

ΠΑΝΕΠΙΣΤΗΜΙΟ ΠΑΤΡΩΝ
ΠΡΟΓΡΑΜΜΑ ΣΠΟΥΔΩΝ
ΕΚΠΑΙΔΕΥΣΗΣ ΑΠΟ ΑΠΟΣΤΑΣΗ

ΠΡΟΓΡΑΜΜΑ : ΠΛΗΡΟΦΟΡΙΚΗ
ΣΠΟΥΔΩΝ
ΘΕΜΑΤΙΚΗ : ΝΕΥΡΩΝΙΚΑ ΔΙΚΤΥΑ ΚΑΙ
ΕΝΟΤΗΤΑ P-INF-003 : ΓΕΝΕΤΙΚΟΙ ΑΛΓΟΡΙΘΜΟΙ

ΕΚΠΑΙΔΕΥΤΙΚΟ ΥΛΙΚΟ

ΠΡΩΤΟ ΚΕΦΑΛΑΙΟ

ΣΥΓΓΡΑΦΕΙΣ : **Σ. ΛΥΚΟΘΑΝΑΣΗΣ**
ΕΠ. ΚΑΘΗΓΗΤΗΣ
ΤΜΗΜΑΤΟΣ ΜΗΧ/ΚΩΝ Η/Υ ΚΑΙ ΠΛΗΡΟΦΟΡΙΚΗΣ
ΠΑΝΕΠΙΣΤΗΜΙΟΥ ΠΑΤΡΩΝ
Ε. ΓΕΩΡΓΟΠΟΥΛΟΣ
ΜΗΧΑΝΙΚΟΣ Η/Υ ΚΑΙ ΠΛΗΡΟΦΟΡΙΚΗΣ

- ΠΑΤΡΑ 1999 -

1. ΔΥΝΑΤΟΤΗΤΕΣ ΚΑΙ ΕΦΑΡΜΟΓΕΣ ΝΕΥΡΩΝΙΚΩΝ ΔΙΚΤΥΩΝ ΚΑΙ ΓΕΝΕΤΙΚΩΝ ΑΛΓΟΡΙΘΜΩΝ

Σκοπός

Σε αυτό το κεφάλαιο, αφού γίνει πρώτα μία σύντομη αναφορά στις τεχνολογίες της Τεχνητής Νοημοσύνης (Τ.Ν.), θα ακολουθήσει η εισαγωγή στα Νευρωνικά Δίκτυα (Ν.Δ.) και στους Γενετικούς Αλγορίθμους (Γ.Α.). Στόχος αυτής της ενότητας είναι η σύνδεση των Ν.Δ. όσο και των Γ.Α. με την Τ.Ν. από την οποία προήλθαν.

Τα Ν.Δ. προσπαθούν να μιμηθούν τη λειτουργία ανθρώπινου εγκέφαλου, όσον αφορά το τρόπο μάθησης. Η παρουσίαση μερικών βασικών στοιχείων της λειτουργίας του εγκέφαλου, είναι πολύ χρήσιμη για την κατανόηση των βασικών αρχών λειτουργίας των Ν.Δ.. Για να γίνει κατανοητή η λειτουργία ενός Γενετικού Αλγορίθμου, είναι σκόπιμο να δοθούν ορισμένα στοιχεία από την Θεωρία της Βιολογικής Γενετικής Εξέλιξης, από την οποία δανείζονται στοιχεία οι αλγόριθμοι αυτοί και στη συνέχεια θα δούμε πώς στοιχεία αυτής της θεωρίας μπορούν να χρησιμοποιηθούν για να δομηθεί ένας αλγόριθμος αναζήτησης και βελτιστοποίησης. Επίσης θα παρουσιαστούν τα βασικά πλεονεκτήματα αυτών των δύο κατηγοριών αλγορίθμων.

Μελετώντας αυτό το κεφάλαιο, ο αναγνώστης θα έχει εξοικειωθεί με τις έννοιες της Τεχνητής Νοημοσύνης, της Τεχνητής Μάθησης και της Αναζήτησης και Βελτιστοποίησης. Κυρίως όμως, αυτό το κεφάλαιο θα τον εισάγει σε θέματα της θεωρίας της μάθησης και της γενετικής αναζήτησης, δηλαδή στο πώς ιδέες που προέρχονται από την μάθηση και την εξέλιξη των βιολογικών ειδών μπορούν να χρησιμοποιηθούν σε πραγματικά προβλήματα μάθησης και αναζήτησης του βέλτιστου και να οδηγήσουν στη λύση τους γρήγορα και αποδοτικά. Επίσης, θα αναφερθούν οι περιοχές στις οποίες βρίσκουν εφαρμογή αυτοί οι αλγόριθμοι για την επίλυση πρακτικών προβλημάτων. Τέλος θα γίνει μία σύντομη παρουσίαση των βιολογικών συστημάτων, από τα οποία οι ερευνητές εμπνεύστηκαν τόσο τα Ν.Δ. όσο και τους Γ.Α..

Προσδοκώμενα Αποτελέσματα:

Όταν θα έχετε τελειώσει τη μελέτη αυτού του κεφαλαίου, θα μπορείτε να:

- περιγράψετε τις τεχνολογίες της Τ.Ν.
- περιγράψετε ποιοτικά τι είναι ένα νευρωνικό δίκτυο
- περιγράψετε ποιοτικά τι είναι ένας γενετικός αλγόριθμος
- περιγράψετε τις ομοιότητες και τις διαφορές με τα ανάλογα βιολογικά συστήματα
- απαριθμήσετε μερικές περιοχές που βρίσκει εφαρμογή η Υ.Ν.

Έννοιες Κλειδιά:

- τεχνητά νευρωνικά δίκτυα
- βιολογικά νευρωνικά δίκτυα
- νευρώνας
- συναπτικό βάρος ή σύναψη
- κανόνας μάθησης
- γενετικός αλγόριθμος
- πληθυσμός
- γενιά
- χρωμόσωμα
- γενετικοί τελεστές
- διαδικασία επιλογής

Εισαγωγικές Παρατηρήσεις:

Κατά τη διάρκεια των τριών τελευταίων δεκαετιών υπάρχει ένα αυξανόμενο ενδιαφέρον σε αλγορίθμους οι οποίοι βασίζονται σε αναλογίες με τις φυσικές διαδικασίες. Η εμφάνιση των μαζικά παράλληλων ηλεκτρονικών υπολογιστών έκανε αυτούς τους αλγορίθμους να αποκτήσουν πρακτικό ενδιαφέρον. Στους πιο γνωστούς αλγορίθμους αυτής της κατηγορίας περιλαμβάνονται τα νευρωνικά δίκτυα, οι γενετικοί αλγόριθμοι, ο εξελικτικός προγραμματισμός, οι εξελικτικές στρατηγικές, η μέθοδος τοπικής αναζήτησης, και τα συστήματα ταξινόμησης. Οι παραπάνω αλγόριθμοι, αν και έγιναν γνωστοί ως τεχνολογίες που χρησιμοποιούνται στην Τεχνητή Νοημοσύνη (Artificial Intelligence) και πιο συγκεκριμένα στη Μάθηση Μηχανής (Machine Learning), πρόσφατα αναφέρονται στη διεθνή βιβλιογραφία ως αλγόριθμοι Υπολογιστικής Νοημοσύνης (Computational Intelligence).

Αυτό το εκπαιδευτικό υλικό πραγματεύεται δύο κλάσεις αυτών των αλγορίθμων. Πρώτα θα αναφερθούμε σε τεχνικές που βασίζονται στην θεωρία της μάθησης, δηλαδή τα Νευρωνικά Δίκτυα (Ν.Δ.). Τα Ν.Δ. εκπαιδεύονται με τη βοήθεια παραδειγμάτων, έτσι ώστε να μαθαίνουν το περιβάλλον τους. Ένα παράδειγμα περιλαμβάνει την είσοδο και την επιθυμητή έξοδο σε αυτή. Το σύνολο των παραδειγμάτων αποτελεί το εκπαιδευτικό σύνολο. Για την εκπαίδευση χρησιμοποιούνται κανόνες, οι οποίοι βασίζονται στην ελαχιστοποίηση του λάθους στην έξοδο του δικτύου. Ακολουθεί η γενίκευση, δηλαδή τα Ν.Δ. μαθαίνουν παραδείγματα για τα οποία δεν έχουν εκπαιδευτεί. Υπάρχουν πολλές κατηγορίες Ν.Δ., ανάλογα με την αρχιτεκτονική τους και τον τρόπο εκπαίδευσής τους. Επίσης υπάρχει μεγάλη ποικιλία αλγορίθμων εκπαίδευσης, ανάλογα με τον κανόνα μάθησης και τον αλγόριθμο ελαχιστοποίησης που χρησιμοποιείται.

Στη συνέχεια θα αναφερθούμε σε αλγορίθμους που βασίζονται στην αρχή της εξέλιξης (επιβίωση του καταλληλότερου). Σε αυτούς τους αλγορίθμους ένας πληθυσμός από άτομα (δυναμικές λύσεις) υποβάλλεται σε μια ακολουθία από μοναδιαίους (τύπου μετάλλαξης) και υψηλότερης τάξης (τύπου διασταύρωσης) μετασχηματισμούς. Αυτά τα άτομα ανταγωνίζονται για επιβίωση: ένα σχήμα επιλογής προκατειλημμένο υπέρ των καταλληλότερων ατόμων, επιλέγει την επόμενη γενιά. Μετά από ένα αριθμό επαναλήψεων, το πρόγραμμα συγκλίνει, ελπίζοντας ότι το καλύτερο άτομο αναπαριστά τη βέλτιστη λύση. Υπάρχουν πολλοί διαφορετικοί αλγόριθμοι σε αυτή την κατηγορία. Για να υπογραμμίσουμε τις ομοιότητές τους χρησιμοποιούμε τον κοινό όρο “εξελικτικά προγράμματα”. Τα εξελικτικά προγράμματα μπορούν να θεωρηθούν σαν γενίκευση των Γενετικών Αλγορίθμων. Οι κλασσικοί Γενετικοί Αλγόριθμοι λειτουργούν με σταθερού μήκους δυαδικές συμβολοσειρές, οι οποίες δεν είναι απαραίτητες για τα εξελικτικά προγράμματα. Επίσης τα εξελικτικά προγράμματα συνήθως ενσωματώνουν μία ποικιλία από “γενετικούς” τελεστές, ενώ οι Γενετικοί Αλγόριθμοι χρησιμοποιούν δυαδική κωδικοποίηση, δηλαδή συμβολοσειρές δυαδικών ψηφίων στις οποίες εφαρμόζονται οι κατάλληλοι τελεστές για τη διασταύρωση και τη μετάλλαξη των ατόμων του πληθυσμού.

1.1 Εισαγωγή στην Τεχνητή Νοημοσύνη

Η γεφύρωση του χάσματος ανάμεσα στον άνθρωπο και στις μηχανές αποτελεί τον μεγαλύτερο στόχο της Επιστήμης των Υπολογιστών. Όμως, ακόμη και σήμερα, αν και η επιστήμη αυτή έχει εμφανίσει αλματώδη ανάπτυξη δεν έχει καταφέρει να παρουσιάσει ηλεκτρονικούς υπολογιστές απαλλαγμένους από τα κλασσικά μειονεκτήματα μιας μηχανής. Έτσι, εκτός από ελάχιστες εξαιρέσεις, δεν υπάρχουν σήμερα μηχανές που να είναι σε θέση να επικοινωνήσουν με τον άνθρωπο σε φυσική γλώσσα, να απαντούν σε ερωτήσεις για διάφορα συγκεκριμένα προβλήματα (εκτός εάν είναι εφοδιασμένοι με μία κατάλληλη μέθοδο επίλυσης) ή να αποκτούν εμπειρίες και να μαθαίνουν από τις αποτυχίες και τα λάθη τους. Η περιοχή έρευνας που ασχολείται με αυτού του είδους τα προβλήματα καλείται Τεχνητή Νοημοσύνη.

Τεχνητή Νοημοσύνη (T.N.) ονομάζεται η μελέτη των τεχνικών και των διεργασιών που δίνουν σε έναν υπολογιστή τη δυνατότητα να αποκτά διανοητικές ικανότητες, ανάλογες με αυτές που διαθέτει ο ανθρώπινος εγκέφαλος. Η T.N. έχει ως κύριο στόχο της να γίνει ο υπολογιστής πιο έξυπνος και κατ' επέκταση πιο χρήσιμος, αφού θα είναι σε θέση να ανταποκρίνεται πολύ καλύτερα στις ανάγκες και τις επιθυμίες του ανθρώπου.

Σήμερα ο όρος T.N. χρησιμοποιείται τόσο για τη μελέτη της ανθρώπινης νοημοσύνης, όσο και για την βελτίωση των δυνατοτήτων των υπολογιστών. Οι κυριότερες εφαρμογές της είναι οι εξής:

- 1) Ο προγραμματισμός μιας ακολουθίας ενεργειών για την επίτευξη ενός στόχου (planning).
- 2) Η εξαγωγή συμπερασμάτων (inference) μέσα από αλληλοσυσχετιζόμενα γεγονότα και η λήψη αποφάσεων (decision making).
- 3) Η παροχή συμβουλών και συμπερασμάτων μέσα από σύνθετες δομές κανόνων και γεγονότων (expert systems).
- 4) Η εκπαίδευση των υπολογιστών για επικοινωνία με τους ανθρώπους μέσω φυσικών γλωσσών. Αυτό περιλαμβάνει μια ποικιλία εφαρμογών όπως αναγνώριση φωνής, παραγωγή φωνής, κατανόηση κειμένου, κ.λπ.
- 5) Η αυτόνομη κίνηση των υπολογιστών και η μετακίνηση από αυτούς αντικειμένων μέσα στο χώρο (robotics).
- 6) Η αναγνώριση αντικειμένων μέσω κάμερας (vision).

Όπως είναι φυσικό, η πρόοδος στον τομέα της T.N. σημειώνεται με αργούς ρυθμούς, διότι απαιτεί πολυετή και επίπονη έρευνα. Είναι επίσης φανερό ότι η κατασκευή μιας

μηχανής με ανθρώπινες ικανότητες και ιδιότητες είναι μια ιδιαίτερα δύσκολη εργασία. Τα μέχρι τώρα επιτεύγματα, όμως, αν και είναι μακριά από την τελειοποίησή τους, μπορούν να χαρακτηριστούν αρκετά ικανοποιητικά.

Οι περιοχές έρευνας της Τ.Ν. που συγκεντρώνουν το μεγαλύτερο ενδιαφέρον σήμερα είναι οι εξής:

Νευρωνικά Δίκτυα (Neural Networks)

Γενετικοί Αλγόριθμοι (Genetic Algorithms)

Έμπειρα Συστήματα (Expert Systems)

Ασαφή Συστήματα (Fuzzy Systems)

Άσκηση αυτοαξιολόγησης 1.1/1: Ποιές είναι οι κυριότερες εφαρμογές της Τ.Ν;

Απάντηση: Σωστά, οι πιο γνωστές είναι αυτές που αναφέρονται στη σελίδα 6.

1.1.1 Νευρωνικά Δίκτυα

Τα Τεχνητά Νευρωνικά Δίκτυα (ΤΝΔ) ή απλά Νευρωνικά Δίκτυα (Ν.Δ.) αποτελούν μια προσπάθεια προσέγγισης της λειτουργίας του ανθρώπινου εγκεφάλου από μια μηχανή. Έχουν την ικανότητα να εκτελούν υπολογισμούς με μαζικό παράλληλο τρόπο. Η αρχιτεκτονική τους βασίζεται στην αρχιτεκτονική των Βιολογικών Νευρωνικών Δικτύων. Τα ΤΝΔ είναι μια συλλογή από νευρώνες (Processing Units- PUs) που συνδέονται μεταξύ τους. Κάθε PU έχει πολλές εισόδους αλλά μόνο μία έξοδο η οποία με τη σειρά της μπορεί να αποτελέσει είσοδο για άλλες PUs. Η συνδέσεις μεταξύ των PUs διαφέρουν ως προς τη σημαντικότητά τους, η οποία και προσδιορίζεται από το συντελεστή βάρους (σύναψη). Η επεξεργασία κάθε PU καθορίζεται από τη συνάρτηση μεταφοράς, η οποία καθορίζει την κάθε έξοδο σε σχέση με τις εισόδους και τους συντελεστές βάρους.

Για να χρησιμοποιηθεί ένα ΤΝΔ πρέπει πρώτα να εκπαιδευτεί για να μάθει. Η μάθηση συνίσταται στον προσδιορισμό των κατάλληλων συντελεστών βάρους, ώστε το ΤΝΔ να εκτελεί τους επιθυμητούς υπολογισμούς, και πραγματοποιείται με τη βοήθεια αλγορίθμων που είναι γνωστοί ως κανόνες μάθησης. Ο ρόλος των συντελεστών βάρους μπορεί να ερμηνευτεί ως αποθήκευση γνώσης, η οποία παρέχεται μέσω παραδειγμάτων. Με αυτόν τον τρόπο τα Ν.Δ. μαθαίνουν το περιβάλλον τους, δηλαδή το φυσικό μοντέλο που παρέχει τα δεδομένα.

Γνωστά ΤΝΔ είναι τα ΤΝΔ χωρίς ανατροφοδότηση, π.χ. τα εμπρός τροφοδότησης Ν.Δ. πολλών επιπέδων (feedforward multilayer Neural Networks), με ανατροφοδότηση, π.χ. το μοντέλο Hopfield, τα Cellular neural networks, κ.α.

1.1.2 Γενετικοί Αλγόριθμοι

Τα τελευταία τριάντα χρόνια, έχει παρατηρηθεί ένα συνεχώς αυξανόμενο ενδιαφέρον για ανάπτυξη συστημάτων επίλυσης προβλημάτων βασισμένων στις αρχές της *Γενετικής Εξέλιξης* και της *Κληρονομικότητας*. Τα μειονεκτήματα των κλασσικών μεθόδων αναζήτησης και βελτιστοποίησης, καθώς και η συνεχώς αυξανόμενη ανάγκη για παραγωγή λογισμικού που να μπορεί να εκμεταλλεύεται πιο αποδοτικά τις τεράστιες δυνατότητες του υλικού, ήταν η βασική αιτία που ώθησε τους επιστήμονες σ' αυτήν την αναζήτηση. Αυτού του είδους τα συστήματα λειτουργούν διατηρώντας ένα πληθυσμό κωδικοποιημένων πιθανών λύσεων και εφαρμόζοντας πάνω σε αυτό διάφορες διαδικασίες επιλογής του καλύτερου, καθώς και διάφορους *γενετικούς τελεστές*. Οι τελεστές αυτοί αντιγράφουν τον τρόπο με τον οποίο αναπαράγονται και μεταλλάσσονται τα χρωμοσώματα των κυττάρων των ζωντανών οργανισμών. Έτσι, περνώντας από γενιά σε γενιά, τα συστήματα αυτά δημιουργούν συνεχώς νέους πληθυσμούς πιθανών λύσεων χρησιμοποιώντας, τόσο κομμάτια και στοιχεία από την προηγούμενη γενιά, όσο και εντελώς καινούρια κομμάτια που δοκιμάζονται για τυχόν καλή απόδοσή τους. Με αυτόν τον τρόπο αξιοποιούν τις πληροφορίες που τους παρέχει το περιβάλλον τους.

Επανεπιλημμένες δοκιμές και πειράματα έχουν δείξει ότι μια "φυσική" αναπαράσταση των πιθανών λύσεων για ένα δεδομένο πρόβλημα σε συνδυασμό με την εφαρμογή σε αυτή μιας οικογένειας γενετικών τελεστών, αποτελεί πολύ χρήσιμο εργαλείο στην προσπάθεια προσέγγισης των πραγματικών λύσεων σε μια πολύ μεγάλη ποικιλία προβλημάτων και εφαρμογών. Αυτό το γεγονός μετατρέπει αυτή την προσέγγιση "φυσικού μοντέλου" σε μια πολλά υποσχόμενη κατεύθυνση όσον αφορά την επίλυση προβλημάτων γενικότερα.

1.1.3 Έμπειρα Συστήματα

Τα Έμπειρα Συστήματα (Ε.Σ.) αποσκοπούν στην πραγματοποίηση συστημάτων υπολογιστών με δυνατότητες αυτόματης επεξεργασίας των δεδομένων ενός

προβλήματος και την εξαγωγή συγκεκριμένων συμπερασμάτων. Χρησιμοποιούν προγραμματιστικές μεθόδους της Τ.Ν. σε συνδυασμό με τις γνώσεις εμπειρογνομώνων σε ειδικά θέματα. Ένα Ε.Σ. αποτελείται από την βάση γνώσης (knowledge base) και το μηχανισμό συμπεράσματος (inference engine), ο οποίος μπορεί να έχει διάφορες μορφές, ανάλογα με την εφαρμογή.

1.1.4 Ασαφή Συστήματα

Η γνώση που λαμβάνει ένας υπολογιστής για να συμπεριφερθεί έξυπνα αναπαρίσταται με τη μορφή κανόνων (rules) και γεγονότων (facts). Στην πράξη όμως, οι κανόνες και τα γεγονότα δεν παίρνουν πάντα την τιμή 0 ή 1, αλλά ισχύουν με πιθανότητες. Το γεγονός αυτό οδήγησε στην ανάπτυξη μιας σύγχρονης μαθηματικής λογικής, που αποτελεί επέκταση της απλής άλγεβρας Boole και ονομάζεται Ασαφής Λογική (Fuzzy Logic). Η Ασαφής Λογική εισάγει στο λογικό προγραμματισμό τις μη ακέραιες λογικές τιμές που ανήκουν στο διάστημα $[0,1]$ και ορίζει τελεστές για το συνδυασμό τους.

Τα συστήματα που αναπαριστούν τη γνώση και την ανθρώπινη λογική με βάση την Ασαφή Λογική, ονομάζονται Ασαφή Συστήματα (Fuzzy Systems).

Άσκηση αυτοαξιολόγησης 1.1/2: Ένα νευρωνικό δίκτυο μπορεί να θεωρηθεί σαν έμπειρο σύστημα;

Απάντηση: Ένα Ν.Δ. εκπαιδεύεται να μάθει ένα σύνολο από ζευγάρια εισόδου-εξόδου, δηλαδή AN είσοδος $TOTE$ έξοδος. Με αυτή την έννοια μπορεί να θεωρηθεί σαν Ε.Σ..

Άσκηση αυτοαξιολόγησης 1.1/3: Στη σελίδα 5 είδαμε μερικές εφαρμογές της Τ.Ν.. Σε ποιές από αυτές μπορούν να εφαρμοστούν τα Ν.Δ. και σε ποιές οι Γ. Α.;

Απάντηση: 1. Γ.Α. 2. Ν.Δ. ή/και Γ.Α. 3. Ν.Δ. 4. Ν.Δ. 5. Ν.Δ. ή/και Γ.Α. 6. Ν.Δ.

1.2 Στοιχεία της Θεωρίας Μάθησης

Ανάμεσα στις πολλές ενδιαφέρουσες ιδιότητες ενός νευρωνικού δικτύου αυτή με τη μεγαλύτερη σπουδαιότητα είναι η ικανότητα του να μαθαίνει από το περιβάλλον του και έτσι να βελτιώνει την απόδοσή του μέσω της μάθησης. Η βελτίωση αυτή γίνεται σταδιακά, με το χρόνο, σύμφωνα με κάποιο καθορισμένο μέτρο. Η μάθηση επιτυγχάνεται μέσω μιας επαναληπτικής διαδικασίας ρυθμίσεων της τιμής των συναπτικών βαρών και των κατωφλίων. Θεωρητικά, το δίκτυο αποκτά περισσότερη γνώση για το περιβάλλον του μετά από κάθε επανάληψη της διαδικασίας μάθησης.

Για να ορίσουμε μια έννοια όπως αυτή της μάθησης εξαρτάται από ποια σκοπιά θα την εξετάσουμε. Εμείς με σημείο αναφοράς τα νευρωνικά δίκτυα χρησιμοποιούμε τον ορισμό των Mendel και McClaren (1970) [1]:

Μάθηση είναι μια διαδικασία με την οποία προσαρμόζονται οι ελεύθερες παράμετροι ενός νευρωνικού δικτύου μέσω μίας συνεχούς διαδικασίας διέγερσης από το περιβάλλον στο οποίο βρίσκεται το δίκτυο. Το είδος της μάθησης καθορίζεται από τον τρόπο με τον οποίο πραγματοποιούνται οι αλλαγές των παραμέτρων.

Ο παραπάνω ορισμός της διαδικασίας μάθησης υπονοεί την ακόλουθη σειρά βημάτων:

1. Το νευρωνικό δίκτυο "διεγείρεται" από ένα περιβάλλον.
2. Το νευρωνικό δίκτυο υφίσταται αλλαγές σαν συνέπεια αυτής της διέγερσης.
3. Το νευρωνικό δίκτυο "απαντά" με ένα καινούργιο τρόπο στο περιβάλλον, λόγω των αλλαγών που συνέβησαν στην εσωτερική του δομή.

Πιο συγκεκριμένα ας αναλύσουμε την παραπάνω περιγραφή με ένα παράδειγμα.

Θεωρούμε ένα ζεύγος κομβικά σήματα x_j και u_k που συνδέονται με βάρος σύνδεσης w_{kj} όπως απεικονίζεται στο σχήμα 1. Το x_j αναπαριστά την έξοδο του νευρώνα j , ενώ το u_k την εσωτερική λειτουργία του νευρώνα k . Με βάση το βάρος σύνδεσης w_{kj} , τα σήματα x_j και u_k αναφέρονται συχνά σαν προσυναπτική και μετασυναπτική λειτουργία αντίστοιχα. Ας συμβολίσουμε με $w_{kj}(n)$ την τιμή του βάρους σύνδεσης w_{kj} την χρονική στιγμή n . Τη χρονική αυτή στιγμή γίνεται μια ρύθμιση (διόρθωση) $\Delta W_{kj}(n)$ στο βάρος $w_{kj}(n)$ και παράγεται η νέα ενημερωμένη τιμή $w_{kj}(n+1)$. Έτσι προκύπτει η εξίσωση :

$$w_{kj}(n+1) = w_{kj}(n) + \Delta w_{kj}(n) \quad (1.1)$$

όπου $w_{kj}(n)$ και $w_{kj}(n+1)$ η παλιά και η νέα τιμή του βάρους σύνδεσης w_{kj} , αντίστοιχα. Η εξίσωση (1.1) συγκεντρώνει την συνολική επίδραση των βημάτων 1 και 2 που προκύπτουν από τον ορισμό της διαδικασίας μάθησης και αναφέρθηκαν παραπάνω. Πιο συγκεκριμένα η ρύθμιση $\Delta W_{kj}(n)$ υπολογίζεται σαν αποτέλεσμα της διέγερσης από το περιβάλλον (βήμα 1) και η ενημερωμένη τιμή $w_{kj}(n+1)$ εκφράζει την αλλαγή που συνέβη στο δίκτυο σαν αποτέλεσμα αυτής της διέγερσης (βήμα 2). Το βήμα 3 πραγματοποιείται όταν υπολογίζεται η απάντηση του νέου δικτύου που λειτουργεί με το ενημερωμένο σύνολο παραμέτρων $\{w_{kj}(n+1)\}$.

Ένα καθορισμένο σύνολο από καλά ορισμένους κανόνες για τη λύση ενός προβλήματος μάθησης καλείται αλγόριθμος μάθησης (learning algorithm). Όπως είναι φανερό, δεν υπάρχει ένας μοναδικός τέτοιος αλγόριθμος για το σχεδιασμό νευρωνικών δικτύων. Αντίθετα, υπάρχει ένα σύνολο από εργαλεία που αναπαρίστανται από μια μεγάλη ποικιλία αλγορίθμων μάθησης, καθένας από τους οποίους έχει τα δικά του πλεονεκτήματα. Βασικά, οι αλγόριθμοι διαφέρουν μεταξύ τους στον τρόπο που εκφράζεται η ρύθμιση Δw_{kj} στο βάρος σύνδεσης w_{kj} . Ένας ακόμη παράγοντας που πρέπει να εξετάσουμε είναι ο τρόπος που το νευρωνικό δίκτυο σχετίζεται με το περιβάλλον. Στη συνέχεια όταν αναφερόμαστε σε ένα παράδειγμα μάθησης (learning paradigm) θα εννοούμε το μοντέλο του περιβάλλοντος στο οποίο λειτουργεί το δίκτυο.

Άσκηση Αυτοαξιολόγησης 1.2/4: Μάθηση είναι η διαδικασία:

- A. κατά την οποία το Ν.Δ. ‘απαντά’ με ένα καινούργιο τρόπο στο περιβάλλον, λόγω των αλλαγών που συνέβησαν στην εσωτερική του δομή.
- B. κατά την οποία προσαρμόζονται οι ελεύθερες παράμετροι του δικτύου.
- C. κατά την οποία το Ν.Δ. υφίσταται αλλαγές σαν συνέπεια μιας εξωτερικής διέγερσης.

Να επιλέξετε τη σωστή απάντηση.

Απάντηση: Σύμφωνα με τον ορισμό που δόθηκε στη σελίδα 9, σωστή απάντηση είναι η B.

Άσκηση Αυτοαξιολόγησης 1.2/5: Αν η ρύθμιση που υπολογίστηκε για το βάρος $w_{kj}(n)$ είναι αρνητική, τι επίδραση θα έχει αυτό στη νέα τιμή του βάρους;

Απάντηση: Από τη σχέση (1) προκύπτει αμέσως ότι η νέα τιμή του βάρους είναι μικρότερη σε σχέση με την προηγούμενη.

Δραστηριότητα 1/1: Στο δεύτερο κεφάλαιο της αναφοράς [1] γίνεται μία ολοκληρωμένη παρουσίαση της θεωρίας της μάθησης. Εκεί θα δείτε ότι αναφέρονται διάφοροι κανόνες για τον υπολογισμό της ρύθμισης ΔW . Να κάνετε μία σύντομη παρουσίαση αυτών των κανόνων μάθησης, σε περίπου δύο σελίδες.

1.3 Μέθοδοι Αναζήτησης και Βελτιστοποίησης

Μετά την εισαγωγή στους Γενετικούς Αλγορίθμους, κρίνουμε σκόπιμο να κάνουμε μία πολύ σύντομη παρουσίαση των κυριότερων παραδοσιακών μεθόδων αναζήτησης και βελτιστοποίησης, για λόγους σύγκρισης. Αυτές οι μέθοδοι που παρουσίασαν αξιόλογα αποτελέσματα, όσον αφορά την εφαρμογή τους σε υπολογιστικές μηχανές και κυριάρχησαν για πολλά χρόνια είναι οι εξής:

Μέθοδοι βασισμένες στο λογισμό (calculus-based methods): Έχουν γίνει αντικείμενο ευρείας μελέτης. Χωρίζονται σε δύο βασικές κατηγορίες: τις έμμεσες και

τις άμεσες. Οι έμμεσες ασχολούνται με την εύρεση τοπικών ακρότατων επιλύοντας συνήθως ένα σύνολο μη γραμμικών συναρτήσεων. Οι άμεσες από την πλευρά τους, ψάχνουν για τοπικά ακρότατα κάνοντας μικρά άλματα στη συνάρτηση (hillclimbing). Αν και αρκετά δοκιμασμένες και οι δύο κατηγορίες παρουσιάζουν σημαντικά μειονεκτήματα. Το βασικότερο από αυτά είναι ότι εμφανίζουν τοπικότητα στην εμβέλεια. Δηλαδή το ακρότατο το οποίο βρίσκουν είναι το καλύτερο στη γειτονιά ενός σημείου.

Απαριθμητικές (enumerative) ή τυχαίες (random) μέθοδοι: Συναντώνται σε πολλές μορφές και σε διάφορα προβλήματα. Μέσα σε ένα πεπερασμένο (ή άπειρα διακριτό) χώρο αναζήτησης, αναζητούνται κάποια βέλτιστα σημεία με ψάξιμο σε ένα προς ένα σημείο. Παρ' όλο που η απλότητα εδώ είναι ελκυστική, η αποδοτικότητα είναι προφανές ότι είναι πολύ χαμηλή κάτι που δεν τις κάνει ιδιαίτερα δημοφιλείς. Σχεδόν ποτέ δεν χρησιμοποιούνται μόνες τους, αλλά σε συνδυασμό με άλλες αποδοτικότερες μεθόδους.

Μέθοδοι επαναληπτικής αναζήτησης (iterated search): Πρόκειται για ένα παραγωγικό συνδυασμό των μεθόδων των δύο προηγούμενων κατηγοριών. Μόλις το hillclimbing εντοπίσει μια κορυφή (τοπικό μέγιστο ή ελάχιστο), επιλέγεται τυχαία ένα νέο σημείο και αρχίζει ξανά η ίδια διαδικασία για τον εντοπισμό μιας νέας κορυφής. Αυτό γίνεται αρκετές φορές κρατώντας πάντα την καλύτερη τιμή που έχει βρεθεί. Η τεχνική αυτή έχει το πλεονέκτημα της απλότητας, δεν υπάρχει περίπτωση παγίδευσης, αλλά όταν τα τοπικά μέγιστα είναι πολλά η απόδοσή της πέφτει σημαντικά.

Προσομοιωμένη Ανόπτηση (Simulated Annealing): Αποτελεί μια τροποποιημένη έκδοση του hillclimbing. Τα μειονεκτήματά του είναι ότι ασχολείται με μόνο μια λύση σε κάθε βήμα, ενώ δεν κάνει αξιοποίηση της πληροφορίας που έχει υποστεί επεξεργασία σε προηγούμενα στάδια, μη αποκτώντας έτσι μια γενική εικόνα του χώρου αναζήτησης.

Δυναμικός προγραμματισμός (Dynamic Programming): Αποτελεί προγραμματιστική τεχνική που βρίσκει εφαρμογή σε περιορισμένη περιοχή προβλημάτων. Χρησιμοποιείται κυρίως για τη βελτιστοποίηση της λύσης ενός προβλήματος πολλαπλών φάσεων, για κάθε μία από τις οποίες είναι διαθέσιμος ένας αριθμός εναλλακτικών αποφάσεων. Είναι αυτονόητο ότι δεν αποτελεί ισχυρό

εργαλείο βελτιστοποίησης λόγω της υπερβολικής εξειδίκευσης για μικρό εύρος προβλημάτων.

Ευρετικές μέθοδοι (heuristic methods): Ευρετική ονομάζεται κάθε μη αλγοριθμική μέθοδος επίλυσης προβλημάτων, στην οποία η πορεία προς ένα τελικό αποδεκτό αποτέλεσμα στηρίζεται σε μια σειρά προσεγγιστικών αποτελεσμάτων. Αν και οι ευρετικές μέθοδοι δίνουν απλές και ικανοποιητικές λύσεις σε μερικά προβλήματα, τίποτα δεν εγγυάται ότι αυτές οι λύσεις είναι οι καλύτερες δυνατές. Συνήθως δίνουν προσεγγίσεις των βέλτιστων λύσεων και κάποιες φορές προτιμούνται επειδή δίνουν αποδεκτές απαντήσεις σε μικρό χρόνο. Συνεπώς δεν μπορούν να αποτελέσουν κύριο εργαλείο βελτιστοποίησης.

Αν και δεν έχουν εξεταστεί εξαντλητικά όλες οι μέθοδοι αναζήτησης, το συμπέρασμα που προκύπτει από αυτή τη σύντομη παρουσίαση είναι πως οι μέθοδοι αυτές δεν έχουν την ισχύ για να αντεπεξέλθουν σε μεγάλο αριθμό προβλημάτων. Αυτό όμως, δεν σημαίνει ότι είναι άχρηστες. Αντιθέτως, έχουν δώσει λύσεις σε πολλές περιπτώσεις μέχρι σήμερα. Καθώς, όμως, παρουσιάζονται ολοένα και δυσκολότερα προβλήματα, τόσο πιο επιτακτική γίνεται η ανάγκη για εύρεση νέων μεθόδων αναζήτησης και βελτιστοποίησης. Μια τέτοια κατηγορία αλγορίθμων, που βασίζονται σε αναλογίες με τις φυσικές διαδικασίες της εξέλιξης, είναι οι Γενετικοί Αλγόριθμοι που παρουσιάζονται στο πέμπτο κεφάλαιο.

Άσκηση Αυτοαξιολόγησης 1.3/6: Ποίο είναι το βασικό μειονέκτημα των κλασικών μεθόδων αναζήτησης;

1. έχουν μεγάλη πολυπλοκότητα,
2. κάνουν τυχαίο ψάξιμο,
3. κάνουν αναζήτηση σε ένα μόνο σημείο σε κάθε βήμα,
4. δεν αξιοποιούν την πληροφορία που παρέχει το περιβάλλον,
5. είναι τοπικής εμβέλειας.

Να επιλέξετε τη(ις) σωστή(ές) απάντηση(εις).

Απάντηση: Τα βασικά μειονεκτήματα των κλασικών μεθόδων είναι τα 3 και 4.

1.4 Εφαρμογές των Ν.Α.

Η ευρεία εφαρμογή των νευρωνικών δικτύων σε μία ποικιλία προβλημάτων, σε πολλά διαφορετικά πεδία, τα κάνει πολύ ελκυστικά. Επίσης, οι πιο γρήγοροι υπολογιστές και αλγόριθμοι έχουν κάνει δυνατή την χρήση νευρωνικών δικτύων στην επίλυση πολύπλοκων βιομηχανικών προβλημάτων, τα οποία απαιτούσαν πάρα πολλούς υπολογισμούς. Από την πρώτη τους εφαρμογή σε προσαρμοζόμενους εξισωτές καναλιών το 1984 μέχρι σήμερα έχουν εφαρμοστεί σε μεγάλη ποικιλία εφαρμογών όπως φαίνεται παρακάτω [2]:

Αεροπορία: Υψηλής απόδοσης αυτόματοι πιλότοι αεροπλάνων, προσομοιωτές πτήσης, συστήματα αυτομάτου ελέγχου αεροπλάνων, συστήματα ανίχνευσης βλαβών.

Αυτοκίνηση: Αυτοκινούμενα συστήματα αυτόματης πλοήγησης.

Τραπεζικές εφαρμογές: Αναγνώστες επιταγών και άλλων παραστατικών, συστήματα αξιολόγησης αιτήσεων δανειοδότησης .

Άμυνα: Πλοήγηση όπλων, ανίχνευση στόχων, νέα είδη αισθητήρων, σόναρ, ραντάρ, ψηφιακή επεξεργασία σημάτων, συμπίεση δεδομένων, εξαγωγή χαρακτηριστικών, αναγνώριση σήματος / εικόνας.

Ηλεκτρονική: Πρόβλεψη ακολουθίας κωδικών, μορφοποίηση ολοκληρωμένων κυκλωμάτων, έλεγχος διεργασιών, διάγνωση βλαβών ολοκληρωμένων κυκλωμάτων, μηχανική όραση, σύνθεση φωνής.

Οικονομία: Οικονομική ανάλυση, πρόβλεψη τιμών συναλλάγματος.

Κοινωνική ασφάλιση: Αξιολόγηση εφαρμοζόμενης πολιτικής, βελτιστοποίηση παραγωγής.

Βιομηχανία: Βιομηχανικός έλεγχος διεργασιών, ανάλυση και σχεδίαση προϊόντων, συστήματα ποιοτικού ελέγχου, διάγνωση βλαβών διεργασιών και μηχανών, ανάλυση σχεδιασμού χημικών προϊόντων, δυναμικό μοντελάρισμα συστημάτων χημικών διεργασιών, σχεδιασμός και διοίκηση.

Ιατρική: Ανάλυση καρκινικών κυττάρων, ανάλυση Ηλεκτροεγκεφαλογραφήματος και Ηλεκτροκαρδιογραφήματος, βελτιστοποίηση χρόνου νοσηλείας, μείωση νοσοκομειακού κόστους, βελτίωση ποιότητας νοσοκομείων.

Γεωλογικές έρευνες: Εντοπισμός πετρελαίου και φυσικού αερίου.

Ρομποτική: Έλεγχος τροχιάς και σύστημα όρασης ρομπότ.

Επεξεργασία φωνής: Αναγνώριση φωνής, συμπίεση φωνής, σύνθεση φωνής από κείμενο.

Χρηματιστηριακές εφαρμογές: Ανάλυση αγοράς, πρόβλεψη τιμών μετοχών.

Τηλεπικοινωνίες: Συμπύεση εικόνας και δεδομένων, αυτοματοποιημένες υπηρεσίες πληροφοριών, μετάφραση πραγματικού χρόνου, συστήματα επεξεργασίας πληρωμών.

Μεταφορές: Συστήματα διάγνωσης βλαβών φρένων, χρονοπρογραμματισμός οχημάτων, συστήματα δρομολόγησης.

Από το παραπάνω πλήθος εφαρμογών, μπορούμε να συμπεράνουμε ότι τα νευρωνικά δίκτυα έχουν αναπτυχθεί ταχύτατα. Γι' αυτό το λόγο έχουν επενδυθεί πολλά χρήματα τόσο για την ανάπτυξη λογισμικού όσο και για την ανάπτυξη υλικού.

1.5 Η Έμπνευση από τα Βιολογικά Συστήματα

1.5.1 Από τα Βιολογικά Νευρωνικά Δίκτυα στα Τεχνητά

Η μελέτη των τεχνητών νευρωνικών δικτύων, κοινώς γνωστά σαν 'νευρωνικά δίκτυα' υποκινήθηκε άμεσα από την αναγνώριση ότι οι εγκεφαλικοί υπολογιστές είναι ένα εξ' ολοκλήρου διαφορετικός δρόμος από τους συμβατικούς ψηφιακούς υπολογιστές. Τυπικά οι νευρώνες του εγκεφάλου είναι 5-6 τάξεις μεγέθους αργότεροι από τις λογικές πύλες σιλικόνης. Ο εγκέφαλος είναι ένας πολύ πολύπλοκος, μη-γραμμικός και παράλληλος υπολογιστής. Έχει τη δυνατότητα να οργανώνει τους νευρώνες έτσι ώστε να εκτελεί συγκεκριμένους υπολογισμούς πολύ πιο γρήγορα από τους πιο γρήγορους ψηφιακούς υπολογιστές που υπάρχουν.

Πώς τα καταφέρνει όμως ο εγκέφαλος; Κατά τη γέννησή του ο εγκέφαλος έχει την ικανότητα να κατασκευάζει τους δικούς του κανόνες, κοινώς "εμπειρία", η οποία μεγαλώνει με την πάροδο του χρόνου. Κατά τα 2 πρώτα χρόνια ζωής, έχουμε τη μέγιστη ανάπτυξη, όπου περίπου 1 εκατομμύριο συνάψεις (synapses) δημιουργούνται στο δευτερόλεπτο.

Οι συνάψεις είναι οι βασικές δομικές και λειτουργικές μονάδες που μεσολαβούν στην ενδοεπικοινωνία των νευρώνων, όπως φαίνεται στο σχήμα 1 που δείχνει τη βασική δομή ενός νευρώνα [1]. Άρα:

Ένα νευρωνικό δίκτυο είναι ένας συμπαγής παράλληλος κατανεμημένος επεξεργαστής, που έχει τη φυσική κλίση να αποθηκεύει εμπειριστατωμένη γνώση και να την κάνει διαθέσιμη για χρήση.

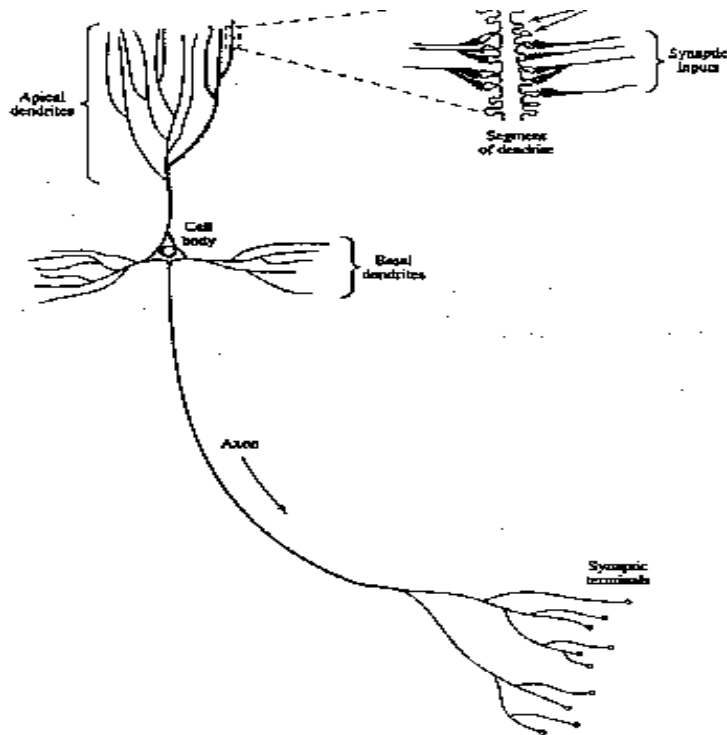


FIGURE 1.1 The pyramidal cell.

Ένα Τ.Ν.Δ. μοιάζει με τον εγκέφαλο στα εξής:

- Η γνώση αποκτάται από το δίκτυο μέσα από διαδικασία μάθησης.
- Οι δυνάμεις σύνδεσης των νευρώνων, γνωστές σαν συναπτικά (synaptic) βάρη, χρησιμοποιούνται για την αποθήκευση γνώσης.

Η διαδικασία για την εκμάθηση ονομάζεται “αλγόριθμος μάθησης”. Ο καθορισμός του τρόπου μεταβολής των συναπτικών (synaptic) βαρών, αποτελεί την παραδοσιακή μέθοδο για το σχεδιασμό των νευρωνικών δικτύων.

1.5.2 Πλεονεκτήματα των Νευρωνικών Δικτύων

Η συμπαγής παράλληλα κατανομημένη δομή και η ικανότητα μάθησης των νευρωνικών δικτύων, κάνουν δυνατή την επίλυση πολύπλοκων προβλημάτων, τα οποία σπάνε σε μικρότερα έργα, που αναλαμβάνουν τα νευρωνικά δίκτυα ανάλογα με τις δυνατότητές τους.

Η χρήση των Νευρωνικών Δικτύων παρέχει τις ακόλουθες χρήσιμες ιδιότητες :

1. **Μη-γραμμικότητα.** Αυτή οφείλεται στο γεγονός ότι ένα Νευρωνικό Δίκτυο δομείται από τη σύνδεση νευρώνων, οι οποίοι είναι μη-γραμμικές συσκευές. Η μη-γραμμικότητα είναι πολύ σημαντική ιδιότητα, ιδιαίτερα αν ο φυσικός μηχανισμός για την παραγωγή των σημάτων εισόδου είναι μη-γραμμικός.

2. **Σχεδιασμός Εισόδου-Εξόδου.** Ένα συνηθισμένο παράδειγμα μάθησης που καλείται επιβλεπόμενη μάθηση, εμπλέκει μεταβολή των synaptic βαρών του Νευρωνικού Δικτύου, εφαρμόζοντας ένα σύνολο δειγμάτων εξάσκησης ή παραδείγματα έργων. Κάθε παράδειγμα αποτελείται από ένα μοναδικό σήμα εισόδου και την επιθυμητή απόκριση. Η εξάσκηση του δικτύου επαναλαμβάνεται για πολλά παραδείγματα, μέχρι το δίκτυο να φτάσει σε μια σταθερή κατάσταση, όπου πλέον δεν γίνονται αλλαγές στα βάρη. Έτσι το δίκτυο μαθαίνει από τα παραδείγματα, κατασκευάζοντας ένα σχεδιασμό εισόδου-εξόδου για το πρόβλημα στο χέρι.

3. **Προσαρμοστικότητα.** Τα Νευρωνικά Δίκτυα έχουν τη δυνατότητα να προσαρμόζουν τα βάρη τους στις αλλαγές του περιβάλλοντός τους. Μερικές φορές οι προσαρμογές οδηγούν σε μείωση της απόδοσης του συστήματος, γι'αυτό θα πρέπει να είναι επαρκείς δίλημμα σταθερότητας-πλαστικότητας.

4. **Αποδεικτική Απόκριση.** Ένα Νευρωνικό Δίκτυο σχεδιάζεται για να παρέχει πληροφορίες όχι μόνο για το συγκεκριμένο υπόδειγμα που επιλέγεται αλλά και για την εμπιστοσύνη στην απόφαση που παίρνεται. Αυτό βελτιώνει την απόδοση του συστήματος.

5. **Συναφής Πληροφορία.** Η γνώση αναπαριστάνεται από την πολύ δομημένη και ενεργή κατάσταση του Νευρωνικού Δικτύου.

6. **Αντοχή σε σφάλματα.** Ένα νευρωνικό δίκτυο, υλοποιημένο σε υλικό (hardware) έχει τη σημαντική ιδιότητα να είναι “ανεκτικό σε σφάλματα”, με την έννοια ότι η απόδοσή του μειώνεται κάτω από αντίξοες λειτουργικές συνθήκες.

7. **Υλοποιησιμότητα σε VLSI.** Η συμπαγής παράλληλη φύση του Νευρωνικού Δικτύου, κάνει δυνατή την υλοποίηση του σε VLSI τεχνολογία, έτσι ώστε τα

νευρωνικά δίκτυα να μπορούν να χρησιμοποιηθούν σε εφαρμογές πραγματικού χρόνου.

8. Ομοιομορφία Ανάλυσης και Σχεδιασμού. Η έννοια είναι ότι ο ίδιος συμβολισμός χρησιμοποιείται σε όλα τα πεδία που περιέχουν εφαρμογή των νευρωνικών δικτύων. Αυτό το χαρακτηριστικό υποδηλώνεται με διαφορετικούς τρόπους :

Οι νευρώνες παριστάνουν ένα συστατικό συνηθισμένο σε όλα τα νευρωνικά δίκτυα.

Αυτή η ιδιότητα κάνει δυνατό το διαμοιρασμό θεωριών και αλγορίθμων εκμάθησης σε διαφορετικές εφαρμογές των νευρωνικών δικτύων. Ρυθμιστικά (αναδρομικά) δίκτυα μπορούν να κατασκευαστούν μέσω μιας αμιγούς ολοκλήρωσης από modules.

9.Αναλογία με Νευροβιολογία. Ο σχεδιασμός νευρωνικών δικτύων γίνεται σε αναλογία με τον εγκέφαλο. Οι νευροβιολόγοι βλέπουν τα νευρωνικά δίκτυα σαν αντικείμενο έρευνας για την εξήγηση νευροβιολογικών φαινομένων. Ομοίως οι μηχανικοί βλέπουν στη νευροβιολογία για νέες ιδέες για την επίλυση πολύπλοκων προβλημάτων.

1.5.3 Η θεωρία της Εξέλιξης των Ειδών

Η θεωρία της *Εξέλιξης των Ειδών (Evolution of Species)* που αναπτύχθηκε από τον Δαρβίνο στα μέσα του περασμένου αιώνα, προκάλεσε μεγάλη αναστάτωση, αφού ερχόταν σε σύγκρουση με τις επικρατούσες θρησκευτικές αντιλήψεις περί προέλευσης της ζωής. Με την πάροδο ενός και πλέον αιώνα, ο θόρυβος αυτός δεν έχει κοπάσει πλήρως, όμως η θεωρία έχει γίνει αποδεκτή από το σύνολο των επιστημόνων, γιατί κατόρθωσε να πείσει και να δώσει ικανοποιητικές απαντήσεις σε θεμελιώδη ερωτήματα. Σκοπός της θεωρίας αυτής είναι να δώσει μια εξήγηση για το φαινόμενο της ζωής, την προέλευσή της και τις βασικές λειτουργίες της. Τα κυριότερά της σημεία που σχετίζονται και ερμηνεύουν τον τρόπο λειτουργίας των Γενετικών Αλγορίθμων είναι τα εξής:

Δεν υπάρχει αντικειμενική βάση διαχωρισμού των ζωντανών οργανισμών σε ανώτερους και κατώτερους. Σε κάθε βιολογικό είδος, μερικά άτομα αφήνουν περισσότερους απογόνους σε σύγκριση με τα υπόλοιπα και έτσι τα κληροδοτούμενα χαρακτηριστικά των αναπαραγωγικά επιτυχημένων ατόμων γίνονται περισσότερα στην επόμενη γενιά. Οι δυσκολίες, τα εμπόδια και οι αντιξοότητες που

παρουσιάζονται κατά τη διάρκεια της ζωής των οργανισμών είναι οι παράγοντες που καθορίζουν ποιοι από αυτούς θα κατορθώσουν να ζήσουν και να πολλαπλασιαστούν. Έτσι, με την αλλαγή του περιβάλλοντος και των συνθηκών διαβίωσης, αλλάζουν και τα χαρακτηριστικά τους προσπαθώντας να προσαρμοστούν κάθε φορά, με στόχο την εξασφάλιση της επιβιώσής τους.

Αυτή η αλλαγή, όμως, που συμβαίνει στα χαρακτηριστικά των ατόμων είναι αλλαγή στα *χρωμοσώματά* τους (*chromosomes*), που είναι πολύπλοκα οργανικά μόρια που κωδικοποιούν τη δομή και τα χαρακτηριστικά τους. Τα χρωμοσώματα αποτελούνται από μικρότερα μέρη, γνωστά ως *γονίδια* (*genes*). Το σύνολο της γενετικής πληροφορίας που είναι κωδικοποιημένο στα γονίδια ονομάζεται *γονότυπος* (*genotype*). Η δημιουργία ενός νέου οργανισμού περιλαμβάνει την αποκωδικοποίηση των χρωμοσωμάτων. Το σύνολο των "ορατών" χαρακτηριστικών του και της συμπεριφοράς του, που καθορίζονται από τις πληροφορίες των γονιδίων, συνιστούν το *φαινότυπο* (*phenotype*).

Κυρίαρχες λειτουργίες του φαινομένου της εξέλιξης είναι η *αναπαραγωγή* (*reproduction*) και η *μετάλλαξη* (*mutation*). Κατά τη μετάλλαξη γίνεται με τυχαίο τρόπο η αλλαγή της δομής των χρωμοσωμάτων, συνήθως από λανθασμένη αντιγραφή βιολογικών μορίων ή από εξωγενείς παράγοντες (π.χ. ακτινοβολία), έχοντας ως άμεσο αποτέλεσμα αλλαγή σε κάποιο χαρακτηριστικό. Η μετάλλαξη, μερικές φορές, μπορεί να προκαλέσει βελτιώσεις και, χωρίς αμφιβολία, μερικά λάθη που έγιναν αποτέλεσαν σημαντικό παράγοντα για την προοδευτική εξέλιξη της ζωής.

Προϊόν της αναπαραγωγής είναι ένας νέος οργανισμός, τα χρωμοσώματα του οποίου αποτελούνται από γονίδια που προέρχονται τα μισά από τον πατέρα και τα μισά από την μητέρα. Έτσι, για κάθε χαρακτηριστικό, το νέο άτομο έχει πάρει ένα γονίδιο από κάθε γονέα. Μερικές φορές, τα δύο αυτά γονίδια συμφωνούν μεταξύ τους, όσον αφορά την "τιμή" που θα δώσουν στο χαρακτηριστικό, π.χ. γαλάζιο χρώμα ματιών, ενώ άλλες φορές δεν συμφωνούν, π.χ. το ένα υποδεικνύει καστανό χρώμα ματιών και το άλλο γαλάζιο. Στη δεύτερη περίπτωση, κυριαρχεί η "τιμή" ενός γονιδίου (π.χ. του καστανού), και αγνοείται η "τιμή" του άλλου, μολονότι το δεύτερο μπορεί να περάσει σε επόμενες γενιές. Το γονίδιο που τελικά καθορίζει το χαρακτηριστικό λέγεται *κυρίαρχο* ή *επικρατές* (*dominant*) και το άλλο *υπολειπόμενο* (*recessive*). Γονίδια που

διεκδικούν την ίδια θέση σε ένα χρωμόσωμα (δηλαδή που είναι υπεύθυνα για το ίδιο χαρακτηριστικό), λέγονται *αλληλόμορφα (alleles)*.

Όλος αυτός ο μηχανισμός της φυσικής επιλογής φάνηκε ιδιαίτερα ελκυστικός για τον John Holland, πρωτοπόρο των Γενετικών Αλγορίθμων, στις αρχές της δεκαετίας του '70 [3]. Ο Holland φαντάστηκε ότι κάποιες ιδέες και λειτουργίες που εφαρμόζει η φύση στα συστήματά της θα μπορούσαν να έχουν αποτελέσματα, αν ενσωματώνονταν σε αλγόριθμους για υπολογιστές, ώστε να προκύψουν αποδοτικές τεχνικές επίλυσης δύσκολων προβλημάτων. Αποτέλεσμα αυτής της εργασίας του Holland ήταν οι Γενετικοί Αλγόριθμοι, μια καινούργια εξελισσόμενη και πολλά υποσχόμενη τεχνική αναζήτησης και βελτιστοποίησης.

Η βασική ιδέα που κρύβεται πίσω από τους Γενετικούς Αλγόριθμους (Γ.Α.) είναι η μίμηση των μηχανισμών της φύσης. Ας πάρουμε, για παράδειγμα, τους λαγούς και πώς αναπαράγονται και εξελίσσονται από γενιά σε γενιά. Έστω ότι αρχίζουμε να παρατηρούμε ένα συγκεκριμένο πληθυσμό από λαγούς. Όπως είναι φυσικό, κάποιοι από αυτούς θα είναι πιο γρήγοροι και πιο εύστροφοι από τους άλλους. Αυτοί οι γρηγορότεροι και εξυπνότεροι λαγοί έχουν λιγότερες πιθανότητες να αποτελέσουν γεύμα κάποιας αλεπούς και, άρα από τη στιγμή που καταφέρνουν να επιβιώσουν θα ασχοληθούν με την αναπαραγωγή του είδους τους. Φυσικά, θα υπάρχει και ένας μικρός αριθμός αργών και λιγότερο εύστροφων λαγών που θα καταφέρουν να επιβιώσουν μόνο και μόνο επειδή στάθηκαν τυχεροί. Όλοι αυτοί οι λαγοί που έχουν καταφέρει να επιβιώσουν θα αρχίσουν την παραγωγή της επόμενης γενιάς τους, μια γενιά που θα συνδυάζει όλα τα χαρακτηριστικά των μελών της προηγούμενης, συνδυασμένα με διάφορους τρόπους μεταξύ τους. Έτσι, μερικοί αργοί λαγοί θα αναμειχθούν με κάποιους γρήγορους, κάποιοι γρήγοροι με άλλους γρήγορους, κάποιοι εύστροφοι λαγοί με κάποιους μη εύστροφους και ούτω καθεξής. Οι μικροί λαγοί της επόμενης γενιάς θα είναι, κατά μέσο όρο, γρηγορότεροι και εξυπνότεροι από τους προγόνους τους, αφού από την προηγούμενη γενιά επιβίωσαν περισσότεροι γρήγοροι και έξυπνοι λαγοί. Ευτυχώς, για την διατήρηση της φυσικής ισορροπίας, και οι αλεπούδες υφίστανται την ίδια διαδικασία αναπαραγωγής, διαφορετικά οι λαγοί θα γινόντουσαν υπερβολικά γρήγοροι και έξυπνοι για να μπορούν να τους πιάσουν.

1.5.4 Πλεονεκτήματα Γ.Α.

Η χρήση των Γ.Α. σε διάφορες εφαρμογές είναι ελκυστική για αρκετούς λόγους. Οι

κυριότεροι, ίσως, είναι οι εξής :

- 1) **Μπορούν να λύσουν δύσκολα προβλήματα γρήγορα και αξιόπιστα.** Ένας από τους σημαντικούς λόγους χρήσης των Γ.Α. είναι η μεγάλη τους αποδοτικότητα. Τόσο η θεωρία, όσο και η πράξη έχουν δείξει ότι προβλήματα που έχουν πολλές, δύσκολα προσδιορισμένες λύσεις μπορούν να αντιμετωπιστούν καλύτερα από Γ.Α.. Είναι δε αξιοσημείωτο ότι συναρτήσεις που παρουσιάζουν μεγάλες διακυμάνσεις και καθιστούν ανεπαρκείς άλλες μεθόδους στην εύρεση των ακρότατων τους, για τους Γ.Α. αυτές οι διακυμάνσεις δεν αποτελούν σημεία δυσχέρειας.
- 2) **Μπορούν εύκολα να συνεργαστούν με τα υπάρχοντα μοντέλα και συστήματα.** Οι Γ.Α. προσφέρουν το σημαντικό πλεονέκτημα της χρήσης τους με προσθετικό τρόπο στα μοντέλα που χρησιμοποιούνται σήμερα, μη απαιτώντας την επανασχεδιάσή τους. Μπορούν εύκολα να συνεργαστούν με τον υπάρχοντα κώδικα, χωρίς μεγάλο κόπο. Αυτό συμβαίνει, διότι χρησιμοποιούν μόνο πληροφορίες της διαδικασίας ή συνάρτησης που πρόκειται να βελτιστοποιήσουν, δίχως να ενδιαφέρει άμεσα ο ρόλος της μέσα στο σύστημα ή η όλη δομή του συστήματος.
- 3) **Είναι εύκολα επεκτάσιμοι και εξελίξιμοι.** Όπως θα γίνει σαφές στα επόμενα κεφάλαια, οι Γ.Α. δεν αντιστέκονται σε αλλαγές, επεκτάσεις και μετεξελίξεις, ανάλογα με την κρίση του σχεδιαστή. Σε πολλές εφαρμογές, έχουν αναφερθεί λειτουργίες των Γ.Α. που δεν είναι δανεισμένες από τη φύση ή που έχουν υποστεί σημαντικές αλλαγές, πάντα προς όφελος της απόδοσης. Παραλλαγές στο βασικό σχήμα δεν είναι απλά ανεκτές, αλλά σε ορισμένες περιπτώσεις επιβάλλονται.
- 4) **Μπορούν να συμμετέχουν σε υβριδικές μορφές με άλλες μεθόδους.** Αν και η ισχύς των Γ.Α. είναι μεγάλη, σε μερικές ειδικές περιπτώσεις προβλημάτων, όπου άλλες μέθοδοι συμβαίνει να έχουν πολύ υψηλή αποδοτικότητα, λόγω εξειδίκευσης, υπάρχει η δυνατότητα χρησιμοποίησης ενός υβριδικού σχήματος Γ.Α. με άλλη μέθοδο. Αυτό είναι αποτέλεσμα της μεγάλης ευελιξίας των Γ.Α.
- 5) **Εφαρμόζονται σε πολύ περισσότερα πεδία από κάθε άλλη μέθοδο.** Το χαρακτηριστικό που τους εξασφαλίζει αυτό το πλεονέκτημα είναι η ελευθερία επιλογής των κριτηρίων που καθορίζουν την επιλογή μέσα στο τεχνικό περιβάλλον. Έτσι, Γ.Α. μπορούν να χρησιμοποιηθούν στην οικονομία, στο

σχεδιασμό μηχανών, στην επίλυση μαθηματικών εξισώσεων, στην εκπαίδευση Νευρωνικών Δικτύων και σε πολλούς άλλους τομείς.

- 6) **Δεν απαιτούν περιορισμούς στις συναρτήσεις που επεξεργάζονται.** Ο κύριος λόγος που καθιστά τις παραδοσιακές μεθόδους δύσκαμπτες και ακατάλληλες για πολλά προβλήματα είναι η απαίτησή τους για ύπαρξη περιορισμών, όπως ύπαρξη παραγώγων, συνέχεια, όχι "θορυβώδεις" συναρτήσεις κ.λπ. Τέτοιου είδους ιδιότητες είναι αδιάφορες για τους Γ.Α. πράγμα που τους κάνει κατάλληλους για μεγάλο φάσμα προβλημάτων.
- 7) **Δεν ενδιαφέρει η σημασία της υπό εξέταση πληροφορίας.** Η μόνη "επικοινωνία" του Γ.Α. με το περιβάλλον του είναι η αντικειμενική συνάρτηση. Αυτό εγγυάται την επιτυχία του ανεξάρτητα από την σημασία του προβλήματος. Βέβαια, δεν σημαίνει ότι δεν υπάρχουν άλυτα προβλήματα για τους Γ.Α. Όπου, όμως, δεν τα καταφέρνουν, η αιτία είναι η φύση του χώρου που ερευνούν και όχι το πληροφοριακό περιεχόμενο του προβλήματος.
- 8) **Έχουν από τη φύση τους το στοιχείο του παραλληλισμού.** Οι Γ.Α. σε κάθε τους βήμα επεξεργάζονται μεγάλες ποσότητες πληροφορίας, αφού κάθε άτομο θεωρείται αντιπρόσωπος πολλών άλλων. Έχει υπολογιστεί ότι η αναλογία αυτή είναι της τάξεως $O(n^3)$, δηλαδή 10 άτομα αντιπροσωπεύουν περίπου 1000. Είναι, λοιπόν, προφανές ότι μπορούν να καλύψουν με αποδοτικό ψάξιμο μεγάλους χώρους σε μικρούς χρόνους.
- 9) **Είναι η μόνη μέθοδος που κάνει ταυτόχρονα εξερεύνηση του χώρου αναζήτησης και εκμετάλλευση της ήδη επεξεργασμένης πληροφορίας.** Ο συνδυασμός αυτός σπάνια συναντάται σε οποιαδήποτε άλλη μέθοδο. Με το τυχαίο ψάξιμο γίνεται καλή εξερεύνηση του χώρου, αλλά δεν γίνεται εκμετάλλευση της πληροφορίας. Αντίθετα, με την αναζήτηση με μικρά άλματα στη συνάρτηση (hillclimbing) γίνεται καλή εκμετάλλευση της πληροφορίας, αλλά όχι καλή εξερεύνηση. Συνήθως τα δύο αυτά χαρακτηριστικά είναι ανταγωνιστικά και το επιθυμητό είναι να συνυπάρχουν και τα δύο προς όφελος της όλης διαδικασίας. Οι Γ.Α. επιτυγχάνουν το βέλτιστο συνδυασμό εξερεύνησης και εκμετάλλευσης, πράγμα που τους κάνει ιδιαίτερα αποδοτικούς και ελκυστικούς.
- 10) **Επιδέχονται παράλληλη υλοποίηση.** Οι Γ.Α. μπορούν να εκμεταλλευτούν τα πλεονεκτήματα των παράλληλων μηχανών, αφού λόγω της φύσης τους, εύκολα

μπορούν να δεχτούν παράλληλη υλοποίηση. Το χαρακτηριστικό αυτό αυξάνει ακόμη περισσότερο την απόδοσή τους, ενώ σπάνια συναντάται σε ανταγωνιστικές μεθόδους.

Άσκηση Αυτοαξιολόγησης 1.5/7: Να αναφέρετε τις ομοιότητες μεταξύ νευρωνικών δικτύων και ανθρώπινου εγκέφαλου.

Απάντηση: Η απάντηση βρίσκεται στο τέλος της υποενότητας 1.5.1.

Άσκηση Αυτοαξιολόγησης 1.5/8: Ποία είναι τα πλεονεκτήματα των Ν.Δ.;

Απάντηση: Η απάντηση βρίσκεται στην υποενότητα 1.5.4.

Άσκηση Αυτοαξιολόγησης 1.5/9: Που οφείλεται η μη-γραμμικότητα των νευρωνικών δικτύων;

1. στην παράλληλη κατανομημένη δομή του,
2. στη δυνατότητα να προσαρμόζουν τα βάρη τους στις αλλαγές του περιβάλλοντός τους
3. στο γεγονός ότι ένα Ν.Δ. δομείται από νευρώνες οι οποίοι είναι μη-γραμμικές συσκευές,
4. στα συναπτικά βάρη.

Να επιλέξετε τη σωστή απάντηση.

Απάντηση: Η σωστή απάντηση είναι η 3.

Άσκηση αυτοαξιολόγησης 1.5/10: Η εφαρμογή των Γ.Α. σε μεγάλο φάσμα εφαρμογών οφείλεται:

1. στο ότι η μόνη “επικοινωνία” τους με το περιβάλλον είναι η αντικειμενική συνάρτηση.
2. στη χρησιμοποίηση μόνο πληροφοριών της συνάρτησης που πρόκειται να βελτιστοποιήσουν, δίχως να ενδιαφέρει άμεσα ο ρόλος της μέσε στο σύστημα ή η

όλη δομή του συστήματος.

3. στο ότι είναι εύκολα επεκτάσιμοι και εξελίξιμοι και μπορούν να συμμετέχουν σε υβριδικές μορφές με άλλες μεθόδους.
4. στην ελευθερία επιλογής των κριτηρίων που καθορίζουν την επιλογή μέσα στο τεχνητό περιβάλλον και η μη απαίτηση για ύπαρξη περιορισμών.
5. σε όλα τα παραπάνω.

Να επιλέξετε τη σωστή απάντηση.

Απάντηση: Η σωστή απάντηση είναι η 5.

Άσκηση αυτοαξιολόγησης 1.5/11: Ποία είναι τα κύρια στοιχεία της Θεωρίας της Εξέλιξης των Ειδών;

Απάντηση: Τα βασικά στοιχεία της θεωρίας της Εξέλιξης των Ειδών, είναι τα εξής:

- Δεν υπάρχει αντικειμενική βάση διαχωρισμού των ζωντανών οργανισμών σε ανώτερους και κατώτερους.
- Η αλλαγή που συμβαίνει στα χαρακτηριστικά των ατόμων είναι αλλαγή στα χρωμοσώματά τους (*chromosomes*), που είναι πολύπλοκα οργανικά μόρια που κωδικοποιούν τη δομή και τα χαρακτηριστικά τους.
- Κυρίαρχες λειτουργίες του φαινομένου της εξέλιξης είναι η αναπαραγωγή (*reproduction*) και η μετάλλαξη (*mutation*).
- Προϊόν της αναπαραγωγής είναι ένας νέος οργανισμός, τα χρωμοσώματα του οποίου αποτελούνται από γονίδια που προέρχονται τα μισά από τον πατέρα και τα μισά από την μητέρα.

Άσκηση αυτοαξιολόγησης 1.5/ 12: Το σύνολο των ορατών χαρακτηριστικών και της συμπεριφοράς ενός ατόμου που καθορίζονται από τις πληροφορίες των γονιδίων αποτελούν τον γονότυπο του;

Απάντηση: Όχι, αυτό που είναι ορατό στο άτομο είναι ο φαινότυπος, που αντιπροσωπεύει το σύνολο των “ορατών” χαρακτηριστικών και της συμπεριφοράς του ατόμου. Ο γονότυπος είναι το σύνολο όλης της γενετικής πληροφορίας που είναι

κωδικοποιημένη στα γονίδια του ατόμου.

Άσκηση αυτοαξιολόγησης 1.5/13: Αλληλόμορφα λέγονται τα γονίδια που προέρχονται από τον ίδιο γονέα;

Απάντηση: Όχι, αλληλόμορφα λέγονται τα γονίδια που διεκδικούν την ίδια θέση σε ένα χρωμόσωμα, δηλαδή αυτά που είναι υπεύθυνα για το ίδιο χαρακτηριστικό, π.χ. το χρώμα των ματιών.

Δραστηριότητα 1/2: Σε ένα είδος ζωντανών οργανισμών, ποίος θα ζήσει και ποίος θα πεθάνει; Να δώσετε την απάντησή σας σε μισή σελίδα περίπου.

1.6 Σύνοψη κεφαλαίου

Σε αυτό το κεφάλαιο, αφού έγινε πρώτα μία σύντομη αναφορά στις τεχνολογίες της Τεχνητής Νοημοσύνης (Τ.Ν.), ακολούθησε η εισαγωγή στα Νευρωνικά Δίκτυα (Ν.Δ.) και στους Γενετικούς Αλγορίθμους (Γ.Α.). Στόχος αυτής της ενότητας ήταν η σύνδεση των Ν.Δ. όσο και των Γ.Α. με την Τ.Ν. από την οποία προήλθαν.

Τα Ν.Δ. προσπαθούν να μιμηθούν τη λειτουργία ανθρώπινου εγκέφαλου, όσον αφορά το τρόπο μάθησης. Η παρουσίαση μερικών βασικών στοιχείων της λειτουργίας του εγκέφαλου, ήταν πολύ χρήσιμη για την κατανόηση των βασικών αρχών λειτουργίας των Ν.Δ.. Για να γίνει κατανοητή η λειτουργία ενός Γενετικού Αλγορίθμου, ήταν σκόπιμο να δοθούν ορισμένα στοιχεία από την Θεωρία της Βιολογικής Γενετικής Εξέλιξης, από την οποία δανείζονται στοιχεία οι Γενετικοί Αλγόριθμοι και στη συνέχεια είδαμε πώς στοιχεία αυτής της θεωρίας μπορούν να χρησιμοποιηθούν για να δομηθεί ένας αλγόριθμος αναζήτησης και βελτιστοποίησης. Επίσης παρουσιάστηκαν τα βασικά πλεονεκτήματα αυτών των δύο κατηγοριών αλγορίθμων.

Μελετώντας αυτό το κεφάλαιο, ο αναγνώστης πρέπει να έχει εξοικειωθεί με τις έννοιες της Τεχνητής Νοημοσύνης, της Τεχνητής Μάθησης και της Αναζήτησης και Βελτιστοποίησης. Κυρίως όμως, αυτό το κεφάλαιο τον έχει εισάγει σε θέματα της θεωρίας της μάθησης και της γενετικής αναζήτησης, δηλαδή στο πώς ιδέες που

προέρχονται από την μάθηση και την εξέλιξη των βιολογικών ειδών μπορούν να χρησιμοποιηθούν σε πραγματικά προβλήματα μάθησης και αναζήτησης του βέλτιστου και να οδηγήσουν στη λύση τους γρήγορα και αποδοτικά. Επίσης, αναφέρθηκαν οι περιοχές στις οποίες βρίσκουν εφαρμογή αυτοί οι αλγόριθμοι για την επίλυση δύσκολων πρακτικών προβλημάτων. Τέλος έγινε μία σύντομη παρουσίαση των βιολογικών συστημάτων, από τα οποία οι ερευνητές εμπνεύστηκαν τόσο τα Ν.Δ. όσο και τους Γ.Α..

Η βιβλιογραφία που ακολουθεί χρησιμοποιείται σαν συμπληρωματική βιβλιογραφία. Η πρώτη αναφορά περιέχει μια πολύ καλά θεμελιωμένη παρουσίαση της θεωρίας της μάθησης και κυρίως των Τεχνητών Νευρωνικών Δικτύων, τόσο από την πλευρά των αλγορίθμων εκπαίδευσης, όσο και από τη σκοπιά της θεωρητικής τους μελέτης. Επίσης περιέχει μεγάλο αριθμό παραδειγμάτων και πλήθος πρακτικών εφαρμογών. Από το βιβλίο αυτό έχει χρησιμοποιηθεί σημαντικό υλικό και θα αναφέρεται συχνά στα επόμενα κεφάλαια. Στη δεύτερη αναφορά, γίνεται μια πιο εφαρμοσμένη παρουσίαση των Ν.Δ., με έμφαση κυρίως σε εφαρμογές. Η τρίτη αναφορά αποτελεί το πρώτο βασικό βοήθημα, που εμφανίστηκε στη διεθνή βιβλιογραφία, σχετικά με τους Γενετικούς Αλγορίθμους. Εκτός από την εκτεταμένη εισαγωγή στους Γ.Α. δίνεται έμφαση στη χρήση τους σε προβλήματα αναζήτησης και βελτιστοποίησης. Επίσης εκεί γίνεται για πρώτη φορά μια συστηματική προσπάθεια για τη θεωρητική τους θεμελίωση. Στο τέταρτο βιβλίο, μετά από μία σύντομη εισαγωγή στους Γ.Α. με πολλά παραδείγματα, δίνεται έμφαση στην γενίκευσή τους με χρήση άλλων τελεστών εκτός από αυτούς που ήδη αναφέραμε. Δηλαδή επικεντρώνεται στα Εξελικτικά Προγράμματα, τα οποία θα μας απασχολήσουν στο τελευταίο κεφάλαιο. Στο βιβλίο αυτό θα γίνεται συχνά αναφορά στα επόμενα κεφάλαια. Η τελευταία αναφορά είναι προσανατολισμένη σε εφαρμοσμένα προβλήματα, που επιλύονται με Γ.Α. και ενδιαφέρουν κυρίως τους μηχανικούς.

1.7 Βιβλιογραφία

1. "NEURAL NETWORKS: A Comprehensive Foundation", S. Haykin, Macmillan Publishing Company, N.Y., 1994 (ISBN 0-02-352761-7)
2. "NEURAL NETWORK DESIGN", M. T. Hagan, H. B. Demuth and m. Beal, PWS Publishing Company, Boston, 1996 (ISBN 0-534-94332-2)

3. "GENETIC ALGORITHMS in Search, Optimization and Machine Learning", D.E. Goldberg, Addison Wesley Publishing Company, Inc., 1989.
4. 'Genetic Algorithms + Data Structures = Evolution Programs', Z. Michalewicz, Springer - Verlag, 2nd ed., 1992.
5. 'Handbook of Genetic Algorithms', L. Davis, Van Nostrand Reinhold, 1991.