ΤΝ. Κάποιες στρατηγικές εκμάθησης συστημάτων ΤΝ αποτελούν:

- ± Αποστήθιση (rote learning). Με αυτή τη στρατηγική δεν εκτελείται καμία συμπερασματική διαδικασία ή άλλου είδους μετασχηματισμός της γνώσης του προβλήματος/περιβάλλοντος από το σύστημα ΤΝ. Δίνεται ένα σύνολο παραδειγμάτων τα οποία αποθηκεύονται αυτούσια (μέσω κάποιας κατάλληλης αναπαράστασης αλλά χωρίς αφαίρεση ή άλλου είδους μετασχηματισμό) στη μνήμη του Η/Υ. Κατά την παρουσίαση ενός αντικειμένου για αναγνώριση εξετάζεται η πλήρης ταύτιση αυτού με κάποιο από τα αρχικά παραδείγματα. Ένα παράδειγμα αποστήθισης αποτελεί η αναγνώριση βάσει προτύπων της παραγράφου 2.2.1.
- ± Εκμάθηση μέσω ανάθεσης γνώσης (learning by instruction). Η γνώση του διδάσκοντος μετασχηματίζεται (αναπαριστάται έτσι ώστε να βρίσκεται) σε μία μορφή η οποία (α) είναι επεξεργάσιμη από το σύστημα ΤΝ, και (β) μπορεί να ενσωματωθεί στην υπάρχουσα γνώση. Με άλλα λόγια, καθίσταται και πάλι αναγκαία η επιλογή κατάλληλης αναπαράστασης (μορφής) της γνώσης από τον διδάσκοντα. Η γνώση σε αυτή τη στρατηγική εκμάθησης είναι δηλωτικής μορφής, άρα μπορεί να εκφράζεται μέσω παραδειγμάτων, σχημάτων κλπ. Ένα παράδειγμα αποστήθισης αποτελεί η συντακτική περιγραφή της παραγράφου 2.2.3.
- ± Εκμάθηση μέσω αναλογιών (learning by analogy). Πραγματοποιείται εκμάθηση όχι παραδειγμάτων ή γνώσης αλλά της σχέσης που αυτά έχουν με αποθηκευμένη γνώση σε κάποιο άλλο πεδίο ή περιβάλλον. Απαιτείται σημαντικά περισσότερη συμπερασματική διαδικασία από ότι στις προηγούμενες δύο στρατηγικές εκμάθησης, αφού το σύστημα ΤΝ εκτελεί τους μετασχηματισμούς της γνώσης από το ένα πεδίο στο άλλο ανεξάρτητα από τον διδάσκοντα (ο οποίος απλά παρουσιάζει τα παραδείγματα ή την γνώση). Έτσι, πρέπει το κατάλληλο παράδειγμα/γνώση στο γνωστό πεδίο να ανασυρθεί, να συσχετιστεί με το νέο παράδειγμα/γνώση και το αποτέλεσμα να αποθηκευτεί (αφού ενσωματωθεί) στην υπάρχουσα γνώση τη σχετική με το νέο πεδίο. Ουσιαστικά εκτελείται μεταφορά γνώσης από ένα γνωστό πεδίο στον χώρο του προβλήματος. Ένα παράδειγμα χρήσης αναλογίας στη ΦΝ αποτελεί η οδήγηση αυτοκινήτου από έναν οδηγό μοτοσυκλέτας.
- ± Εκμάθηση μέσα από παραδείγματα (learning from examples). Βασισμένη στην επαγωγική γνώση, η στρατηγική αυτή αποτελεί τον πιο συνηθισμένο τρόπο εκμάθησης της ΤΝ. Ο διδάσκων παράγει ένα σύνολο παραδειγμάτων (θετικών μόνο ή θετικών καθώς και αρνητικών). Το σύστημα εκμάθησης προσπαθεί να δημιουργήσει μία υπόθεση η οποία πληροί όλα τα θετικά παραδείγματα αλλά κανένα από τα αρνητικά.

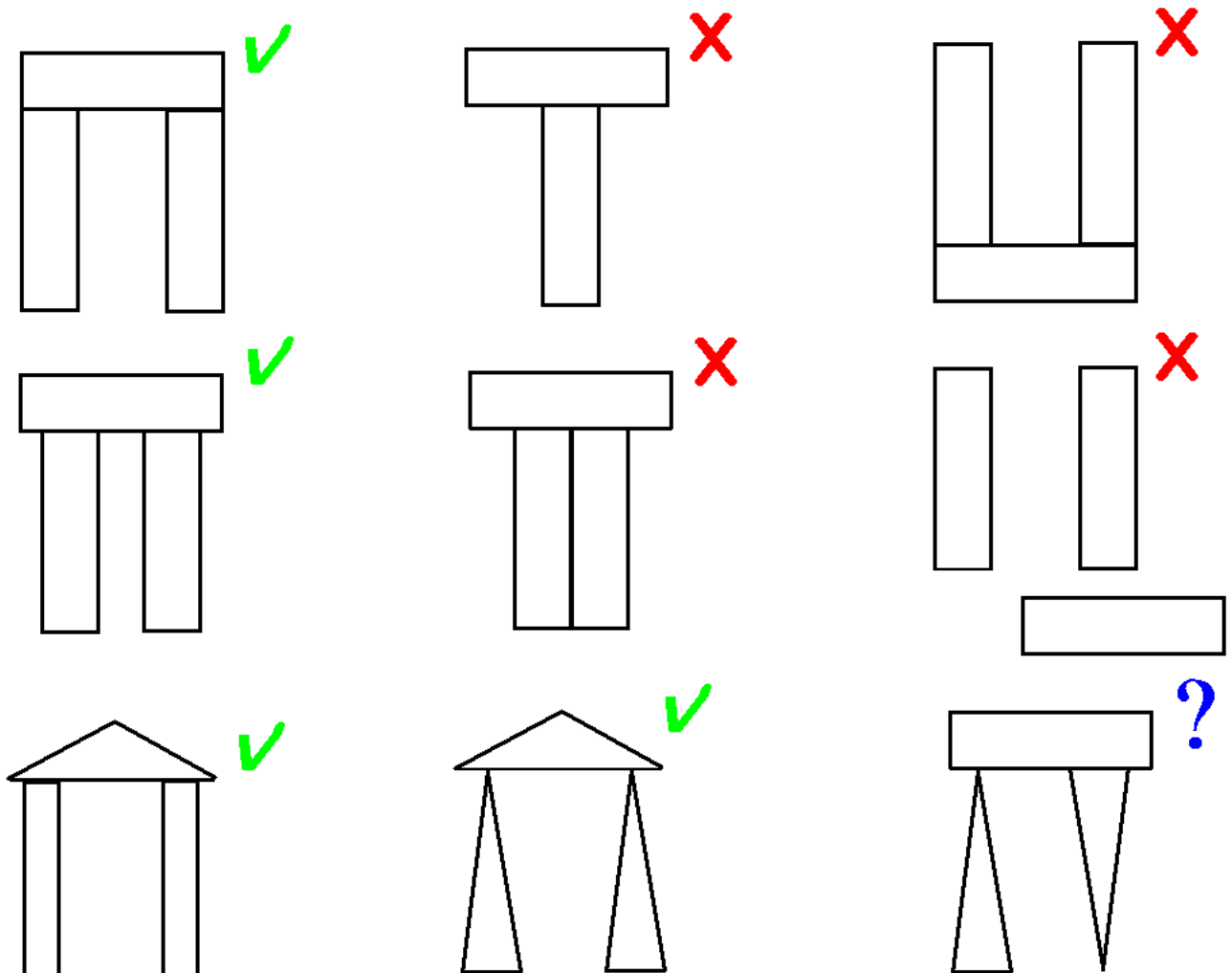
Εστω ότι υπάρχουν μόνο θετικά παραδείγματα. Η παρουσίαση του πρώτου παραδείγματος δημιουργεί την αρχική υπόθεση. Για κάθε νέο παράδειγμα ελέγχεται αυτή η υπόθεση. Αν αυτή εξακολουθεί να ισχύει για το παράδειγμα η υπόθεση παραμένει ως έχει, αλλιώς η υπόθεση αλλάζει ώστε να ικανοποιεί το νέο παράδειγμα καθώς και όλα τα προηγούμενα παραδείγματα (πχ. γενικεύοντας ένα χαρακτηριστικό εάν η αντίστοιχη τιμή του για το νέο παραδείγματα είναι διαφορετική από τις προηγούμενες ή ακόμη αφαιρώντας το χαρακτηριστικό εάν εμφανίζονται όλες οι δυνατές τιμές του). Η εκμάθηση ολοκληρώνεται όταν και μόνο όταν η υπόθεση ικανοποιεί το σύνολο των παραδειγμάτων.

Εφόσον τα παραδείγματα είναι θετικά και αρνητικά, το πρώτο παράδειγμα πρέπει αναγκαστικά να είναι θετικό ώστε να δημιουργηθεί η αρχική υπόθεση. Σε κάθε επόμενη παρουσίαση ενός

²⁹ Η εκμάθηση απουσιάζει εντελώς από όλες τις προαναφερθείσες μεθοδολογίες.

παραδείγματος εξετάζεται εάν αυτό είναι θετικό ή αρνητικό. Εφόσον είναι θετικό ακολουθείται η διαδικασία που περιγράφηκε πριν. Εφόσον το παράδειγμα είναι αρνητικό, εντοπίζονται τα χαρακτηριστικά του τα οποία διαφέρουν από την υπάρχουσα υπόθεση καθώς και εκείνα τα οποία δεν διαφέρουν από την υπάρχουσα υπόθεση. Ενώ τα μεν περιορίζουν τις τιμές του αντίστοιχου χαρακτηριστικού, τα δε υποδηλώνουν ότι το χαρακτηριστικό δεν είναι σημαντικό για τη δημιουργία της υπόθεσης.

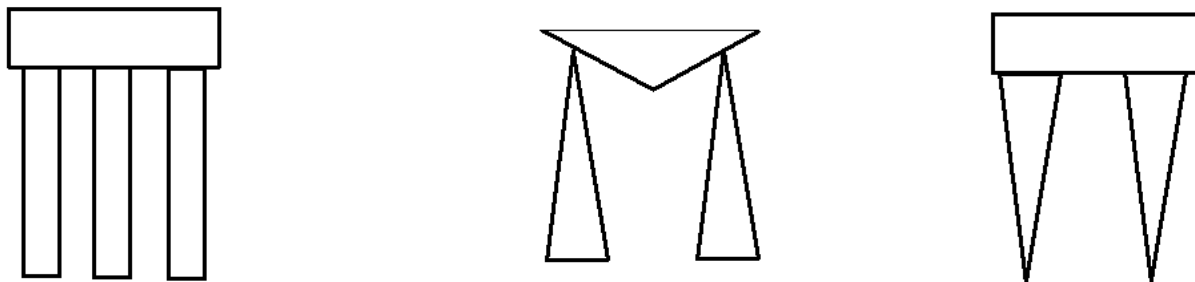
Είναι προτιμότερη η ύπαρξη και αρνητικών παραδειγμάτων στο σύνολο παραδειγμάτων, τα οποία τρόπον τινά οριοθετούν/περιορίζουν το μοντέλο επεξηγώντας τι δεν μπορεί να ισχύσει. Με τα αρνητικά παραδείγματα αποφεύγεται η υπεργενίκευση (*overgeneralisation*) του μοντέλου η οποία είναι δυνατό να συμβεί εάν υπάρχουν μόνο θετικά παραδείγματα. Πρόβλημα της στρατηγικής εκμάθησης μέσω παραδειγμάτων αποτελεί το πώς πραγματοποιείται η ανίχνευση των σημαντικών χαρακτηριστικών (επίπεδο περιγραφής της υπόθεσης). Το πρόβλημα αυτό αμβλύνεται εφόσον ώστε κάθε παράδειγμα να διαφέρει από τα προηγούμενα σε ένα μόνο χαρακτηριστικό ούτως ώστε η εκμάθηση να προχωρά σε μικρά βήματα. Καθίσταται λοιπόν σαφής η σημασία που έχει η σωστή επιλογή του συνόλου παραδειγμάτων καθώς και η σειρά παρουσιάσής τους στο σύστημα TN ώστε να αποφεύγονται οι αβάσιμες υποθέσεις (άρα εξάιρεται ο ρόλος του διδάσκοντος). Σημειώνεται ότι σε πολλές περιπτώσεις είναι προτιμότερος ο χαρακτηρισμός ενός παραδείγματος ως ειδική περίπτωση παρά η συλλήβδην αλλαγή της όλης υπόθεσης. Καθώς τα παραδείγματα εκφράζονται μέσω των χαρακτηριστικών τους, η υπόθεση περιγράφεται μέσω σημασιολογικών δικτύων, σχημάτων ή συστήματος κανόνων.



Σχήμα 30. Παραδείγματα ανίδιας.

Ενα παράδειγμα δίνεται στο **Σχήμα 30**, όπου παρουσιάζεται το σύνολο παραδειγμάτων (συνοδευόμενων από **Θ** και **Α** για θετικά και αρνητικά, αντίστοιχα, παραδείγματα) της αψίδας. Με την παρουσίαση των θετικών παραδειγμάτων φαίνεται ότι χαρακτηριστικά της αψίδας είναι:

- (α) συμμετρική δομή ως προς τον μεσοκάθετο άξονά της,
- (β) δύο όμοια υποστηρίγματα (παραλληλόγραμμο ή ισοσκελή τρίγωνα με την μακρύτερη πλευρά ως ύψος και κάθετο άξονα συμμετρίας), το πάχος των οποίων δεν είναι καθορισμένο,



Σχήμα 31. Αψίδες;

- (γ) μία κορυφή (παραλληλόγραμμο ή ισοσκελές τρίγωνο με την μακρύτερη πλευρά ως βάση και κάθετο άξονα συμμετρίας), και
- (δ) στήριξη η οποία δεν είναι αναγκαστικό να πραγματοποιείται στα άκρα της κορυφής.

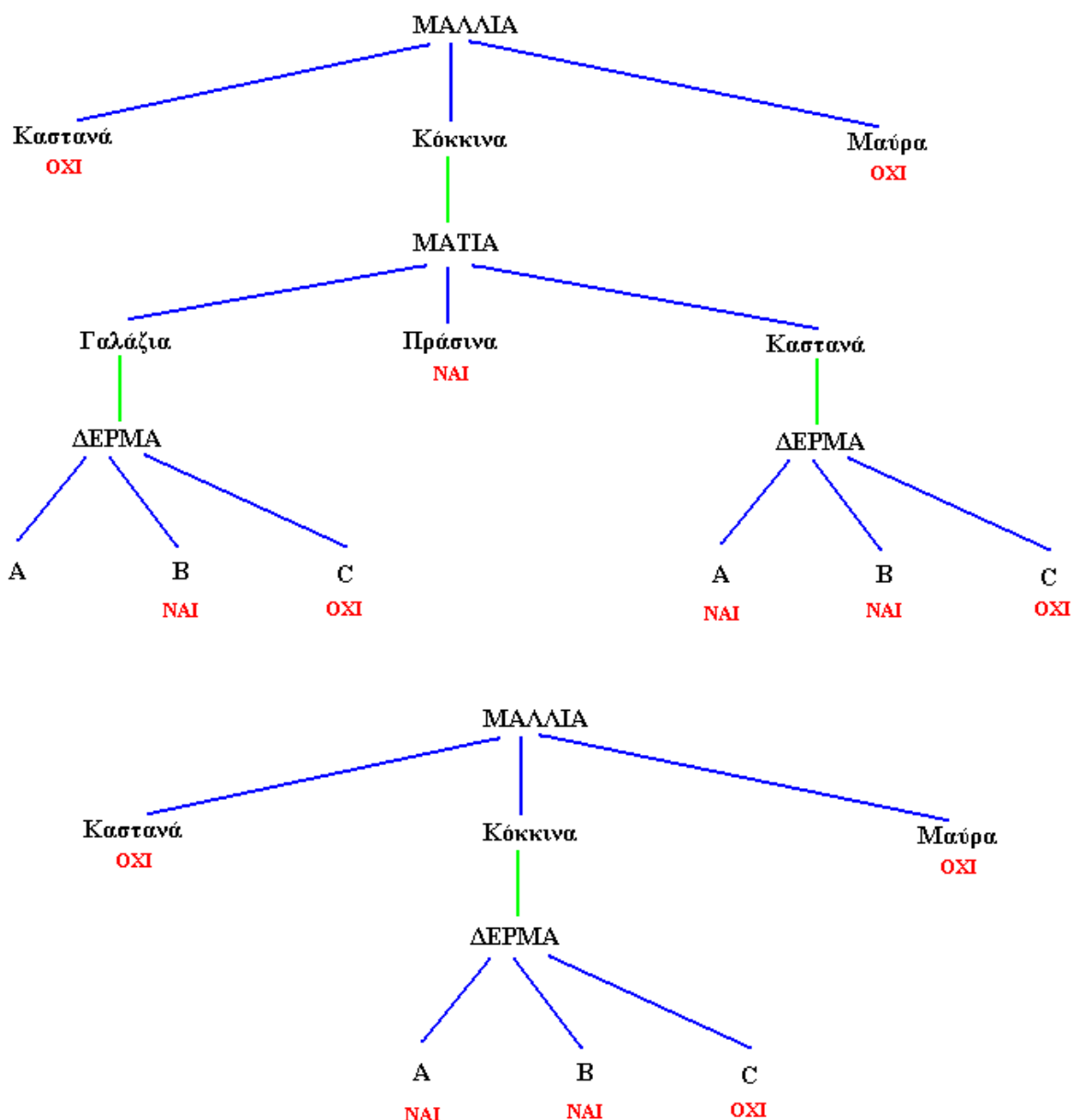
Από τα αρνητικά παραδείγματα τονίζεται:

- (ε) η υποστηρικτική σχέση υποστηρίγματος-κορυφής, καθώς και
- (στ) ότι δεν επιτρέπεται να υπάρχει ένα μόνο υποστήριγμα ή τα υποστηρίγματα να εφάπτονται.

Παρ' όλο που αυτό το σύνολο παραδειγμάτων μοιάζει επαρκές, το τελευταίο παράδειγμα του **Σχήματος 30** (συνοδευόμενο από **?**) δείχνει τη διαφορά **ΦΝ** και συστήματος **TN**. Η **ΦΝ** δέχεται αυτό το αντικείμενο ως αψίδα καθότι πληροί τη γενική μορφή αψίδας καθώς και το χρηστικό ρόλο της (να περνούν από κάτω άνθρωποι, οχήματα κλπ.), έστω και εάν δεν έχει συμμετρική δομή και τα υποστηρίγματα διαφέρουν μεταξύ τους και δεν το ένα από αυτά έχει σχήμα μη γνωστό από τα παραδείγματα. Το ίδιο ισχύει για τα παραδείγματα του **Σχήματος 31** αν και δεν έχει καταστεί σαφές από το δημιουργημένο μοντέλο εάν είναι δυνατή η χρήση περισσότερων των δύο υποστηρίγματος (διπλή αψίδα) καθώς και εάν είναι δυνατή η χρήση διαφορετικών συνδυασμών υποστηρίγματος-κορυφής (**Σχήμα 31**). Από αυτό το παράδειγμα διαφαίνεται η δυσκολία εκμάθησης (η οποία μοιάζει απατηλά απλή για την **ΦΝ**) καθώς και οι περιορισμοί που προέρχονται από τα μικρά σύνολα παραδειγμάτων. Η ικανότητα της **ΦΝ** να αφαιρεί γρήγορα και επιτυχώς τα χαρακτηριστικά ή τις τιμές τους οι οποίες δεν έχουν ιδιαίτερη σημασία για την υπόθεση μπορεί να προσομοιωθεί από το σύστημα **TN** μόνο με πληθώρα παραδειγμάτων παρουσιασμένων στη κατάλληλη σειρά.

ΜΑΛΛΙΑ	ΜΑΤΙΑ	ΔΕΡΜΑ	ΚΑΙΓΕΤΑΙ
Κόκκινα	Γαλάζια	Τύπου Β	Ναι
Καστανά	Γαλάζια	Τύπου Α	Οχι
Μαύρα	Πράσινα	Τύπου Α	Οχι
Κόκκινα	Καστανά	Τύπου Α	Ναι
Κόκκινα	Καστανά	Τύπου C	Οχι
Κόκκινα	Πράσινα	Τύπου Α	Ναι
Κόκκινα	Γαλάζια	Τύπου C	Οχι
Κόκκινα	Καστανά	Τύπου Β	Ναι

Πίνακας 6. Παραδείγματα για δημιουργία κανόνα-υπόθεσης.



Σχήμα 32. Δένδρα για τη δημιουργία κανόνα-υπόθεσης των παραδειγμάτων του Πίνακα 6.

Μία άλλη έκφραση της στρατηγικής εκμάθησης μέσα από παραδείγματα χρησιμοποιεί τα διαθέσιμα παραδείγματα προκειμένου να δημιουργήσει έναν κανόνα-υπόθεση ο οποίος τα ικανοποιεί. Αρχικά τα χαρακτηριστικά καθώς και το αποτέλεσμα των παραδειγμάτων ταξινομούνται βάσει των αντίστοιχων τιμών τους. Κατόπιν, σχηματίζεται ένα δένδρο με αρχικό κόμβο (κορυφή) ένα από τα χαρακτηριστικά (πλην του αποτελέσματος) και παρακλάδια τις τιμές του χαρακτηριστικού από τα παραδείγματα. Για κάθε παρακλάδι με μικτό αποτέλεσμα επιλέγεται ένα νέο χαρακτηριστικό και η διαδικασία επαναλαμβάνεται. Η ανάπτυξη του δένδρου τερματίζεται όταν κανένα παρακλάδι δεν έχει μικτό αποτέλεσμα, οπότε ο κανόνας-υπόθεση εκφράζεται από τις διαδρομές μεταξύ αρχικού και τελικών κόμβων του δένδρου με το ζητούμενο αποτέλεσμα.

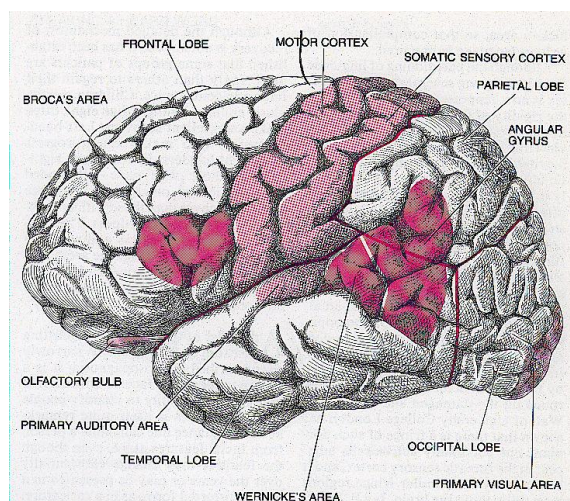
Ετσι, για το σύνολο παραδειγμάτων του Πίνακα 6 αναζητείται ο κανόνας ο οποίος καθορίζει το "ποιοί άνθρωποι καίγονται από τον ήλιο". Τα χαρακτηριστικά των επτά διαθέσιμων παραδειγμάτων είναι τα μαλλιά (με δυνατές τιμές κόκκινα, καστανά και μαύρα), τα μάτια (με δυνατές τιμές γαλάζια, πράσινα και καστανά), το δέρμα (με δυνατές τιμές τύπο A, B και C) και το καίγεται (το οποίο είναι

το αποτέλεσμα με δυνατές τιμές ναι και όχι. Η ύπαρξη τριών χαρακτηριστικών επιτρέπει τη δημιουργία έξι δένδρων, ανάλογα με τη σειρά επιλογής των χαρακτηριστικών³⁰. Δύο από αυτά τα δένδρα παρουσιάζονται στο **Σχήμα 32** με αντίστοιχες εκφράσεις του κανόνα-υπόθεσης "Εάν κάποιος έχει μαλλιά κόκκινα και είτε μάτια γαλάζια και δέρμα τύπου B είτε μάτια καστανά και δέρμα τύπου A ή B, τότε καίγεται από τον ήλιο" και "Εάν κάποιος έχει μαλλιά κόκκινα και δέρμα τύπου A ή B, τότε καίγεται από τον ήλιο", αντίστοιχα. Παρατηρείται ότι η σειρά επιλογής των χαρακτηριστικών επηρεάζει την σαφήνεια/αφαίρεση/απλότητα/οικονομία έκφρασης του κανόνα-υπόθεσης. Το πρόγραμμα ID3, (Quinlan, 1986) έχει αναπτυχθεί ώστε να επιλέγει τα χαρακτηριστικά με τέτοια σειρά ώστε να παράγεται το απλούστερο δένδρο, άρα και η απλούστερη έκφραση του κανόνα-υπόθεσης.

- ± Εκμάθηση μέσα από παρατήρηση και ανακάλυψη (*learning from observation and discovery*). Αποτελεί γενική μορφή της επαγωγικής διαδικασίας η οποία περιλαμβάνει τα συστήματα ανακάλυψης, την ανάπτυξη θεωριών, τη δημιουργία των κριτηρίων κατηγοριοποίησης για τη παραγωγή ταξινομιών ή ιεραρχιών, χωρίς όμως την ύπαρξη διδάσκοντος. Απαιτείται περισσότερη συμπερασματική διαδικασία από ότι σε όλες τις άλλες μορφές εκμάθησης καθώς δεν υπάρχουν παραδείγματα ή δεν είναι γνωστή ποια είναι η απαραίτητη γνώση ή ο κατάλληλος μετασχηματισμός ή τα μέλη της αναλογίας, άρα το σύστημα TN πρέπει από μόνο να στρέψει την προσοχή του στο κατάλληλο μέρος του περιβάλλοντος και να εφαρμόσει τα κατάλληλα χαρακτηριστικά, μετασχηματισμό ή αναλογία ή, τέλος, να ανακαλύψει τα ενδιαφέροντα παραδείγματα-χαρακτηριστικά του προβλήματος.

5.2. ΤΕΧΝΗΤΑ ΝΕΥΡΩΝΙΚΑ ΔΙΚΤΥΑ (ΤΝΔ, *artificial neural networks*)

Τα τεχνητά νευρωνικά δίκτυα (ΤΝΔ) απορρέουν από την πεποίθηση ότι είναι δυνατό να προσομοιωθούν κάποιες ιδιότητες του εγκεφάλου, έτσι ώστε να δημιουργηθεί ένας τεχνητός εγκέφαλος (σε απλουστευμένη μορφή). Με αυτή την έννοια, τα ΤΝΔ βρίσκονται μεταξύ της ΤΝ και της προσομοίωσης του μέσου της ΦΝ. Υπερτερούν των προαναφερθεισών τεχνικών ΤΝ στη δυνατότητα άμεσης προσαρμογής σε μεταβαλλόμενο περιβάλλον χωρίς την ανάγκη διδάσκοντος καθώς και στην παραλληλία και κατανεμημένη επεξεργασία/αποθήκευση της γνώσης.



Σχήμα 33. Αριστερό ημισφαίριο ανθρώπινου εγκεφάλου με περιοχές εξειδικευμένες στην όραση (*primary visual area*), στην ακοή (*primary auditory area*), στην κίνηση (*motor cortex*), στην αίσθηση (*somatic sensory cortex*) κλπ.

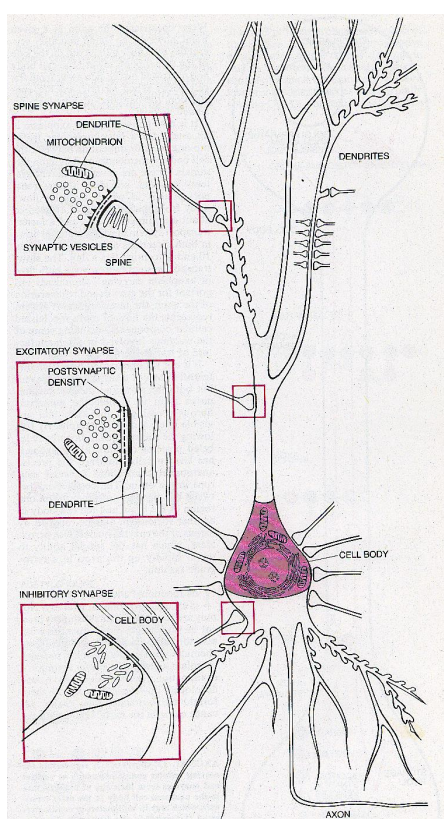
³⁰ Θεωρητικά, γιατί είναι δυνατόν κάποια δένδρα να ταυτίζονται.

5.2.1. Βασικά στοιχεία δομής εγκεφάλου

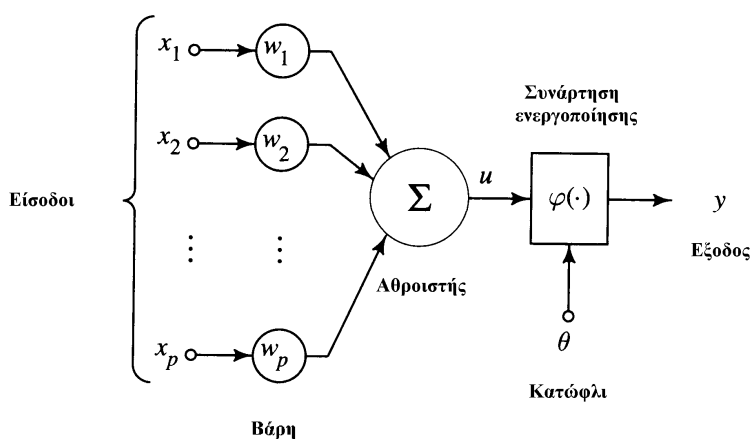
Η δομή του εγκεφάλου είναι διαφορετική από αυτή των υπολογιστικών συστημάτων: ο εγκέφαλος δεν περιέχει σειρά από εντολές που εκτελούνται με αναφορά στις θέσεις μνήμης του, αλλά μοιάζει περισσότερο με σύστημα στοιχειωδών κυκλωμάτων συνδεδεμένων σε σειρά και παράλληλα τα οποία μετατρέπουν την είσοδο (αλληλεπίδραση μεγάλου αριθμού απλών στοιχείων/επεξεργαστών).

Ο εγκέφαλος έχει βάρος 1.5 κιλά περίπου και αποτελείται από 10^{11} νευρώνες (εγκεφαλικά κύτταρα, *neurons* ή *brain cells*) με 10^{14} συνδέσεις (*connections*) μεταξύ τους. Υπάρχει εξειδίκευση νευρώνων – και τμημάτων του εγκεφάλου – που αφιερώνονται σε συγκεκριμένες λειτουργίες (**Σχήμα 33**). Κατ' αναλογία, μπορούν να διακριθούν διάφορα είδη νευρώνων όσον αφορά στο σχήμα, στο μέγεθος, στη συνδεσμολογία καθώς και στη θέση τους στον εγκέφαλο (άρα και στη λειτουργία στην οποία συμμετέχουν). Όλοι όμως οι νευρώνες έχουν κάποια κοινά χαρακτηριστικά. Κάθε νευρώνας (**Σχήμα 34(α)**) απαρτίζεται από:

- Τον πυρήνα (*nucleus*) όπου παράγονται συστατικά (πχ. μιτοχόνδρια, ένζυμα και ιόντα) τα οποία είναι απαραίτητα για τη διατήρηση και ομαλή λειτουργία του νευρώνα.
- Απολήξεις, οι οποίες έχουν μεγάλο μήκος και περιέχουν πληθώρα σημείων επαφής (τις συνάψεις³¹, *synapses*) με τους συνδεδεμένους νευρώνες. Οι απολήξεις είναι δύο ειδών:
(α) Δενδρίτες (*dendrites*). Αυτοί είναι της τάξης των χιλιάδων για κάθε νευρώνα και οι συνάψεις τους δέχονται τα ερεθίσματα τα οποία στέλνουν οι συνδεδεμένοι νευρώνες.
(β) Αξονας (*axon*). Είναι μοναδικός για κάθε νευρώνα και οι συνάψεις του μεταβιβάζουν τα ερεθίσματα του νευρώνα στους συνδεδεμένους νευρώνες.



(α)



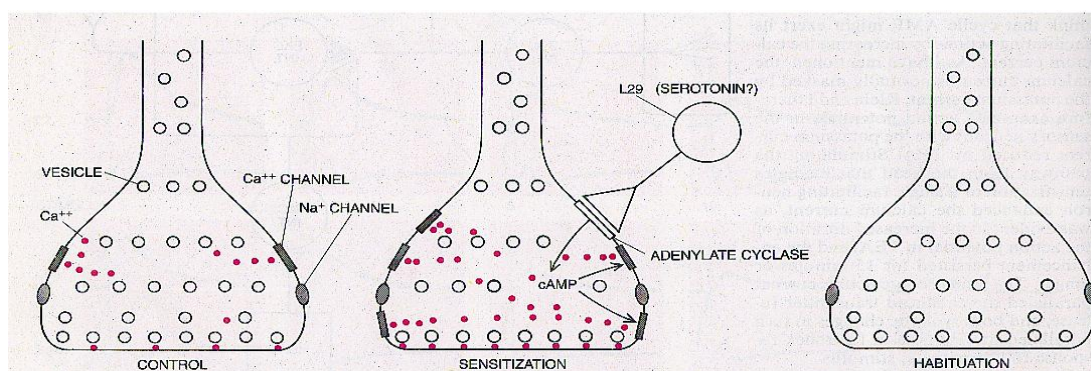
(β)

Σχήμα 34. Νευρώνας του ανθρώπινου εγκεφάλου (α), κόμβος του ΤΝΔ (β).

Τα πιο σημαντικά στοιχεία της επικοινωνίας ενός νευρώνα με τους συνδεδεμένους νευρώνες είναι:

³¹ Όπως φαίνεται στο **Σχήμα 34**, συνάψεις είναι δυνατό να υπάρχουν και σε άλλα σημεία του νευρώνα εκτός των απολήξεών του. Πάντως αυτές είναι περιορισμένες σε αριθμό.

1. Οι συναπτικές δυνάμεις (*connection strengths*) των συνάψεων του νευρώνα. Η συναπτική δύναμη μίας σύναψης εκφράζει την ένταση και τον τρόπο (διεγερτικό, *exhitory* ή κατασταλτικό, *inhibitory*) με τον οποίο ο νευρώνας επηρεάζει ή επηρεάζεται από ³² τους άλλους νευρώνες. Παρ' όλο που ο διεγερτικός ή κατασταλτικός χαρακτήρας μίας σύνδεσης δεν είναι δυνατό να αλλάξει, η προσαρμογή στο μεταβαλλόμενο περιβάλλον μπορεί να προκαλέσει αλλαγή της έντασης της συναπτικής δύναμης (αύξηση ή μείωση)³³. Η προσαρμογή λαμβάνει δύο μορφές, (α) της εκμάθησης νέων ερεθισμάτων, δηλαδή της ευαισθητοποίησης (*sensitisation*) του νευρώνα ώστε να δίνει σημασία σε ένα νέο ερέθισμα, και (β) της συνήθειας σε αμετάβλητα ερεθίσματα, δηλαδή της απευαισθητοποίησης (*habituation*) του νευρώνα ώστε να αγνοεί ένα σταθερό - και μη επιβλαβές - ερέθισμα. Η προσαρμογή συντελείται χημικά (Σχήμα 35), γρήγορα, ενώ αντιστρέφεται ταχύτατα σε νέα αλλαγή των ερεθισμάτων του περιβάλλοντος. Είναι σημαντικότατο ότι η προσαρμογή και η μνήμη αλληλεπιδρούν χωρίς να εμποδίζουν η μία την άλλη έτσι ώστε η ΦΝ ούτε να ξεχνά τα πάντα σε κάθε νέο ερέθισμα (επικράτηση προσαρμογής) ούτε να μη μπορεί να προσαρμοστεί σε αλλαγή περιβάλλοντος (επικράτηση μνήμης).



Σχήμα 35. Χημική έκφραση της προσαρμογής: εκμάθηση και συνήθεια.

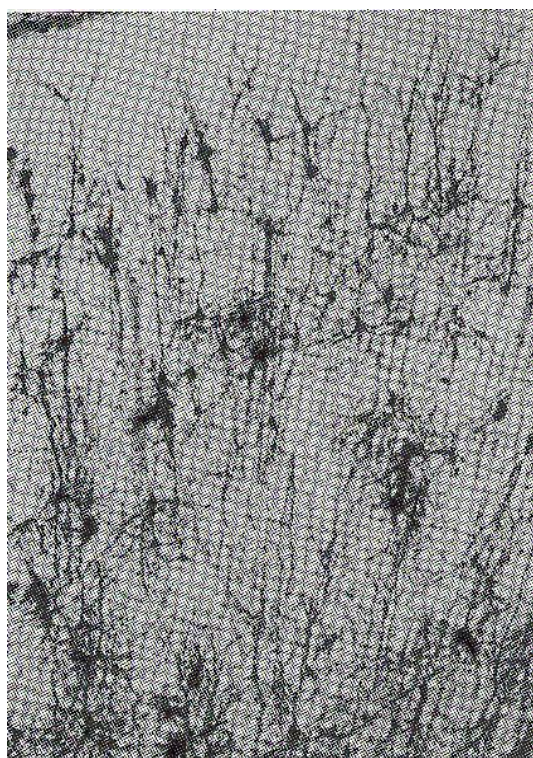
2. Η κατάσταση του νευρώνα. Αυτή είναι είτε ενεργή (*active*) είτε ανενεργή (*inactive*) και καθορίζει το εάν ο νευρώνας μεταβιβάζει ερεθίσματα στους συνδεδεμένους στον άξονά του νευρώνες. Η κατάσταση εξαρτάται από το εάν το σύνολο των ερεθισμάτων στο νευρώνα (αλγεβρικό άθροισμα των διεγερτικών και κατασταλτικών συναπτικών δυνάμεων στο νευρώνα από τους συνδεδεμένους νευρώνες) ξεπερνά ένα κατώφλι. Το κατώφλι αυτό όχι μόνο διαφέρει από νευρώνα σε νευρώνα, αλλά και για κάθε νευρώνα είναι δυνατό να αλλάξει είτε λόγω κορεσμού (*saturation*, εφόσον ο νευρώνας καθίσταται πολύ συχνά ενεργός), είτε λόγω εκμάθησης, είτε ακόμα λόγω άλλων παραγόντων (πχ. γήρανση, ασθένεια κλπ.). Η ενεργοποίηση του νευρώνα εκφράζεται ως ακολουθία αποστολής δέλτα-ερεθισμάτων στους νευρώνες οι οποίοι έχουν συνάψεις στον άξονα του νευρώνα. Η ένταση καθώς και η συχνότητα της ακολουθίας εξαρτάται από το κατά πόσο το σύνολο των ερεθισμάτων στο νευρώνα ξεπερνά το κατώφλι.

Επιπλέον, ο κάθε νευρώνας έχει ένα εσωτερικό ρολόϊ. Σε κάθε μονάδα χρόνου του ρολογιού του, ο νευρώνας είναι δυνατό να αλλάξει κατάσταση, ενώ είναι επίσης δυνατό να μεταβληθούν οι εντάσεις των συναπτικών του δυνάμεων (ανεξάρτητα η κάθε μία) καθώς και το κατώφλι ενεργοποίησής του. Τα δύο τελευταία αλλάζουν σταδιακά, οπότε ο νευρώνας καθίσταται εύρωστος (*robust*)³⁴ σε τυχαίες/στιγμιαίες – άρα και ενδεχομένως μη σημαντικές - αλλαγές των εισερχόμενων ερεθισμάτων.

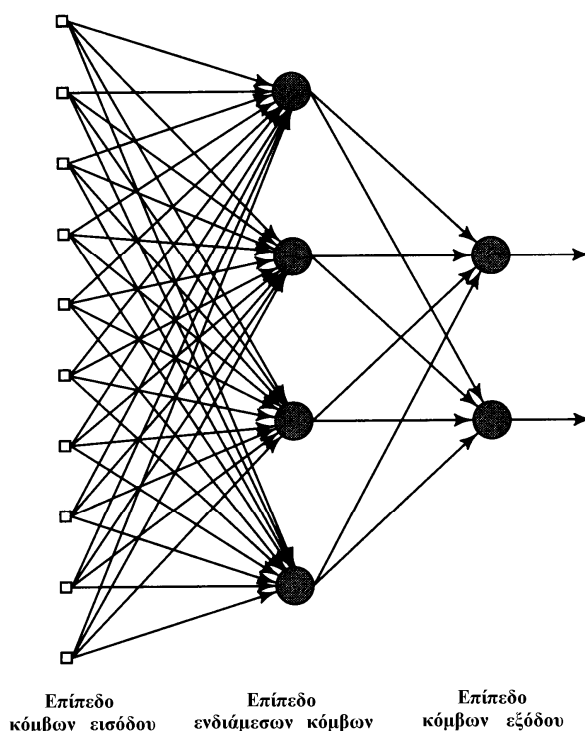
³² Ανάλογα με το εάν η σύναψη βρίσκεται στον άξονα ή όχι, αντίστοιχα.

³³ Έτσι, εάν η σύνδεση είναι διεγερτική και η συναπτική δύναμη αυξάνεται/μειώνεται τότε η σύνδεση καθίσταται περισσότερο/λιγότερο έντονα διεγερτική, αντίστοιχα, ενώ εάν η σύνδεση είναι κατασταλτική και η συναπτική δύναμη αυξάνεται/μειώνεται τότε η σύνδεση καθίσταται περισσότερο/λιγότερο έντονα κατασταλτική, αντίστοιχα.

³⁴ Όσον αφορά στη προσαρμογή και μνήμη του.



(α)



Επίπεδο
κόμβων εισόδου Επίπεδο
ενδιάμεσων κόμβων Επίπεδο
κόμβων εξόδου

(β)

Σχήμα 36. Τμήμα ανθρώπινου εγκεφάλου (α), ΤΝΔ (β).

Στη λεπτή τομή του εγκεφάλου του **Σχήματος 36(α)** φαίνεται η πυκνή δομή και συνδεσμολογία του εγκεφάλου. Σημειώνεται ότι η αποθήκευση και διαχείριση (κωδικοποίηση) της γνώσης πραγματοποιείται από τη συλλογική αλληλεπίδραση των συνάψεων καθώς και των καταστάσεων των συνδεδεμένων νευρώνων. Σε όλον τον εγκέφαλο υπάρχει περίσσεια νευρώνων, οπότε η κωδικοποίηση είναι αραιή (*sparse*), κατανεμημένη και εκτελείται παράλληλα από πολλούς νευρώνες (*parallel distributed processing*). Αυτό αποδεικνύεται και από την καταστροφή μικρών περιοχών ή μεμονωμένων νευρώνων του εγκεφάλου σε ατυχήματα ή εγκεφαλικά: οι γειτονικοί νευρώνες οι οποίοι εκτελούν παρόμοια λειτουργία με τους απωλεσθέντες νευρώνες προσαρμόζονται ώστε να αναλάβουν τη λειτουργία τους και να τους αντικαταστήσουν σε κάποιο βαθμό (πλαστικότητα εγκεφάλου)³⁵. Η αραιή και κατανεμημένη κωδικοποίηση είναι υπεύθυνη για την ευρωστία του εγκεφάλου σε ελλιπή ή μερικώς παραμορφωμένα ερεθίσματα ή εισόδους.

Είναι τέλος ενδιαφέρον πως σε κάποιες περιοχές της εξώτατης στοιβάδας του ανθρώπινου εγκεφάλου, και ειδικά στις περιοχές που καθορίζουν την αίσθηση και την κίνηση, έχει παρατηρηθεί τοπολογική αναπαράσταση (χάρτης) του σώματος έτσι ώστε περιοχές που βρίσκονται κοντά στο ανθρώπινο σώμα μας βρίσκονται και κοντά στον χάρτη (**Σχήμα 37**). Επιπλέον, η απεικόνιση είναι ελαφρά παραμορφωμένη έτσι ώστε περιοχές του σώματος που είναι πιο σημαντικές για την αίσθηση ή την κίνηση καταλαμβάνουν μεγαλύτερο μέρος του χάρτη από μέρη τα οποία δεν είναι τόσο σημαντικά.

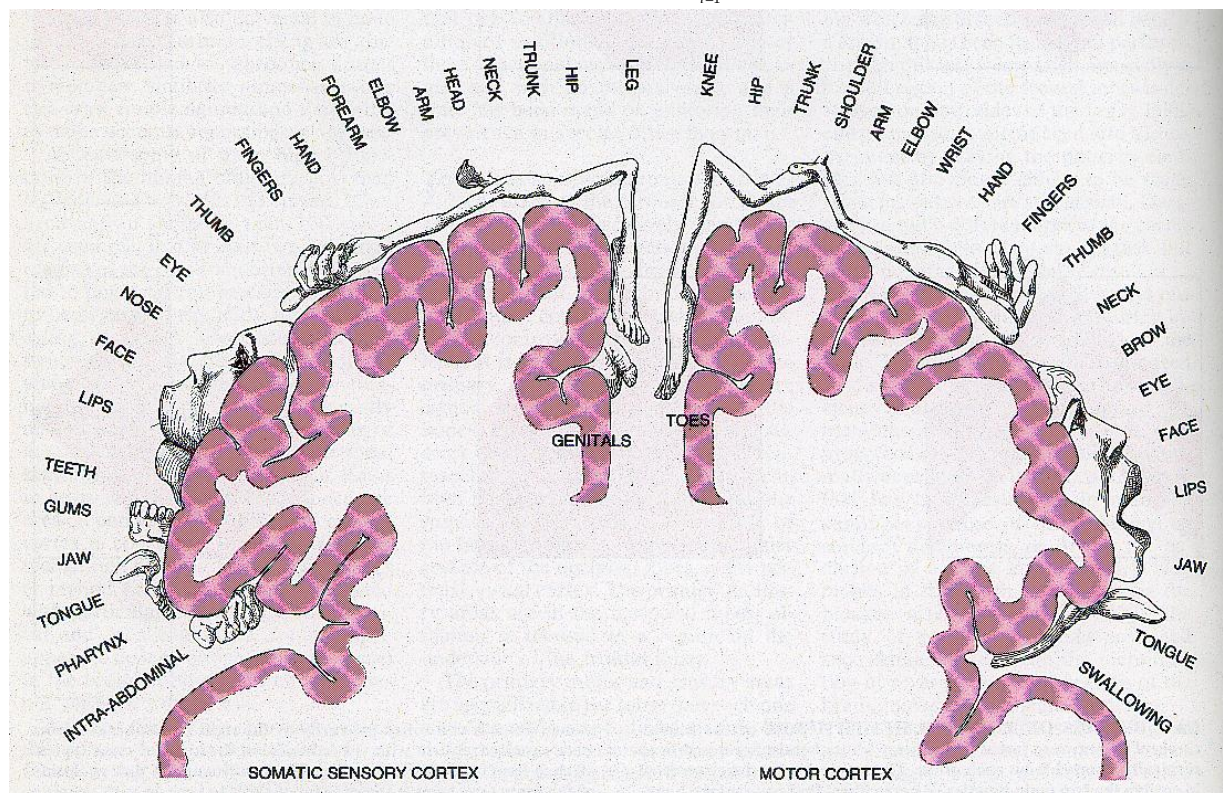
5.2.2. Βασικά στοιχεία δομής ΤΝΔ

Εμπνευσμένα από τα βασικά τμήματα καθώς και από τον τρόπο επικοινωνίας των νευρώνων, οι κόμβοι των ΤΝΔ (**Σχήμα 34(β)**) απαρτίζονται από:

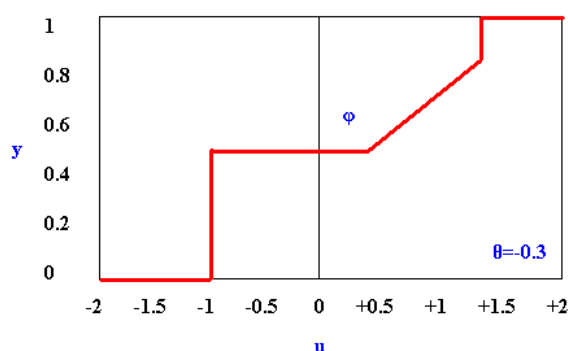
- Τις εισόδους (*inputs*) στον κόμβο $x_1, x_2, \dots, x_p$, οι οποίες προσομοιώνουν τις συνάψεις των δενδριτών του νευρώνα και εκφράζουν τα ερεθίσματα των συνδεδεμένων κόμβων ή του περιβάλλοντος.

³⁵ Είναι χαρακτηριστικό ότι η καταστροφή ενός στους πέντε νευρώνες ουδέν πρόβλημα δημιουργεί στην επαρκή λειτουργία του εγκεφάλου.

- Τα βάρη (weights ή connection strengths) $w_1, w_2, \dots, w_p$, τα οποία αντιστοιχούν στις συναπτικές δυνάμεις των νευρώνων και αναπαριστούν την επίδραση που έχουν οι αντίστοιχες εισόδους $x_1, x_2, \dots, x_p$ στην κατάσταση του κόμβου. Τα βάρη χαρακτηρίζονται από ένα πρόσημο (+ ή -, αντίστοιχο της διεγερτικής ή κατασταλτικής σύναψης) και από έναν αριθμό (αντίστοιχο της έντασης της σύναψης).
- Ενα αθροιστή Σ ο οποίος αθροίζει (αλγεβρικά) τα γινόμενα των εισόδων με τα αντίστοιχα βάρη ώστε να υπολογιστεί η συνολική είσοδος u στον κόμβο ($u = \sum_{i=1}^p x_i w_i$).



Σχήμα 37. Τοπογραφική αναπαράσταση του σώματος στον ανθρώπινο εγκέφαλο.



Σχήμα 38. Συνάρτηση ενεργοποίησης.

- Μία συνάρτηση ενεργοποίησης (activation function) ϕ και ένα κατώφλι (threshold) θ . Στην απλούστερη περίπτωση γίνεται σύγκριση της συνολικής εισόδου u με το κατώφλι θ προκειμένου να κριθεί εάν ο κόμβος θα γίνει ο ίδιος ενεργός και θα μεταφέρει ερεθίσματα σε άλλους συνδεδεμένους κόμβους. Στη γενικότερη περίπτωση, το κατώφλι θ προστίθεται στη συνολική είσοδο u ³⁶ οπότε –

³⁶ Στην πράξη, το κατώφλι θ συνηθίζεται να ενσωματώνεται στη συνολική είσοδο στον κόμβο u μέσω μίας φανταστικής εισόδου x_0 με βάρος $w_{k0} = \theta$.

μέσω της ϕ - υπολογίζεται η έξοδος y του κόμβου. Η έξοδος αποτελεί αριθμό ο οποίος αντιστοιχεί στην ένταση και συχνότητα της ακολουθίας δέλτα-ερεθισμάτων του ενεργού νευρώνα. Στο **Σχήμα 38** παρουσιάζεται ένα παράδειγμα συνάρτησης ενεργοποίησης, η οποία δίνεται από το τύπο

$$j(a) = \begin{cases} 0 & a \leq -1 \\ 0.5 & -1 < a \leq 0.5 \\ 0.3a + 0.35 & 0.5 < a \leq 1.5 \\ 1 & 1.5 < a \end{cases} \quad \text{για } a = u + \theta \quad (\theta = -0.3).$$

Τα ΤΝΔ (**Σχήμα 36(β)**) έχουν ως αφετηρία τους τον εγκέφαλο, αλλά περιορίζονται σε όχι περισσότερους από 1000 κόμβους. Η δομή τους είναι η εξής:

- Οι κόμβοι έχουν καθορισμένη διάταξη και βρίσκονται συνήθως σε επάλληλα επίπεδα (*layers*). Ανάλογα με τη θέση του στο ΤΝΔ, ένας κόμβος χαρακτηρίζεται ως:
 - Ø Κόμβος εισόδου (*input node*), οπότε βρίσκεται στο κατώτερο επίπεδο του ΤΝΔ (επίπεδο εισόδου (*input layer*), το αριστερότερο κάθετο επίπεδο κόμβων στο **Σχήμα 36(β)**) και λαμβάνει ως είσοδο πληροφορία από το περιβάλλον, πχ. την τιμή ενός συγκεκριμένου pixel από κάποια ψηφιακή εικόνα, έναν αριθμό κλπ. Πριν την εισαγωγή της, η πληροφορία κανονικοποιείται σε συγκεκριμένο διάστημα το οποίο μπορεί να δεχτεί η συνάρτηση ενεργοποίησης του κόμβου.
 - Ø Κόμβος εξόδου (*output node*), οπότε βρίσκεται στο ανώτερο επίπεδο του ΤΝΔ (επίπεδο εξόδου (*output layer*), το δεξιότερο κάθετο επίπεδο κόμβων στο **Σχήμα 36(β)**) και αποδίδει την έξοδό του στο περιβάλλον.
 - Ø Ενδιάμεσος κόμβος (*hidden node*), οπότε βρίσκεται σε ενδιάμεσο επίπεδο κόμβων (*hidden layer*), δέχεται εισόδους από άλλους κόμβους και - μέσω της συνάρτησης ενεργοποίησης του - αποδίδει την έξοδό του σε άλλους κόμβους του ΤΝΔ.
- Οι συνδέσεις του ΤΝΔ είναι δυνατό να εφαρμόζονται μεταξύ κόμβων διαφορετικών επιπέδων - και να κατευθύνονται είτε προς κόμβο επόμενου επιπέδου (*forward connection*) είτε προς κόμβο προηγούμενου επιπέδου (*backward connection*) -, αλλά είναι επίσης δυνατές και μεταξύ κόμβων του ίδιου επιπέδου ή ακόμα και μεταξύ του ίδιου κόμβου (*self-connection*)³⁷. Η συνδεσμολογία (*connectivity*) του ΤΝΔ εκφράζει τον συνολικό τρόπο με τον οποίο οι κόμβοι του ΤΝΔ αλληλεπιδρούν. Λόγω του ότι η συνδεσμολογία είναι κατά πολύ υπεύθυνη για τον τρόπο εκμάθησης και τα χαρακτηριστικά λειτουργίας του ΤΝΔ, γίνεται αναφορά σε συγκεκριμένες δομές ή αρχιτεκτονικές ΤΝΔ οι οποίες έχουν ως ειδοποιό διαφορά τους τη δομή των κόμβων (συναρτήσεις ενεργοποίησης και κατώφλια), τον αριθμό των επιπέδων κόμβων και τη συνδεσμολογία τους.
- Τα βάρη των συνδέσεων λαμβάνουν αριθμητικές τιμές μέσα από συγκεκριμένο διάστημα (πχ. [-1,+1]), τα όρια του οποίου δεν υπερβαίνονται προκειμένου να μην κορεστούν οι συνδέσεις και, κατά συνέπεια, η έξοδος του κόμβου.
- Είθισται τα ρολόγια των κόμβων του ίδιου επιπέδου να είναι συγχρονισμένα (ενιαίο ρολόϊ ανά επίπεδο) και τα ρολόγια διαδοχικών επιπέδων να λειτουργούν έτσι ώστε να πραγματοποιείται πρώτα η ενεργοποίηση όλων των κόμβων του επιπέδου εισόδου, αμέσως μετά του πρώτου ενδιάμεσου επιπέδου και ου τω καθ' εξής μέχρι το επίπεδο εξόδου.

5.2.3. Εκμάθηση ΤΝΔ

Στη γενική περίπτωση, η λειτουργία του ΤΝΔ ξεκινά με την ταυτόχρονη ενεργοποίηση των κόμβων εισόδου από τις πληροφορίες του περιβάλλοντος, συνεχίζεται με την ταυτόχρονη ενεργοποίηση των κόμβων ενδιάμεσων επιπέδων και ολοκληρώνεται με την ταυτόχρονη ενεργοποίηση των κόμβων του ανώτερου επιπέδου και την απόδοση των αντίστοιχων εξόδων. Για συγκεκριμένες εισόδους και καθορισμένη αρχιτεκτονική, οι έξοδοι του ΤΝΔ εξαρτώνται από τον αριθμό των κόμβων στα ενδιάμεσα

³⁷ Στη γενική περίπτωση, πάντως, οι συνδέσεις κατευθύνονται από κόμβους κατωτέρων επιπέδων σε κόμβους αμέσως επόμενων ανωτέρων επιπέδων, οπότε η μεταβίβαση την πληροφορίας κατευθύνεται σταδιακά από το επίπεδο εισόδου προς το επίπεδο εξόδου.

επίπεδα καθώς και από τα βάρη των συνδέσεων: μεταβάλλοντας οποιοδήποτε από τα παραπάνω αλλάζουν και οι έξοδοι.

Η μεταβολή των βαρών των συνδέσεων συνεπάγεται άμεση μεταβολή της συμπεριφοράς του ΤΝΔ, άρα είναι δυνατό με την κατάλληλη ρύθμισή τους (*fine-tuning*) να αποδίδονται συγκεκριμένες έξοδοι για συγκεκριμένες εισόδους. Η διαδικασία σταδιακής μεταβολής των βαρών ενός ΤΝΔ προκειμένου να επιτευχθεί η αντιστοιχία συγκεκριμένων ζευγών εισόδων-εξόδων αποτελεί την εκμάθηση του ΤΝΔ (*ANN learning*). Αυτή πραγματοποιείται ως εξής:

Βήμα 1. Συλλογή συνόλου γνωστών ζευγών εισόδων-εξόδων (x, y) προς εκμάθηση (σύνολο εκμάθησης, *training set*).

Βήμα 2. Επιλογή τυχαίων τιμών για τα βάρη του ΤΝΔ μέσα από το συγκεκριμένο διάστημα το οποίο δεν προκαλεί κορεσμό των συνδέσεων (παράγραφος 5.2.2.). Ανάθεση της τιμής 0 στη μεταβλητή η οποία εκφράζει τον αριθμό επαναλήψεων. Ανάθεση της τιμής 0 στη μεταβλητή η οποία εκφράζει αλλαγή βαρών.

Βήμα 3. Για κάθε ζεύγος εισόδων-εξόδων (x, y):

Βήμα 3.1. Είσοδος του x στο (επίπεδο εισόδου του) ΤΝΔ, ενεργοποίηση των κόμβων του ΤΝΔ και απόδοση της εξόδου $y_{TNΔ}$.

Βήμα 3.2. Σύγκριση της εξόδου $y_{TNΔ}$ με την επιθυμητή έξοδο y και υπολογισμός του σφάλματος e . Ελεγχος του εάν το σφάλμα e υπερβαίνει μία επιτρεπόμενη τιμή.

Εάν ναι,

Βήμα 3.2.1. Ανάθεση της τιμής 1 στη μεταβλητή η οποία εκφράζει αλλαγή βαρών. Πραγματοποίηση αλλαγής των βαρών του ΤΝΔ ανά επίπεδο. Πρώτα μεταβάλλονται τα βάρη των κόμβων του επιπέδου εξόδου, μετά τα βάρη των κόμβων του αμέσως προηγούμενου επιπέδου και τελευταία τα βάρη του επιπέδου εισόδου. Η μεταβολή του κάθε βάρους είναι μικρή, ανάλογη της τρέχουσας τιμής του καθώς και (α) ανάλογη του σφάλματος e εάν ο αντίστοιχος κόμβος ανήκει στο επίπεδο εξόδου, (β) ανάλογη της αλλαγής των βαρών των συνδεδεμένων κόμβων ανωτέρων επιπέδων εάν ο αντίστοιχος κόμβος δεν ανήκει στο επίπεδο εξόδου.

Εάν όχι,

Βήμα 3.2.2. Επιστροφή στο **Βήμα 3**.

Βήμα 4. Ελεγχος του εάν η μεταβλητή η οποία εκφράζει αλλαγή βαρών λαμβάνει την τιμή 0.

Εάν ναι,

Βήμα 4.1. Απόφαση ότι έχει επιτευχθεί σύγκλιση (*convergence*) του ΤΝΔ για το σύνολο εκμάθησης (δηλαδή το σφάλμα e είναι ικανοποιητικά μικρό για όλα τα ζεύγη εισόδων-εξόδων του συνόλου εκμάθησης). Μετάβαση στο **Βήμα 5**.

Εάν όχι,

Βήμα 4.2. Αύξηση της τιμής της μεταβλητής η οποία εκφράζει τον αριθμό επαναλήψεων κατά 1. Ελεγχος του εάν η μεταβλητή αυτή υπερβαίνει μία προκαθορισμένη τιμή (ανώτατο επιτρεπτό αριθμό επαναλήψεων εκμάθησης).

Εάν ναι,

Βήμα 4.2.1. Απόφαση ότι δεν είναι δυνατό να επιτευχθεί σύγκλιση του ΤΝΔ. Μετάβαση στο **Βήμα 5**.

Εάν όχι,

Βήμα 4.2.2. Ανάθεση της τιμής 0 στη μεταβλητή η οποία εκφράζει αλλαγή βαρών. Μετάβαση στο **Βήμα 3**.

Βήμα 5. Τέλος εκμάθησης.

Το **Βήμα 3** επαναλαμβάνεται αρκετές φορές (της τάξης των εκατοντάδων ή, ακόμη και, χιλιάδων φορών) και τερματίζεται είτε όταν επιτευχθεί η σύγκλιση, είτε όταν ο αριθμός επαναλήψεων υπερβεί το προκαθορισμένο όριο οπότε και συμπεραίνεται ότι δεν είναι δυνατή η σύγκλιση. Στην προηγούμενη

μέθοδο εκμάθησης το σφάλμα e και η αλλαγή των βαρών υπολογίζονται ανεξάρτητα για κάθε ζεύγος εισόδων-εξόδων του συνόλου εκμάθησης (*on-line* ή *pattern training*). Εναλλακτικά, είναι δυνατόν το σφάλμα να υπολογίζεται συνολικά για όλα τα ζεύγη εισόδων-εξόδων, οπότε η αλλαγή των βαρών πραγματοποιείται μία φορά για ολόκληρο το σύνολο εκμάθησης (*batch training*). Αυτή η μέθοδος εκφράζεται ως εξής:

Βήμα 1. Συλλογή συνόλου γνωστών ζευγών εισόδων-εξόδων (x,y) προς εκμάθηση (σύνολο εκμάθησης, *training set*).

Βήμα 2. Επιλογή τυχαίων τιμών για τα βάρη του ΤΝΔ μέσα από το συγκεκριμένο διάστημα το οποίο δεν προκαλεί κορεσμό των συνδέσεων (παράγραφος 5.2.2.). Ανάθεση της τιμής 0 στη μεταβλητή η οποία εκφράζει τον αριθμό επαναλήψεων.

Βήμα 3. Ανάθεση της τιμής 0 στη μεταβλητή που εκφράζει το συνολικό σφάλμα e . Για κάθε ζεύγος εισόδων-εξόδων (x,y) :

Βήμα 3.1. Είσοδος του x στο (επίπεδο εισόδου του) ΤΝΔ, ενεργοποίηση των κόμβων του ΤΝΔ και απόδοση της εξόδου y_{TND} .

Βήμα 3.2. Σύγκριση της εξόδου y_{TND} με την επιθυμητή έξοδο y και υπολογισμός του μερικού σφάλματος το οποίο αθροίζεται στο συνολικό σφάλμα e .

Βήμα 4. Ελεγχος του εάν το συνολικό σφάλμα e υπερβαίνει μία επιτρεπόμενη τιμή.

Εάν ναι,

Βήμα 4.1. Αύξηση της τιμής της μεταβλητής η οποία εκφράζει τον αριθμό επαναλήψεων κατά 1. Ελεγχος του εάν η μεταβλητή αυτή υπερβαίνει μία προκαθορισμένη τιμή (ανώτατο επιτρεπτό αριθμό επαναλήψεων εκμάθησης).

Εάν ναι,

Βήμα 4.1.1. Απόφαση ότι δεν είναι δυνατό να επιτευχθεί σύγκλιση του ΤΝΔ. Μετάβαση στο **Βήμα 5**.

Εάν όχι,

Βήμα 4.1.2. Πραγματοποίηση αλλαγής των βαρών του ΤΝΔ ανά επίπεδο. Πρώτα μεταβάλλονται τα βάρη των κόμβων του επιπέδου εξόδου, μετά τα βάρη των κόμβων του αμέσως προηγούμενου επιπέδου και τελευταία τα βάρη του επιπέδου εισόδου. Η μεταβολή του κάθε βάρους είναι μικρή, ανάλογη της τρέχουσας τιμής του καθώς και (α) ανάλογη του συνολικού σφάλματος e εάν ο αντίστοιχος κόμβος ανήκει στο επίπεδο εξόδου, (β) ανάλογη της αλλαγής των βαρών των συνδεδεμένων κόμβων ανωτέρων επιπέδων εάν ο αντίστοιχος κόμβος δεν ανήκει στο επίπεδο εξόδου.

Εάν όχι,

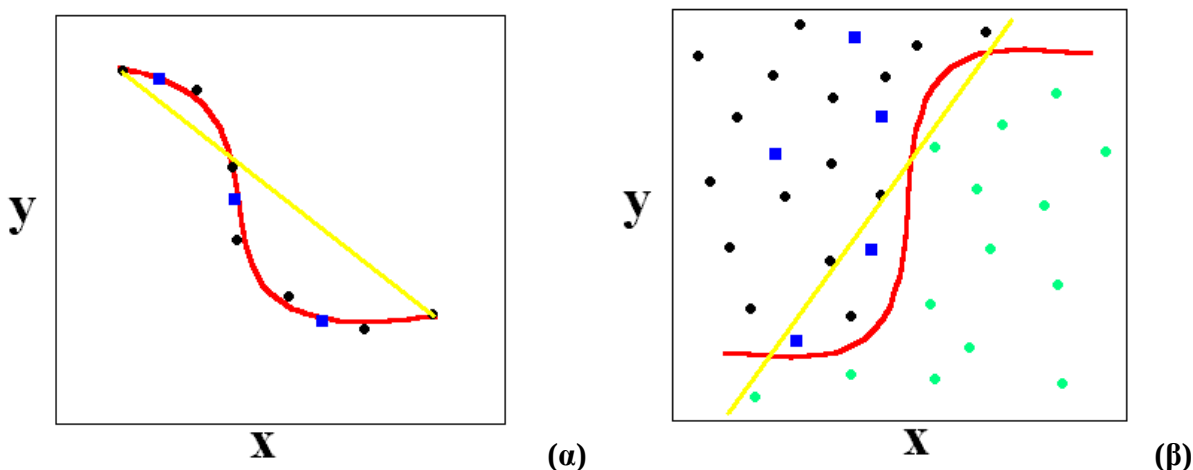
Βήμα 4.2. Απόφαση ότι έχει επιτευχθεί σύγκλιση (*convergence*) του ΤΝΔ για το σύνολο εκμάθησης (δηλαδή το συνολικό σφάλμα e είναι ικανοποιητικά μικρό για το σύνολο των ζευγών εισόδων-εξόδων του συνόλου εκμάθησης). Μετάβαση στο **Βήμα 5**.

Βήμα 5. Τέλος εκμάθησης.

Από τα προηγούμενα καθίσταται προφανές ότι τα βάρη των συνδέσεων αποτελούν τις κατεξοχήν αποθήκες γνώσης των ΤΝΔ. Μέσω της εκμάθησης είναι δυνατό να προσεγγιστούν:

(α) Συναρτήσεις. Εστω σύνολο εκμάθησης αποτελούμενο από ζεύγη (x,y) τα οποία εκφράζουν σημεία του n -διάστατου χώρου. Στα ΤΝΔ, η προσέγγιση της συνάρτησης η οποία προσαρμόζεται σε αυτά τα ζεύγη επιτυγχάνεται χωρίς υπολογισμό της αναλυτικής λύσης (μαθηματικού τύπου με μορφή πολωνύμου ή εξίσωσης) αλλά, μέσω της ρύθμισης των βαρών του ΤΝΔ έτσι ώστε η είσοδος των τιμών x των γνωστών ζευγών να αποδίδει (προσεγγιστικά) τις αντίστοιχες τιμές y των ζευγών. Με αυτή την έννοια, τα βάρη του ΤΝΔ συλλογικά εμπεριέχουν τη μαθηματική έκφραση της καμπύλης η οποία ενώνει όλα τα δεδομένα ζεύγη. Ενα παράδειγμα παρουσιάζεται στο **Σχήμα 39(α)**, όπου η κόκκινη γραμμή προσεγγίζει την καμπύλη η οποία ενώνει τα γνωστά ζεύγη (μαύρους κύκλους).

(β) Κατηγορίες. Δεδομένων ζευγών (x,y) , τα οποία εκφράζουν τα χαρακτηριστικά ενός αντικείμενου και την κατηγορία του, αντίστοιχα, είναι δυνατό να δημιουργηθεί μία καμπύλη (επιφάνεια ή, στη γενικότερη περίπτωση, υπερεπιφάνεια) η οποία διαχωρίζει τα αντικείμενα x βάσει της κατηγορίας y στην οποίαν αυτά ανήκουν. Η διαχωριστική καμπύλη προσαρμόζεται στα ζεύγη του συνόλου εκμάθησης μέσω της σταδιακής αλλαγής των βαρών έτσι ώστε αυτά να λαμβάνουν τιμές οι οποίες για είσοδο των χαρακτηριστικών x των δεδομένων να αποδίδουν (προσεγγιστικά) την αντίστοιχη κατηγορία y των ζευγών. Στο **Σχήμα 39(β)** φαίνεται ένα παράδειγμα κατηγοριοποίησης όπου η κόκκινη γραμμή προσεγγίζει τη διαχωριστική καμπύλη μεταξύ των μαύρων και των πράσινων κύκλων.



Σχήμα 39. Προσέγγιση συνάρτησης **(α)** και κατηγοριοποίησης **(β)**³⁸ στο διδιάστατο χώρο.

Είναι προφανές ότι, λόγω του πεπερασμένου συνόλου εκμάθησης, υπάρχει πληθώρα συναρτήσεων ή διαχωριστικών καμπυλών (άρα και αντίστοιχα βάρη του ΤΝΔ) οι οποίες το προσεγγίζουν ικανοποιητικά. Η ρύθμιση των βαρών πρέπει να είναι τέτοια ώστε το ΤΝΔ να είναι ικανό να αποκρίνεται σωστά και σε νέες εισόδους (*test patterns*), άρα να επιδεικνύει γενίκευση (*generalisation*). Η γενίκευση χαρακτηρίζει την απαιτούμενη μορφή και πολυπλοκότητα της προσεγγιζόμενης συνάρτησης ή διαχωριστικής καμπύλης έτσι ώστε η ορθή απόκριση να επεκτείνεται σε μη τετριμμένα σύνολα ελέγχου (*test sets*)³⁹. Για την επιτυχημένη γενίκευση, συνήθως στρατηγική κατά την εκμάθηση είναι συγχρόνως με το σύνολο εκμάθησης να χρησιμοποιείται και ένα σύνολο τεκμηρίωσης (*validation set*)⁴⁰: η ρύθμιση των βαρών εκτελείται από το σύνολο εκμάθησης (έλεγχος ικανοποιητικής προσέγγισης της συνάρτησης ή διαχωριστικής καμπύλης) σε συνδυασμό με το σύνολο τεκμηρίωσης (επιλογή καταλληλότερης συνάρτησης ή διαχωριστικής καμπύλης). Ένα παράδειγμα παρουσιάζεται στο **Σχήμα 40**, όπου το σύνολο εκμάθησης ταυτίζεται για τα δύο παραδείγματα αλλά οι δύο προσεγγιζόμενες συναρτήσεις είναι σημαντικά διαφορετικές⁴¹, γεγονός το οποίο καθορίζεται από το μοναδικό ζεύγος του συνόλου τεκμηρίωσης. Σημειώνεται ότι η ορθή λειτουργία καθώς και η γενίκευση του ΤΝΔ περιορίζονται μεταξύ των ακρότατων τιμών x του συνόλου εκμάθησης: η ορθή απόκριση του ΤΝΔ δεν είναι δυνατή πέρα του $\min\{x\}$ ή του $\max\{x\}$.

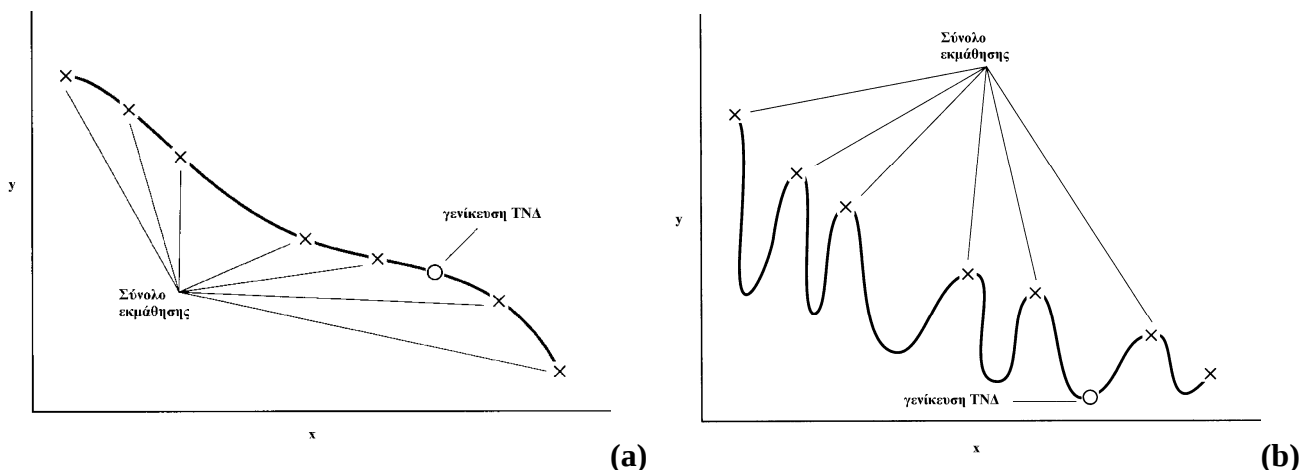
Παράγοντες οι οποίοι επιδρούν στην επιτυχία εκμάθησης, στο ρυθμό σύγκλισης καθώς και στη δυνατότητα γενίκευσης του ΤΝΔ αποτελούν:

³⁸ Και στις δύο περιπτώσεις, η κόκκινη γραμμή δημιουργείται από τα ζεύγη (x',y') , όπου x' οι είσοδοι στο ΤΝΔ για όλα τα σημεία μεταξύ $\min\{x\}$ και $\max\{x\}$ και y' οι αντίστοιχες έξοδοι του ΤΝΔ.

³⁹ Για παράδειγμα, στο **Σχήμα 38** το σύνολο ελέγχου απαρτίζεται από τα x' τα οποία αντιστοιχούν στα μπλε τετράγωνα.

⁴⁰ Εάν αυτό δεν υπάρχει, τότε μικρό τμήμα του συνόλου εκμάθησης μπορεί να αφαιρεθεί και να χρησιμοποιηθεί αποκλειστικά και μόνο για την τεκμηρίωση.

⁴¹ Μάλιστα, η πολυπλοκότητα της συνάρτησης του **Σχήματος 40(α)** είναι σημαντικά μικρότερη από αυτή της συνάρτησης του **Σχήματος 40(β)**.



Σχήμα 40. Χρησιμότητα του συνόλου τεκμηρίωσης.
Πολυπλοκότητα προσεγγιζόμενης συνάρτησης ή διαχωριστικής καμπύλης.

- ± Η επιλογή αρχικών βαρών του TNA. Είναι δυνατόν κάποια αρχικά βάρη να μην επιτρέπουν ή να επιβραδύνουν σημαντικά τη σύγκλιση, ενώ κάποια άλλα να την επισπεύδουν.
- ± Η σειρά παρουσίασης των ζευγών του συνόλου εκμάθησης (ισχύει για τη πρώτη μέθοδο εκμάθησης). Για γρηγορότερη σύγκλιση του TNA, είναι σκόπιμο να αλλάζει η σειρά παρουσίασης των ζευγών σε κάθε συνολική παρουσίασή τους. Με αυτό τον τρόπο, η κάθε αλλαγή βαρών δεν ακολουθείται πάντα από την ίδια αλλαγή βαρών, οπότε οι διαδοχικές αλλαγές βαρών δεν εξουδετερώνονται πάντα κατά τον ίδιο τρόπο.
- ± Ο αριθμός των κόμβων στα ενδιάμεσα επίπεδα. Η επιλογή του σωστού αριθμού κόμβων ανά ενδιάμεσο επίπεδο προωθεί τη δημιουργία συνάρτησης ή διαχωριστικής καμπύλης κατάλληλης πολυπλοκότητας. Αντίθετα, η ύπαρξη μη επαρκούς αριθμού κόμβων δεν επιτρέπει την ικανοποιητική προσέγγιση (πχ. η προσεγγιζόμενη συνάρτηση μπορεί να έχει τη μορφή του **Σχήματος 40(β)** ενώ το TNA να επιτρέπει συνάρτηση με πολυπλοκότητα παρόμοια με αυτήν του **Σχήματος 40(α)**), ενώ η ύπαρξη περισσότερων κόμβων από ό,τι είναι απαραίτητο δημιουργεί προβλήματα γενίκευσης (πχ. η προσεγγιζόμενη συνάρτηση μπορεί να έχει τη μορφή του **Σχήματος 40(α)** ενώ το TNA να δημιουργεί συνάρτηση μεγαλύτερης πολυπλοκότητας παρόμοια με αυτήν του **Σχήματος 40(β)**).
- ± Ο αριθμός ενδιάμεσων επιπέδων. Η μη χρήση ενδιάμεσων επιπέδων κόμβων επιτρέπει τη δημιουργία ευθείας (επιπέδου ή, στη γενικότερη περίπτωση, υπερεπιπέδου) για την προσέγγιση της ζητούμενης συνάρτησης ή διαχωριστικής καμπύλης (πχ. κίτρινες ευθείες στο **Σχήμα 39**), συνεπώς επιτρέπει μόνο την επίλυση γραμμικά διαχωρίσιμων (*linearly separable*) προβλημάτων. Έχει αποδειχτεί ότι η χρήση ενός ενδιάμεσου επιπέδου κόμβων επιτρέπει την προσέγγιση οποιασδήποτε συνάρτησης ή διαχωριστικής καμπύλης (Cybenko, 1989), με την πολυπλοκότητα της προσέγγισης να εξαρτάται από τον αριθμό των κόμβων στο ενδιάμεσο επίπεδο. Η χρήση περισσότερων του ενός ενδιάμεσων επιπέδων επιτρέπει την πιο εύκολη⁴² δημιουργία πολύπλοκων συναρτήσεων ή διαχωριστικών καμπυλών.

Καθότι, για λόγους γενίκευσης, προτιμάται η πιο απλή συνάρτηση ή διαχωριστική καμπύλη η οποία ικανοποιεί συγχρόνως τα σύνολα εκμάθησης και τεκμηρίωσης, είναι προτιμότερη η επιλογή ενός μικρού TNA (λίγοι κόμβοι, λίγα ενδιάμεσα επίπεδα) και η μετέπειτα επέκτασή του εάν και μόνο εάν η πολυπλοκότητα της προσεγγιζόμενης συνάρτησης δεν επιτυγχάνεται για διαφορετικές αρχικοποιήσεις βαρών και διαφορετικές παρουσιάσεις των ζευγών του συνόλου εκμάθησης.

⁴² Μέσω της χρήσης λιγότερων ενδιάμεσων κόμβων συνολικά από ό,τι χρειάζονται για την αντίστοιχη προσέγγιση με ένα μόνο ενδιάμεσο επίπεδο (ταχύτερη και πιο αποδοτική σύγκλιση).

5.2.3. Αποτίμηση ΤΝΔ

Τα ΤΝΔ υπερτερούν των προαναφερθεισών τεχνικών ΤΝ όσον αφορά στην:

- (α) Αμεση εκμάθηση (προσαρμογή στο περιβάλλον) μέσα από παραδείγματα χωρίς την ανάγκη ύπαρξης διδάσκοντος ή την ανάγκη προσδιορισμού της αναλυτικής λύσης.
- (β) Κατανεμημένη αναπαράσταση της γνώσης στα βάρη των ΤΝΔ έναντι της δυαδικής αναπαράστασης των τεχνικών ΤΝ. Αυτή η αναπαράσταση επιτρέπει την αποδοτική διαχείριση πολλαπλών δεδομένων και περιορισμών χωρίς τη δημιουργία προβλημάτων συνδυαστικής έκρηξης.
- (γ) Σε συνδυασμό με την παράλληλη και αραιή κωδικοποίηση της γνώσης στα βάρη, η κατανεμημένη αναπαράσταση προωθεί την ευρωστία των ΤΝΔ σε ελλιπή ή παραμορφωμένα δεδομένα. Η λειτουργία δε σταματά σε περίπτωση εισαγωγής λανθασμένων δεδομένων ή λόγω της έλλειψης κάποιων χαρακτηριστικών των δεδομένων. Απλά, παρατηρείται μία σταδιακή επιδείνωση (*graceful degradation*) της ακρίβειας των ΤΝΔ η οποία είναι ανάλογη της απόκλισης της εισαγόμενης τιμής από την αναμενόμενη καθώς και ανάλογη του ποσοστού των χαρακτηριστικών τα οποία λείπουν. Το ίδιο ισχύει και για τη βλάβη μέρους των ΤΝΔ (πχ. κάποιων κόμβων, συνδέσεων ή βαρών), οπότε η επιδείνωση της λειτουργίας τους είναι ανάλογη του αριθμού των μη λειτουργικών κόμβων ή του αριθμού και μεγέθους του βάρους⁴³ των μη λειτουργικών συνδέσεων.
- (δ) Δυνατότητα γενίκευσης και ορθής απάντησης σε νέες εισόδους.

Τα επόμενα δύο παραδείγματα τονίζουν αυτά τα σημεία.

Παράδειγμα εκμάθησης αορίστου

Η εκμάθηση του αορίστου σε ρήματα της Αγγλικής γλώσσας αφορά στην προσομοίωση γνωστικών λειτουργιών. Αποτελεί ένα πρόβλημα αναφοράς (*benchmark problem*) στο οποίο ΕΣ και άλλες τεχνικές ΤΝ έχουν αποτύχει. Η δυσκολία του προβλήματος έγκειται:

Κατάληξη αορίστου	Παράδειγμα	Αριθμός ρημάτων
/^d/	start	94
/t/	look	65
/d/	move	177

Πίνακας 7. Τρεις υποκατηγορίες ομαλών ρημάτων με διαφορετικές φωνητικές καταλήξεις του αορίστου.

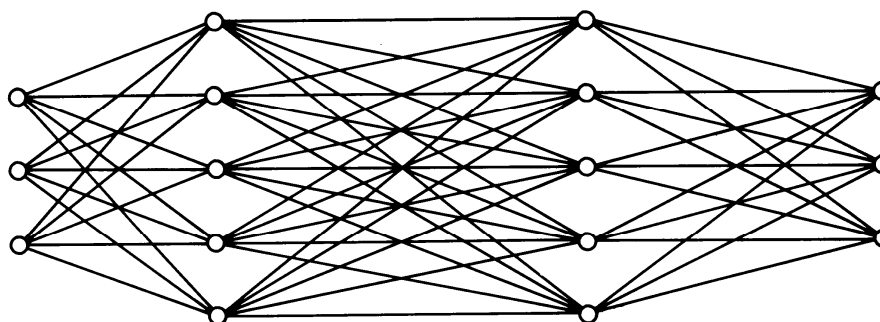
Υποκατηγορία	Παραδείγματα ρημάτων		
	πολύ συνήθη	μέτρια συνήθη	όχι συνήθη
I		fit, cut, put	thrust, bid
II		build, send	bend, lend
III	feel	deal, sell, sleep	creep, weep
IV	have, make	buy, teach	catch
V	get	meet, hold	breed, wind
VI		drink, ring	
VII			dig, stick
VIII	give, take, come	shake, bear	tear

Πίνακας 8. Οκτώ υποκατηγορίες (I-VIII) ανώμαλων ρημάτων χωρισμένες ανά συχνότητα παρουσίας.

⁴³ Το οποίο εκφράζει τη σπουδαιότητά του για την κωδικοποίηση μέρους της γνώσης.

- ± στη δυσκολία διάκρισης των ομαλών ρημάτων από τα ανώμαλα,
- ± στο σωστό διαχωρισμό των ομαλών καθώς και των ανώμαλων ρημάτων σε περαιτέρω φωνητικές υποκατηγορίες (**Πίνακες 7 και 8**, αντίστοιχα), και
- ± στην επιτυχή γενίκευση σε νέα ρήματα.

Το ΤΝΔ των Rumelhart και McClelland (1986), το οποίο φαίνεται στο **Σχήμα 41**, ακολουθεί τη δομή επάλληλων επιπέδων (είσοδου, δύο ενδιάμεσων και εξόδου) με διαδοχικές ενεργοποιήσεις επιπέδων. Ως είσοδοι και έξοδοι του ΤΝΔ χρησιμοποιούνται τα φωνήματα τα οποία εκφράζουν την προφορά των ρημάτων στον ενεστώτα και τον αόριστο, αντίστοιχα. Έτσι, το ΤΝΔ "ακούει" τον ενεστώτα ενός ρήματος (φωνήματα του ρήματος στον ενεστώτα) και αποδίδει τον αόριστο (φωνήματα του ρήματος στον αόριστο).



Σχήμα 41. ΤΝΔ για την εκμάθηση του αορίστου αγγλικών ρημάτων.

Προκειμένου να επιτευχθεί η προσομοίωση του σταδιακού τρόπου εκμάθησης του αορίστου από παιδιά προσχολικής ηλικίας, η παρουσίαση των ρημάτων πραγματοποιείται σε δύο φάσεις, με το αντίστοιχο σύνολο εκμάθησης να εμπλουτίζεται ως συνάρτηση των ρημάτων τα οποία είναι αναμενόμενο να ακούν σε κάθε φάση τα παιδιά (τα αποτελέσματα παρουσιάζονται συνοπτικά στον **Πίνακα 9** για όλα τα ρήματα):

Φάση 1. Το σύνολο εκμάθησης αποτελείται από τα δέκα πιο συνήθη ρήματα της Αγγλικής γλώσσας (τα αρχικά ρήματα come, want, get, give, look, take, go, need, make, have), τα περισσότερα από τα οποία είναι ανώμαλα. Δεν χρησιμοποιείται σύνολο τεκμηρίωσης ενώ το σύνολο ελέγχου ταυτίζεται με το σύνολο εκμάθησης προσομοιώνοντας το γεγονός ότι, σε αυτή τη φάση, η επικοινωνία πραγματοποιείται σχεδόν αποκλειστικά με αυτά τα ρήματα. Μετά από δέκα μόνο επαναλήψεις εκμάθησης, η πρακτικά 100% ορθή απόκριση του ΤΝΔ δημιουργεί την εντύπωση ότι "η συσχέτιση μεταξύ ενεστώτα και αορίστου αυτών των λίγων ρημάτων αποστηθίζεται".

Φάση 2. Το σύνολο εκμάθησης αποτελείται από 420 ρήματα (τα δέκα ρήματα της πρώτης φάσης και 410 νέα) τα οποία απεικονίζουν τα συνηθέστερα ρήματα της Αγγλικής γλώσσας. Μεγάλο ποσοστό από αυτά τα ρήματα είναι ομαλά. Όπως και στη Φάση 1, δεν χρησιμοποιείται σύνολο τεκμηρίωσης ενώ η εκμάθηση διαρκεί 190 συνολικά επαναλήψεις. Το σύνολο ελέγχου απαρτίζεται από 86 όχι και τόσο συνήθη ρήματα με παρόμοια αναλογία ομαλών-ανωμάτων ρημάτων με αυτή του συνόλου εκμάθησης (72 ομαλά και 14 ανώμαλα). Πραγματοποιείται έλεγχος του ΤΝΔ σε τακτά διαστήματα της εκμάθησης σε όλα τα ρήματα (ομαλά και ανώμαλα εκμάθησης καθώς και ελέγχου), ο οποίος αποκαλύπτει τα εξής:

Έλεγχος Α. Μετά από τις μισές επαναλήψεις εκμάθησης πραγματοποιείται υπεργενίκευση. Η κατάληξη -ed επικρατεί έτσι ώστε ακόμα και ο αόριστος των αρχικών ανώμαλων ρημάτων να ομαλοποιείται, π.χ. το ΤΝΔ αποδίδει τον αόριστο comed αντί για came, όπως έκανε στο τέλος της Φάσης 1. Έτσι, η απόκριση του ΤΝΔ δημιουργεί τώρα την εντύπωση ότι "κατασκευάζεται ένας γενικός κανόνας για την κατάληξη του αορίστου".

Έλεγχος Β. Μετά από όλες τις επαναλήψεις εκμάθησης τα 420 ρήματα έχουν μαθευτεί σωστά⁴⁴. Στα ρήματα του συνόλου ελέγχου τείνει να επικρατεί η ομαλή κατάληξη (εκτός αν κάποια μοιάζουν κατά

⁴⁴ Σημειώνεται ότι μετά από τα ¾ περίπου των επαναλήψεων παρατηρείται μία ενδιάμεση φάση όπου οι αποκρίσεις διχάζονται για τα ανώμαλα ρήματα π.χ. comed, camed καθώς και came ως αόριστος του come.

πολύ φωνητικά με τα αντίστοιχα ανώμαλα). Η ακρίβεια απόκρισης του ΤΝΔ φτάνει το 57%, και συγκεκριμένα το 66.7% για τα ομαλά ρήματα αλλά μόλις το 7% για τα ανώμαλα ρήματα.

Ρήμα	Φάση 1	Φάση 2	
		A	B
Αρχικά	Ορθή	Υπεργενικευμένη	Ορθή
Ομαλά	-	Ορθή	Ορθή
Ανώμαλα	-	Υπεργενικευμένη	Ορθή/Υπεργενικευμένη
Ελέγχου	-	Υπεργενικευμένη	Υπεργενικευμένη

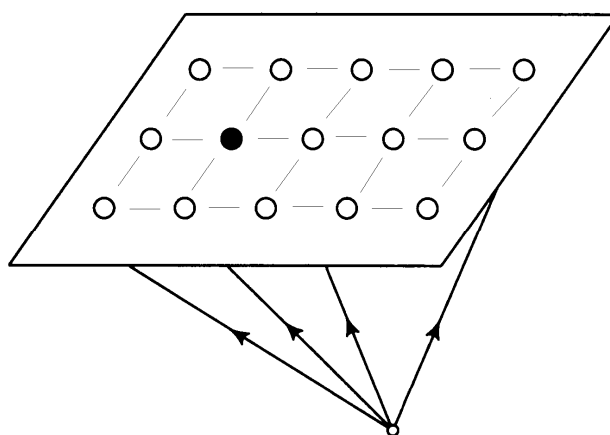
Πίνακας 9. Ελεγχος για τις διάφορες φάσεις εκμάθησης αορίστου από το ΤΝΔ.

Αν και η ακρίβεια του ΤΝΔ μοιάζει μικρή σε σύγκριση με την ανθρώπινη ευκολία στην ορθή απόδοση του αορίστου, υπερτερεί σημαντικά των πολύπλοκων κανόνων των προαναφερθεισών τεχνικών ΤΝ. Επιπλέον, προσομοιώνει την ανάπτυξη της ικανότητας απόδοσης του αορίστου από παιδιά προσχολικής ηλικίας, γεγονός το οποίο τη δεκαετία του 1980 έδωσε ιδιαίτερη ώθηση στα ΤΝΔ ως εργαλεία προσομοίωσης του μέσου (και της συμπεριφοράς) της ΦΝ.

Ταξινόμηση (κατηγοριοποίηση) μερών λόγου

Τα ΤΝΔ αυτοοργάνωσης (*self-organising maps*, Kohonen, 1988) είναι εμπνευσμένα από τους τοπολογικούς χάρτες του εγκεφάλου (**Σχήμα 37**). Οι κόμβοι δομούνται σε ένα επίπεδο το οποίο αναπτύσσεται ως πλέγμα σε μία ή δύο διαστάσεις (**Σχήμα 42**) με κατασταλτικές συνδέσεις μεταξύ γειτονικών κόμβων. Κατά την εκμάθηση του ΤΝΔ αυτοοργάνωσης:

- (α) οι κόμβοι ανταγωνίζονται (*competition*) μεταξύ τους όσον αφορά στην ομοιότητα των βαρών τους με την εκάστοτε είσοδο,
- (β) ο κόμβος με την μεγαλύτερη ομοιότητα των βαρών του με την είσοδο, καθώς και - σε μικρότερο βαθμό - οι άμεσοι γείτονές του, μεταβάλλουν τα βάρη τους ώστε αυτά να μοιάζουν ακόμη περισσότερο στην εκάστοτε είσοδο.



Σχήμα 42. ΤΝΔ αυτοοργάνωσης.

Αυτός ο τρόπος εκμάθησης έχει ως αποτέλεσμα το ΤΝΔ αυτοοργάνωσης να διαμορφώνει τα βάρη των κόμβων του έτσι ώστε τα βάρη κοντινών κόμβων μοιάζουν ενώ αυτά μακρινών κόμβων διαφέρουν σημαντικά. Αρα, το πλέγμα αποτελεί έναν τοπολογικό χάρτη όπου δημιουργούνται περιοχές του πλέγματος με κοινά χαρακτηριστικά. Κατά τον έλεγχο του ΤΝΔ, οι είσοδοι εφαρμόζονται σε όλους τους κόμβους του ΤΝΔ και επικρατεί ο κόμβος ο οποίος μοιάζει περισσότερο στη είσοδο (*winner-take-all*), καθώς οι είσοδοι οι οποίες μοιάζουν τοποθετούνται κοντά στον τοπολογικό χάρτη, ενώ είσοδοι οι οποίες

διαφέρουν σημαντικά τοποθετούνται μακριά, δημιουργείται μία κατηγοριοποίηση των εισόδων ανάλογα με τις περιοχές του πλέγματος οι οποίες έχουν καθοριστεί κατά την εκμάθηση.

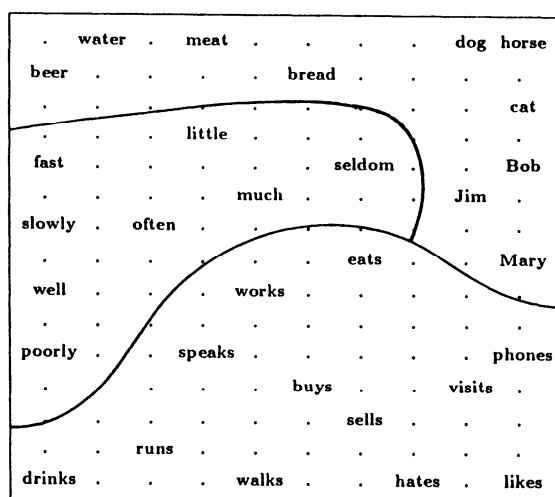
Bob/Jim/Mary	1	Sentence Patterns:			Mary likes meat
horse/dog/cat	2	1-5-12	1-9-2	2-5-14	Jim speaks well
beer/water	3	1-5-13	1-9-3	2-9-1	Mary likes Jim
meat/bread	4	1-5-14	1-9-4	2-9-2	Jim eats often
runs/walks	5	1-6-12	1-10-3	2-9-3	Mary buys meat
works/speaks	6	1-6-13	1-11-4	2-9-4	dog drinks fast
visits/phones	7	1-6-14	1-10-12	2-10-3	horse hates meat
buys/sells	8	1-6-15	1-10-13	2-10-12	Jim eats seldom
likes/hates	9	1-7-14	1-10-14	2-10-13	Bob buys meat
drinks	10	1-8-12	1-11-12	2-10-14	cat walks slowly
eats	11	1-8-2	1-11-13	2-11-4	Jim eats bread
much/little	12	1-8-3	1-11-14	2-11-12	cat hates Jim
fast/slowly	13	1-8-4	2-5-12	2-11-13	Bob sells beer
often/seldom	14	1-9-1	2-5-13	2-11-14	(etc.)
well/poorly	15				

Πίνακας 10.

Μέρος λεξικού

Μορφή δεδομένων

Παραδείγματα



Σχήμα 42. Τοπογραφικός χάρτης για την ταξινόμηση των μερών του λόγου.

ΤΝΔ αυτοοργάνωσης έχουν χρησιμοποιηθεί επιτυχώς για την ταξινόμηση και κατηγοριοποίηση δεδομένων. Το παρόν παράδειγμα αναφέρεται στην επιτυχή ταξινόμηση λέξεων ανάλογα με το μέρος του λόγου που καταλαμβάνουν σε μία πρόταση καθώς και ανάλογα με το νόημά τους, όπως αυτό συμπεραίνεται μέσα από τις προτάσεις. Είσοδο στο ΤΝΔ αυτοοργάνωσης αποτελούν προτάσεις που αποτελούνται από ακριβώς τρεις λέξεις. Οι λέξεις είναι είτε ουσιαστικά, είτε ρήματα, είτε επιρρήματα, οπότε οι προτάσεις είναι της μορφής "ουσιαστικό-ρήμα-ουσιαστικό" ή "ουσιαστικό-ρήμα-επίρρημα". Ενα υποσύνολο των λέξεων που έχουν χρησιμοποιηθεί για την εκμάθηση φαίνεται στον **Πίνακα 10**, όπου παρουσιάζονται επίσης κάποιες από τις επιτρεπόμενες δομές των προτάσεων καθώς και κάποια παραδείγματα προτάσεων που εισάγονται στο ΤΝΔ. Παρ' όλο που εκτός από τα τρία μέρη της πρότασης δεν εισάγεται καμία πληροφορία σχετικά με το μέρος του λόγου στο οποίο οι λέξεις της πρότασης ανήκουν ή σχετικά με τη δομή των προτάσεων ή, ακόμα, σχετικά με την έννοια των λέξεων, το ΤΝΔ δημιουργεί διαφορετικές περιοχές (τοπολογικός χάρτης) για τα ουσιαστικά, τα ρήματα και τα επιρρήματα (**Σχήμα 43**). Επίσης, μέσα σε κάθε περιοχή, λέξεις με παρόμοιο νόημα τοποθετούνται κοντά. Ετσι, ο τοπολογικός χάρτης σχηματίζεται με βάση μόνο αφενός τη θέση των λέξεων στις προτάσεις και

αφετέρου το ποιες λέξεις μπορούν να αντικαταστήσουν η μια την άλλη σε όσο το δυνατόν μεγαλύτερο αριθμό προτάσεων).

5.3. ΑΝΑΦΟΡΕΣ

1. Cybenko, G., 1989. Approximation by superpositions of a sigmoidal function, *Mathematics of Control, Signals, and Systems*, Vol. 2, pp. 303-314.
2. Kohonen, T., 1988. **Self-Organisation and Associative Memory (3rd edition)**. Springer-Verlag: New York, U.S.A.
3. Quinlan, J.R., 1986. Induction of decision trees, *Machine Learning*, Vol. 1, pp. 81-106.
4. D.Rumelhart, J.McClelland, 1986. On learning the past tenses of English verbs, pp. 216-271, in **Parallel Distributed Processing – Vol. 2** (Rumelhart D., McClelland J., eds.), MIT Press: Cambridge, MA, U.S.A.





ΒΕΛΤΙΣΤΟΠΟΙΗΣΗ – ΓΕΝΕΤΙΚΟΙ ΑΛΓΟΡΙΘΜΟΙ

6. ΒΕΛΤΙΣΤΟΠΟΙΗΣΗ

6.1. ΓΕΝΕΤΙΚΟΙ ΑΛΓΟΡΙΘΜΟΙ

Όπως φαίνεται από τις προαναφερθείσες μεθόδους αναζήτησης (παράγραφος 3.1.) και ικανοποίησης περιορισμών (παράγραφος 3.2.), η TN δεν δρα προσεγγιστικά, αλλά αναζητά μία ακριβή (και σε πολλές περιπτώσεις, τη βέλτιστη) λύση. Γι' αυτό στις απαιτήσεις μνήμης των δύο αυτών τεχνικών περιλαμβάνεται και η πορεία προς την τρέχουσα κατάσταση (ώστε να μην την επαναλαμβάνεται κάποια κατάσταση) καθώς και η ποιότητα της – μέχρι στιγμής - καλύτερης λύσης. Η ακολουθία των μεταβάσεων πραγματοποιείται σειριακά και είναι ομαλή από άποψη "γειτονιάς" (οι διαδοχικές καταστάσεις συνδέονται, επεκτείνουν η μία την άλλη, άρα "μοιάζουν" μεταξύ τους) αλλά όχι από άποψη ποιότητας.

Εμπνευσμένοι από τη κληρονομικότητα που απαντάται στα έμβια όντα - και συγκεκριμένα από την εξέλιξη των όντων, την επικράτηση των καλύτερων όσον αφορά τη δυνατότητα προσαρμογής τους στο περιβάλλον -, οι γενετικοί αλγόριθμοι (ΓΑ) αποτελούν μία στοχαστική (και όχι εξαντλητική) μέθοδο βέλτιστης αναζήτησης/ικανοποίησης περιορισμών, δηλ. αποσκοπούν στην ταχεία και οικονομική εύρεση μιας επαρκώς καλής (και όχι απαραίτητα της καλύτερης) λύσης.

Έτσι, 30 χρόνια πριν βιολόγοι, χρησιμοποίησαν H/Y για προσομοίωση βιολογικών συστημάτων, πληθυσμών. Δημιουργήθηκαν έτσι οι ΓΑ, οι οποίοι στηρίζονται στην αναλογία με τα φυσικά φαινόμενα/μηχανισμούς και εστιάζουν στην εξέλιξη (κατά Darwin), την κληρονομικότητα, τον πολλαπλασιασμό και την επικράτηση των πλέον συμβατών (με το περιβάλλον) ατόμων του πληθυσμού.

Η υλοποίηση πραγματοποιείται στο **υπερ-συμβολικό επίπεδο**. Έτσι,

- Ο **πληθυσμός** χρωμοσωμάτων αποτελεί σύνολο δυνατών καταστάσεων του προβλήματος.
- Τα **χρωμοσώματα**, αποτελούμενα από **γονίδια** (χαρακτηριστικά), εξελίσσονται σε ακολουθία γενιών μέσω **διασταυρώσεων**, **μεταλλάξεων σε επίπεδο γονιδίου** και **επιλογής**.
- Η **συνάρτηση καταλληλότητας** εκφράζει τον **σκοπό του πληθυσμού** και συνεπώς την **καταλληλότητα/ποιότητα λύσης**.

Τα πιο κατάλληλα χρωμοσώματα επιβιώνουν σε κάθε γενιά, οδηγώντας σε βελτιστοποίηση του πληθυσμού όσον αφορά στους συνδυασμούς χρωμοσωμάτων σε σχέση με τις απαιτήσεις του προβλήματος.

Στο επόμενο παράδειγμα (SAT 3) φαίνεται πώς από ένα τυχαίο αρχικό πληθυσμό λύσεων έχουμε ομαλή (σχεδόν μονοτονική) μετάβαση προς καλύτερες λύσεις χρησιμοποιώντας περιορισμένη μνήμη. Το SAT 3 εμπλέκει τρεις δίτιμες μεταβλητές οι οποίες, στο συγκεκριμένο πρόβλημα, συνδυάζονται μέσω τριών συζεύξεων $x_2 \wedge x_3$, $\sim x_1 \wedge x_3$, $\sim x_2 \wedge x_1$. Ο αριθμός των μεταβλητών υπαγορεύει **8 δυνατές καταστάσεις** και μέγιστη ικανοποίηση **3**, εφόσον είναι δυνατή η ικανοποίηση όλων των συζεύξεων. Όπως φαίνεται από τον επόμενο πίνακα, η μέγιστη ικανοποίηση για το συγκεκριμένο πρόβλημα ισούται με 2.

x_1	x_2	x_3	$x_2 \wedge x_3$	$\sim x_1 \wedge x_3$	$\sim x_2 \wedge x_1$	SAT
0*	0	0	L	L	L	0
0	0*	1	L	J	L	1
0	1	0	L	L	L	0
1	0*	0	L	L	J	1
0	1	1*	J	J	L	2
1*	0	1	L	L	J	1
1	1	0	L	L	L	0
1	1	1	J	L	L	1

Τυπικά, η αναζήτηση θα ήταν εξαντλητική, άρα θα εξετάζονταν και οι 8 καταστάσεις (π.χ. 000→001→011→010→110→100→101→111) και θα επιστρεφόταν η κατάσταση 011 ως βέλτιστη. Εφόσον χρησιμοποιηθούν ΓΑ, ο αρχικός πληθυσμός θα ελεγχόταν ως προς την καταλληλότητά του ως προς την ικανοποίηση και των τριών συζεύξεων, θα ακολουθούσαν διασταυρώσεις και μεταλλάξεις, ο νέος πληθυσμός ο οποίος θα απαρτιζόταν από τις νέες καταστάσεις θα ελέγχονταν ως προς την καταλληλότητά του και η διαδικασία θα συνεχιζόταν μέχρις ότου είτε (α) εύρεσης λύσης μέγιστης



ικανοποίησης, είτε (β) μη σημαντικής αλλαγής του πληθυσμού ή/και της μέσης καταλληλότητάς του, είτε (γ) ο μέγιστος αριθμός γενεών ξεπερνούσε ένα προκαθορισμένο όριο.

Σημειώνεται ότι, καθώς το μέγεθος του προβλήματος μεγαλώνει, η οικονομία μνήμης (και συνεπώς η υπεροχή των ΓΑ έναντι των κλασσικών τεχνικών) καθίσταται προφανής. Γενικά, οι ΓΑ προσφέρουν ικανοποιητικές λύσεις σε περιορισμένο χρόνο και βέλτιστη λύση για επαρκή χρόνο λειτουργίας (αριθμό γενεών).

Γενικά, η κλασσική αναζήτηση προσαρμόζει το πρόβλημα στην δομή του H/Y και (σχεδόν) εξαντλητικά εξερευνά τον χώρο του προβλήματος για την βέλτιστη λύση από υποψήφια λύση σε γειτονική υποψήφια λύση. Αντίθετα, οι ΓΑ, μέσω της διασταύρωσης και της μετάλλαξης, πραγματοποιούν μη γειτονική αναζήτηση για μία (σχεδόν) βέλτιστη λύση σε ικανό χρόνο, με χρήση περιορισμένης μνήμης. Αυτό σημαίνει ότι μία υποψήφια λύση μπορεί να εμφανίζεται στον πληθυσμό σε περισσότερες από μία γενεές. Μάλιστα, όσο καλύτερη είναι η υποψήφια λύση τόσο πιο συχνά θα εμφανίζεται στον πληθυσμό.

6.2. ΑΝΑΦΟΡΕΣ

1. Goldberg, D.E., 1989. *Genetic Algorithms in Search Optimization and Machine Learning*. Addison Wesley.



Πανεπιστήμιο Πειραιώς
Τμήμα Μηχανικής Διοίκησης και Τεχνολογίας
Διαχείριση Πληροφοριών και Γλώσσες Προγραμματισμού





ΛΕΞΙΛΟΓΙΟ



ΑΛΓΟΡΙΘΜΟΣ (algorithm)

Σύνολο κανόνων που χρησιμοποιούνται για τον υπολογισμό ή την επίλυση προβλημάτων.

ΒΑΘΜΟΣ ΒΕΒΑΙΟΤΗΤΑΣ (certainty factor)

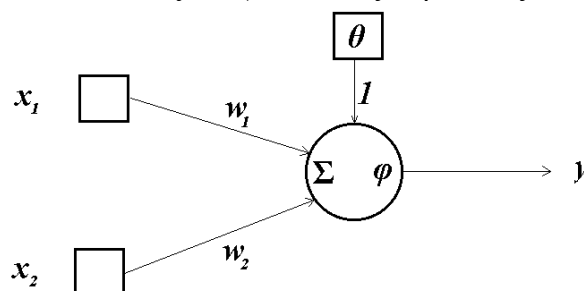
Στα κλασσικά συστήματα κανόνων και τα πρώιμα ΕΣ ο κάθε κανόνας υποθέτει ότι εφόσον οι προϋποθέσεις ισχύουν τότε το συμπέρασμα ισχύει 100%. Στην πράξη όμως, είναι σπάνιο ένα συμπέρασμα να ακολουθεί με 100% βεβαιότητα. Οι περισσότεροι κανόνες εκφράζονται με – έστω και πολύ λίγη – αβεβαιότητα πχ. "Εάν η Μαρία είναι κουρασμένη, τότε θα έχει (μάλλον) κακή διάθεση". Η ένταξη του "μάλλον" στη συμπερασματική διαδικασία πραγματοποιείται μέσω ενός βαθμού βεβαιότητας (πχ. 0.6 για το παραπάνω παράδειγμα), ο οποίος συνοδεύει το συμπέρασμα με τον τρόπο που περιγράφεται στην παράγραφο 4.2.2. και ειδικά στο τμήμα όπου περιγράφεται το MYCIN. Αν και εμπνευσμένος από τη Θεωρία Πιθανοτήτων, ο βαθμός βεβαιότητας περιγράφει μάλλον μία άποψη/υποψία/εκτίμηση παρά μία πιθανότητα. Σημειώνεται ότι ο βαθμός βεβαιότητας διαφέρει από το ποσοστό συμμετοχής (παράγραφος 2.4.), αλλά μπορεί να συνδυάσει προϋποθέσεις οι οποίες εκφράζονται ως ασαφείς μεταβλητές.

ΓΡΑΜΜΙΚΑ ΔΙΑΧΩΡΙΣΙΜΟ ΠΡΟΒΛΗΜΑ (linearly separable problem)

Πρόβλημα κατηγοριοποίησης με πρότυπα δύο κατηγοριών, τα οποία μπορούν να διαχωριστούν από μία ευθεία. Το γνωστότερο – και απλούστερο – παράδειγμα μη διαχωρίσιμων προτύπων αποτελεί το πρόβλημα **XOR** όπου η κατηγοριοποίηση των προτύπων φαίνεται στον παρακάτω **Πίνακα**:

x_1	x_2	y
1	1	0
0	0	0
1	0	1
0	1	1

Ενα ΤΝΔ χωρίς ενδιάμεσο επίπεδο κόμβων εκφράζεται σε αυτό το πρόβλημα ως ένας κόμβος (ταύτιση επιπέδου εισόδου και εξόδου), ο οποίος παρουσιάζεται παρακάτω.



Προκειμένου να επιλυθεί το πρόβλημα αυτό πρέπει (χρησιμοποιώντας τις σχέσεις που αφορούν στην ενεργοποίηση του κόμβου ανά γραμμή του **Πίνακα**)

$$w_1 + w_2 + \theta > \alpha$$

$$\theta > \alpha$$

$$w_1 + \theta < \alpha$$

$$w_2 + \theta < \alpha$$

ή

$$w_1 + w_2 + \theta < \alpha$$

$$\theta < \alpha$$

$$w_1 + \theta > \alpha$$

$$w_2 + \theta > \alpha$$

Προσθέτοντας τις δύο πρώτες ανισότητες καθώς και τις δύο τελευταίες, προκύπτουν τα εξής

$$w_1 + w_2 + 2\theta > 2\alpha$$

$$w_1 + w_2 + 2\theta < 2\alpha$$

$$w_1 + w_2 + 2\theta < 2\alpha$$

$$w_1 + w_2 + 2\theta > 2\alpha$$

Αφού είναι αδύνατη η εύρεση ευθείας η οποία να διαχωρίζει τα τέσσερα αυτά πρότυπα, τα τελευταία χαρακτηρίζονται ως μη γραμμικά διαχωρίσιμα.

ΕΚΡΗΞΗ ΣΥΝΔΥΑΣΜΩΝ (combinatorial explosion)

Το ιδανικό στην αναζήτηση είναι η δημιουργία του δένδρου αναζήτησης προκειμένου να βρεθεί η βέλτιστη λύση. Αυτή η τεχνική είναι εφικτή εφόσον το πρόβλημα είναι επαρκώς απλό. Για παράδειγμα, έστω ένα πρόβλημα του οποίου το δένδρο αναζήτησης έχει τρία παρακλάδια για κάθε κατάσταση. Στο πρώτο επίπεδο θα υπάρχουν 3 καταστάσεις, στο δεύτερο 9, στο τρίτο 27, και ου το καθ' εξής, ώστε στο έβδομο επίπεδο θα υπάρχουν πάνω από 2000 καταστάσεις. Αυτό αποτελεί ένα παράδειγμα έκρηξης συνδυασμών (σημειώνεται ότι αυτό το δένδρο έχει μέσο αριθμό παρακλαδιών 3, το οποίο είναι ιδιαζόντως μικρό).

ΕΠΑΓΩΓΙΚΗ ΓΝΩΣΗ - ΕΠΑΓΩΓΗ (induction)

Στρατηγική εκμάθησης συστημάτων ΤΝ. Βασίζεται σε ένα σύνολο παραδειγμάτων τα οποία προμηθεύονται από τον διδάσκοντα και τα οποία μπορεί να είναι είτε μόνο θετικά είτε θετικά και αρνητικά. Βάσει αυτών των παραδειγμάτων δημιουργείται μία υπόθεση σχετικά με το πρόβλημα που εκφράζεται μέσα από τα παραδείγματα. Η υπόθεση αυτή πρέπει να ικανοποιεί όλα τα θετικά παραδείγματα αλλά κανένα από τα αρνητικά παραδείγματα. Η υπόθεση εκφράζεται συχνά μέσω δηλωτικής γνώσης ως σημασιολογικά δίκτυα, σχήματα ή συστήματα κανόνων.

ΕΥΡΙΣΤΙΚΗ ΜΕΘΟΔΟΣ (heuristics, shortcut) - ΕΜΠΕΙΡΙΚΟΣ ΚΑΝΟΝΑΣ (rule of thumb)

Αποτελεί μία τεχνική η οποία αποτρέπει το πρόβλημα της έκρηξης συνδυασμών και αυξάνει την αποδοτικότητα της αναζήτησης, ενδεχομένως θυσιάζοντας την πληρότητά της. Βασικά επικεντρώνει στον προσδιορισμό των μεταβάσεων οι οποίες μάλλον οδηγούν όσο το δυνατόν πιο κοντά στην επίλυση, άρα μάλλον μειώνουν όσο το δυνατόν περισσότερο την απόσταση από την τελική κατάσταση. Συνήθως εκμεταλλεύεται γνώση σχετική με το πρόβλημα και εμπειρικούς κανόνες προκειμένου να καθοδηγήσει την αναζήτηση, μια και η επίλυση δεν είναι συνήθως γνωστή.

Μία επιτυχής ευριστική μέθοδος είναι απαραίτητο να υποεκτιμά την απόσταση από την τελική κατάσταση (πχ. για την απόσταση μεταξύ δύο πόλων μπορεί να χρησιμοποιηθεί το μήκος της πιο μικρής ευθείας η οποία ενώνει τις δύο πόλεις). Αυτό ισχύει προκειμένου η πραγματική απόσταση να μην είναι ποτέ μικρότερη από την εντίμηση μέσω της ευριστικής μεθόδου, γεγονός που θα προκαλέσει πρόωμο τερματισμό της αναζήτησης.

ΜΙΚΡΟΚΟΣΜΟΣ (microworld)

Περιορισμένα και καλά καθορισμένο περιβάλλον (χώρους προβλήματος) στο οποίο είναι δυνατό να αναπτυχθεί πλήρως μία τεχνική ΤΝ έτσι ώστε να επιδεικνύεται ευφυία. Σκοπός της ΤΝ ήταν η σταδιακή αύξηση της πολυπλοκότητας του περιβάλλοντος (χαλάρωση περιορισμών του μικροκόσμου) και η παράλληλη επέκταση της τεχνικής ΤΝ μέχρις ότου επιτευχθεί η επίλυση πραγματικών προβλημάτων.

ΠΕΡΙΟΡΙΣΜΟΣ ΠΡΟΒΛΗΜΑΤΟΣ (problem reduction/decomposition)

Αποτελεί τεχνική διάσπασης του προβλήματος σε μικρότερα και πιο καλά δομημένα υπο-προβλήματα τα οποία είναι πιο εύκολο να επιλυθούν. Ιδανικά, τα υπο-προβλήματα είναι ανεξάρτητα μεταξύ τους, οπότε η επίλυση του αρχικού προβλήματος συναρμολογείται απλά από τις επιλύσεις των υπο-προβλημάτων

ΠΟΛΥΠΛΟΚΟΤΗΤΑ - ΑΠΑΙΤΗΣΕΙΣ ΜΝΗΜΗΣ/ΧΡΟΝΟΥ (space/time complexity and requirements)

Εστω δένδρο αναζήτησης με μέσο όρο παρακλαδιών 10. Τότε:



επίπεδο	κόμβοι	χρόνος	μνήμη
0	1	1ms	100 bytes
2	111	0.1s	11K
4	11111	11s	1M
6	1111111	18 min	111M
8	111111111	31 hrs	11G
10	11111111111	128 days	1T
12	1111111111111	35 years	111T
14	111111111111111	3500 years	11111T

Φαίνεται ότι οι απαιτήσεις μνήμης επικρατούν, αλλά και οι απαιτήσεις χρόνου είναι επίσης σημαντικές. Η πολυπλοκότητα της επίλυσης (συνδυασμού προβλήματος, αναπαράστασης και επιλεγμένης τεχνικής TN) μετριέται ως συνάρτηση ενός (ή και περισσότερων) βασικού χαρακτηριστικού του προβλήματος (το οποίο καθορίζει τον αριθμό των καταστάσεων, πχ. μέσου αριθμού παρακλαδιών στο προηγούμενο παράδειγμα) και της απαιτούμενης μνήμης/χρόνου μέχρι τη λύση. Συνήθως αποτελεί συνάρτηση του αριθμού των εμπλεκόμενων δεδομένων καθώς και του αριθμού των περιορισμών. Εκφράζεται μέσω "της τάξης του".

ΠΡΟΒΛΗΜΑ ΑΝΑΦΟΡΑΣ (benchmark problem)

Δύσκολο πρόβλημα το οποίο προσφέρεται για την αποτίμηση των προτεινόμενων τεχνικών επίλυσής του. Αποτελεί σημείο αναφοράς για τη σύγκριση διαφόρων τεχνικών TN. Η δυσκολία του έγκειται στην αναπαράσταση του προβλήματος ή στη διαχείριση της αποθηκευμένης γνώσης ή, τέλος, και στα δύο.

ΤΕΧΝΗΤΗ ΝΟΗΜΟΣΥΝΗ (artificial intelligence)

Η μελέτη των ιδεών οι οποίες επιτρέπουν στους Η/Υ να εκτελούν λειτουργίες τις οποίες ήδη εκτελούν με επιτυχία οι άνθρωποι.

