

Κεφάλαιο 3. Βιολογικά νευρωνικά δίκτυα

Σκοπός: Στο κεφάλαιο αυτό, δίνεται μια σύντομη αλλά περιεκτική εικόνα των βιολογικών νευρωνικών δικτύων των ζώντων οργανισμών, και κυρίως του ανθρώπινου εγκεφάλου. Παρατίθενται αρχικά η δομή των κυττάρων των νευρώνων, η συνδεσμολογία τους και τα τεχνικά χαρακτηριστικά τους. Περιγράφεται πώς γίνεται η δημιουργία του ηλεκτρικού σήματος και ακολούθως η μετάδοση του ανάμεσα στα κύτταρα. Τέλος, δείχνεται πως τα βιολογικά δίκτυα βοηθούν στη δημιουργία και χρήση τεχνητών νευρωνικών δικτύων που εξετάζουμε στο βιβλίο αυτό.

Προσδοκώμενα αποτελέσματα: Όταν θα έχετε τελειώσει αυτό το κεφάλαιο θα είστε σε θέση να:

- περιγράψετε από τι αποτελείται ο ανθρώπινος εγκέφαλος και τι είναι τα νευρωνικά δίκτυα που τον αποτελούν
- ποιά είναι η δομή του και πώς λειτουργεί ένα νευρωνικό δίκτυο
- ποια χαρακτηριστικά του μοιάζουν με αυτά της λειτουργίας των υπολογιστών, και ποια διαφέρουν

Έννοιες-Κλειδιά: νευρώνας, σύναψη, κεντρικό νευρικό σύστημα, πολλαπλασιασμός νευρώνων, μετάδοση σήματος στους νευρώνες, νευρομεταβιβαστές, σώμα, άξονας, δενδρίτες, κατανάλωση ενέργειας νευρώνων, κατώφλι δυναμικού.

Εισαγωγικές παρατηρήσεις: Στο κεφάλαιο αυτό δίνεται μια απλή εισαγωγή στα βιολογικά νευρωνικά δίκτυα των ζώντων οργανισμών. Παρουσιάζεται η δομή του κυττάρου του νευρώνα, η συνδεσμολογία του, η λειτουργία του, και πώς μια συλλογή τέτοιων μονάδων απαρτίζει ένα νευρωνικό δίκτυο. Παρατίθενται όλα τα χαρακτηριστικά του νευρώνα τα οποία με παρόμοιο ή ανάλογο τρόπο χρησιμοποιούνται στα υπολογιστικά νευρωνικά δίκτυα. Έτσι, δίνονται οι ομοιότητες αλλά και οι διαφορές που έχουν οι δύο αυτές κατηγορίες των δικτύων.

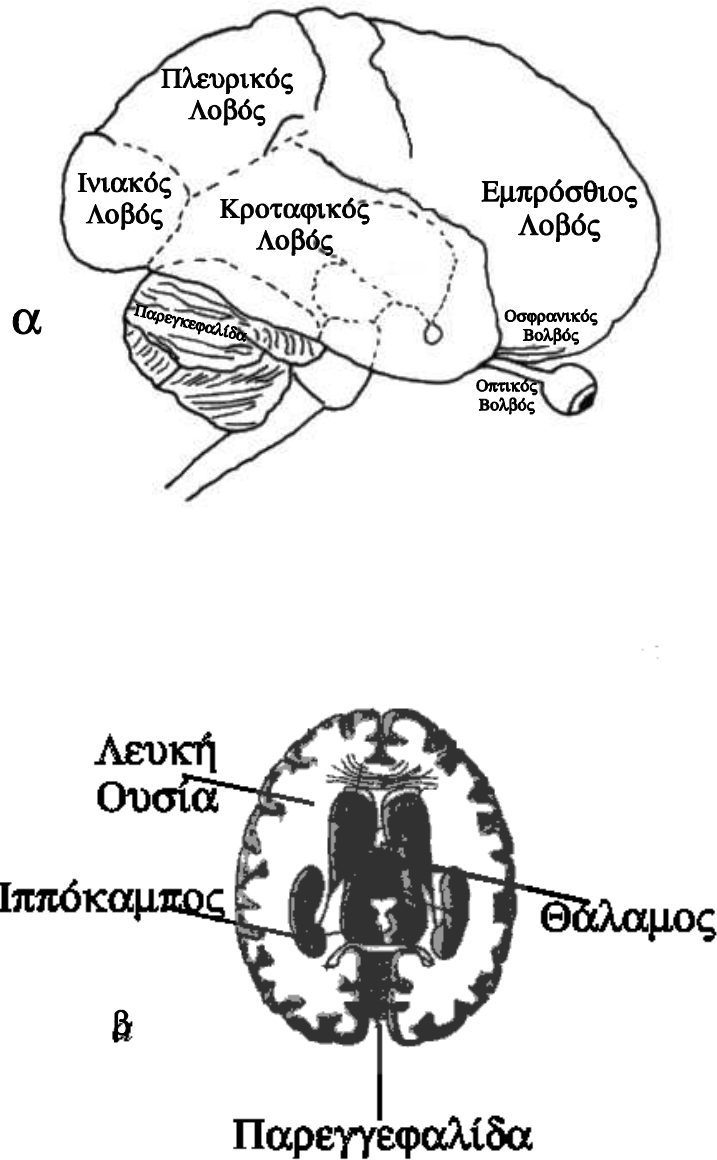
Είναι γνωστό ότι ο εγκέφαλος του ανθρώπου έχει μια από τις πιο περίπλοκες δομές που συναντά κανείς στον φυσικό κόσμο, και ως μονάδα που βρίσκεται σε

λειτουργία, μπορούμε να πούμε με σιγουριά ότι ακόμα και σήμερα είναι λίγο μόνο κατανοητός. Αυτό ισχύει διότι πολύ λίγα πράγματα από τις λειτουργίες του μπορούμε να εξηγήσουμε, και αυτά με διάφορες υποθέσεις που αναγκαζόμαστε να κάνουμε. Προφανώς το πρώτο πράγμα που πρέπει να εξετάσουμε είναι η δομή του. Από πειραματικές παρατηρήσεις στην Νευροανατομία και Νευροφυσιολογία γνωρίζουμε πολλά πράγματα, όπως π.χ. ότι στον εγκέφαλο υπάρχουν δύο συμμετρικά ημισφαίρια, ότι ορισμένες περιοχές εξειδικεύονται σε συγκεκριμένες λειτουργίες, κλπ. Εμπειρικά κατανοούμε ακόμα και πολλές από τις λειτουργίες του. Σήμερα γίνονται με επιτυχία εγχειρήσεις σε τμήματα του εγκέφαλου που είναι ελάχιστου μεγέθους (μερικά μικρά). Γνωρίζουμε λεπτομερώς πως λειτουργούν αρκετές από τις διεργασίες, κυρίως αυτές που έχουν να κάνουν με την επαφή μας και επίδραση με τον εξωτερικό κόσμο, όπως είναι η όραση, η ακοή, κλπ. Παρ' όλα αυτά οι γενικές λειτουργίες του είναι ελάχιστα κατανοητές. Το πιο σημαντικό είναι ότι ο εγκέφαλος είναι η μονάδα του ανθρωπίνου σώματος που αναπτύσσει και χρησιμοποιεί την διάνοια, και όλα όσα αυτή συνεπάγεται, όπως η ευφυΐα, τα συναισθήματα, κλπ. Κανένα τεχνητό μοντέλο δεν μπορεί να προβλέψει οτιδήποτε έχει σχέση με τα προσωπικά συναισθήματα και εμπειρίες όπως το ανθρώπινο μυαλό. Και αυτό συμβαίνει διότι δεν έχει εξηγηθεί μέχρι σήμερα, ούτε κατά το ελάχιστο, πως η ανατομία και η φυσιολογία του εγκέφαλου δημιουργεί τις γνωστικές εμπειρίες και την αντίληψη, πράγματα που είναι πολύ περίπλοκα να εξηγηθούν, και ουσιαστικά δεν γίνεται καν έρευνα σε αυτά. Τέλος, έχουμε μερικές λειτουργίες για τις οποίες υπάρχουν αρκετές εξηγήσεις, όπως είναι η μνήμη, η κατάσταση κατά την διάρκεια του ύπνου, τα όνειρα, και άλλα, που αποτελούν τομείς στους οποίους υπάρχει έντονο ερευνητικό ενδιαφέρον, επιτελείται καθημερινά πρόοδος, αλλά ακόμα είμαστε μακριά από το να έχουμε πλήρη κατανόηση για τα φαινόμενα αυτά.

Στο σχήμα 3.1 έχουμε δύο απόψεις του εγκεφάλου, (α) όπως φαίνεται από τα πλάγια, και (β) όπως φαίνεται από μία γωνιακή τομή, και τον κοιτάμε από επάνω. Διακρίνουμε διάφορα τμήματα, όπως εξηγούνται στο σχήμα.

Υπάρχει τεράστια βιβλιογραφία, από την περιοχή της Νευροφυσιολογίας, σχετικά με τη δομή και τη λειτουργία των βιολογικών νευρωνικών δικτύων που εδώ δεν θα αναφερθεί λεπτομερώς. Ενδεικτικά αναφέρουμε μόνο ένα γενικό εγχειρίδιο [1], που περιέχει όλες τις τελευταίες εξελίξεις, έχει άριστη περιγραφή της δομής του νευρικού συστήματος, και πολύ περιγραφικά σχήματα. Επίσης σε ψηφιακή μορφή

CD-ROM υπάρχει και εγκυκλοπαίδεια των Νευροεπιστημών με όλες τις πληροφορίες που αναφέρονται σε θέματα του κεφαλαίου αυτού [2].



Σχήμα 3.1

Δύο απόψεις του ανθρώπινου εγκεφάλου

(α) όπως φαίνεται από τα πλάγια, και (β) όπως φαίνεται από μία γωνιακή τομή

Ενότητα 3.1: Ο νευρώνας

Θεωρούμε ότι η βασική μονάδα δόμησης του εγκεφάλου είναι ένα κύτταρο που ονομάζεται νευρώνας, και το οποίο λειτουργεί όπως και τα άλλα κύτταρα του οργανισμού. Ο ανθρώπινος εγκέφαλος αποτελείται από ένα πολύ μεγάλο αριθμό νευρώνων, της τάξης του 10^{10} . Και το νούμερο αυτό δεν είναι σίγουρο, καθώς στην

βιβλιογραφία αναφέρονται αριθμοί από 10^9 ως 10^{11} . Όλοι οι νευρώνες είναι διαφορετικοί μεταξύ τους και δεν υπάρχουν δύο ολόιδιοι νευρώνες στον μεγάλο αυτό αριθμό. Υπάρχουν περί τις 100 διαφορετικές κατηγορίες (τύποι) νευρώνων, αλλά και ο αριθμός αυτός εξαρτάται από το πως ορίζουμε την κατηγορία. Κάθε νευρώνας συνδέεται με πολλούς άλλους νευρώνες με συνδέσεις που ονομάζονται συνάψεις. Ο αριθμός των συνάψεων δεν είναι σταθερός, αλλά συνήθως ένας νευρώνας έχει περί τις 10^4 συνάψεις. Μερικοί όμως νευρώνες έχουν μέχρι και 200000 συνάψεις, όπως είναι οι νευρώνες τύπου Purkinje, που βρίσκονται στην παρεγκεφαλίδα. Πολλές από τις διασυνδέσεις των νευρώνων φαίνεται εκ πρώτης όψεως ότι είναι τυχαίες, ή έχουν στατιστικό χαρακτήρα. Παρ' όλα αυτά, το πιο πιθανό είναι ότι έχουν δημιουργηθεί με μεγάλη ακρίβεια, τόσο στο επίπεδο κύτταρο-προς-κύτταρο, όσο και στο επίπεδο ολόκληρου του συστήματος. Ένας αριθμός νευρώνων με τις διασυνδέσεις τους αποτελούν ένα νευρωνικό δίκτυο (neural net). Το όλο σύστημα των νευρωνικών δικτύων στον ανθρώπινο οργανισμό αποτελεί το Κεντρικό Νευρικό Σύστημα (Central Nervous System). Το σύστημα αυτό επεκτείνεται σε όλο το ανθρώπινο σώμα με κεντρικά σημεία τον εγκέφαλο και την σπονδυλική στήλη. Οι νευρώνες βέβαια εκτείνονται μέχρι και όλα τα άκρα. Και μόνο τα μεγέθη των αριθμών αυτών των νευρώνων και των συνδέσεων τους στο νευρικό σύστημα δικαιολογούν πλήρως την περιπλοκότητα του εγκεφάλου, αλλά και τις τεράστιες δυνατότητες που παρουσιάζει.

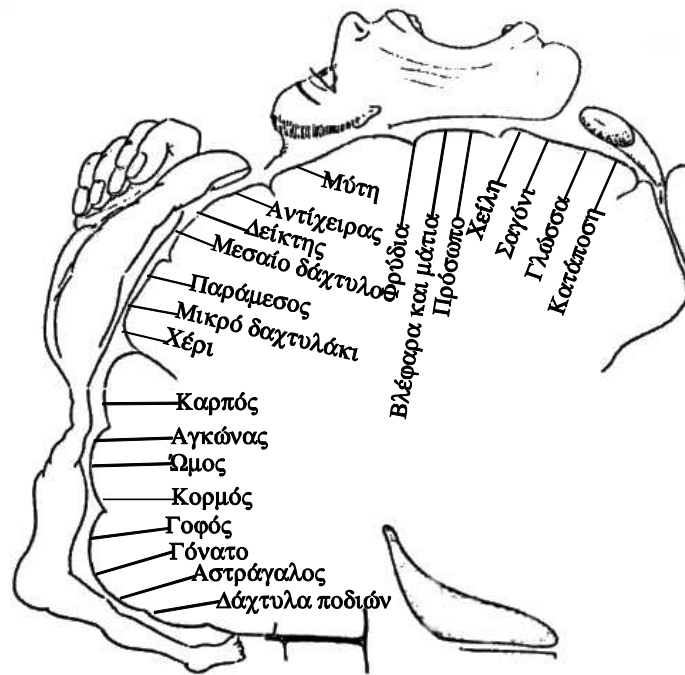
Οι νευρώνες ως κύτταρα πιστεύεται ότι δεν πολλαπλασιάζονται και δεν αναπαράγονται. Αυτό σημαίνει ότι στο σύνολό του το κεντρικό νευρικό σύστημα δημιουργείται στο έμβρυο από τις πρώτες μέρες της κύησης και είναι τελείως αναπτυγμένο μερικούς μήνες μετά τη γέννηση του οργανισμού. Η θεώρηση αυτή είναι γενικά αποδεκτή σε όλους. Παρ' όλ' αυτά, υπάρχουν μόλις τελευταία (1998) προτάσεις ότι πιθανώς σε περιορισμένη κλίμακα γίνεται κάποια αναπαραγωγή. Αυτό δείχνει ότι δεν γνωρίζουμε όλες τις λεπτομέρειες της φυσιολογίας των νευρωνικών δικτύων του εγκεφάλου ακόμα και σήμερα. Ο ανθρώπινος εγκέφαλος ενός υγιούς ενήλικα χάνει περί τους 1000 νευρώνες την ημέρα. Μεγαλύτερος αριθμός νευρώνων καταστρέφεται από το οινόπνευμα κτλ., αλλά βέβαια και από την προχωρημένη ηλικία.

Η παύση της αναπαραγωγής των νευρώνων πολύ νωρίς δεν ισχύει και για τις συνάψεις. Το αντίθετο μάλιστα, καθ' όλη την διάρκεια της ζωής ενός οργανισμού οι συνάψεις βρίσκονται σε μία δυναμική ισορροπία, δημιουργούνται καινούργιες και καταστρέφονται παλιές. Η δημιουργία των νέων συνάψεων γίνεται όταν ο εγκέφαλος

αποκτά περισσότερες εμπειρίες από το περιβάλλον, μαθαίνει, αναγνωρίζει, κατανοεί, κλπ. Από την άλλη μεριά οι σοβαρές ασθένειες της προχωρημένης ηλικίας προέρχονται κυρίως από την μεγάλη καταστροφή των συνάψεων στα νευρωνικά δίκτυα του κεντρικού νευρικού συστήματος, και όχι τόσο από την καταστροφή των νευρώνων.

Ο ρόλος του νευρώνα σε ένα νευρωνικό δίκτυο είναι να λαμβάνει όλα τα σήματα που έρχονται από άλλους νευρώνες, να τα επεξεργάζεται με κατάλληλο τρόπο, και να μεταδίδει περαιτέρω το επεξεργασμένο σήμα σε άλλους νευρώνες, ούτως ώστε ένα σήμα να διαδίδεται μέσω ενός τεραστίου αριθμού νευρώνων. Τα σήματα που επεξεργάζεται ένας νευρώνας είναι ηλεκτρικής μορφής, και είναι της τάξης μερικών mV.

Το σύνολο των νευρώνων στον εγκέφαλο δεν συμμετέχει στην δημιουργία ενός και μόνο δικτύου. Γνωρίζουμε πολύ καλά ότι υπάρχουν πολλά τμήματα στον εγκέφαλο, όπως είναι ο υποθάλαμος, η παρεγκεφαλίδα, ο ιππόκαμπος και διάφορα άλλα, τα οποία είναι πολύ γνωστά από την πλευρά της ανατομίας. Δεν θα εξετάσουμε εδώ λεπτομερώς τα διάφορα τμήματα και τις λειτουργίες τους, καθ' ότι το θέμα αυτό ξεφεύγει από το σκοπό του κεφαλαίου αυτού. Θα αναφέρουμε όμως ότι είναι αποδεκτή σήμερα η θεώρηση ότι διάφορα τμήματα του εγκεφάλου εξειδικεύονται σε διαφορετικές λειτουργίες, όπως είναι πχ. η όραση, η αφή, η ακοή, δηλαδή οι αισθήσεις. Η όραση είναι το θέμα που έχει μελετηθεί περισσότερο από οποιαδήποτε άλλη λειτουργία, ίσως γιατί ο ανθρώπινος οργανισμός μέσα από αυτήν αντιλαμβάνεται το μεγαλύτερο κομμάτι του κόσμου που τον περιβάλλει. Στο σχήμα 3.2 βλέπουμε ένα “χάρτη” που κατασκεύασε ο Penfield, που δίνει παραστατικά τον έλεγχο των διαφόρων τμημάτων του σώματος από τον εγκέφαλο [3].



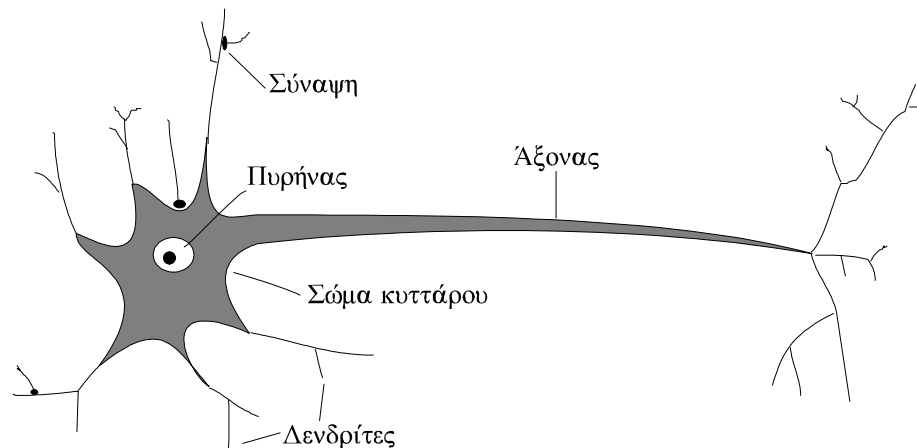
Σχήμα 3.2

Ο χάρτης του Penfield:

ο έλεγχος των διαφόρων τμημάτων του σώματος από τον εγκέφαλο

Ενότητα 3.2: Η δομή του νευρώνα

Θα ξεκινήσουμε με την λεπτομερή δομή του κυττάρου του νευρώνα, και θα δούμε τα διάφορα μέρη που το απαρτίζουν. Ως κύτταρο ο νευρώνας είναι σαν όλα τα άλλα κύτταρα του οργανισμού, δεν έχει τίποτα το ιδιαίτερο στην δομή του. Ένας νευρώνας λοιπόν αποτελείται από το κυρίως σώμα, τον άξονα, και τους δενδρίτες. Αυτά φαίνονται στο σχήμα 3.3



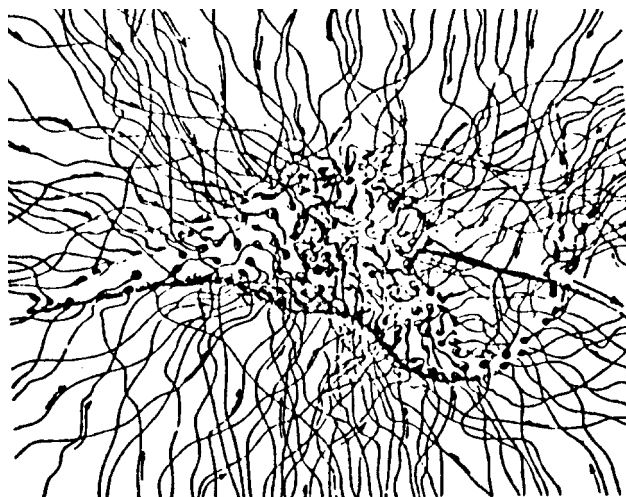
Σχήμα 3.3

Σχηματική απεικόνιση ενός τυπικού νευρώνα.

Ο κυρίως κορμός του νευρώνα είναι το σώμα, μέσα στο οποίο βρίσκεται ο πυρήνας του κυττάρου. Στον πυρήνα βρίσκεται όλο το γενετικό υλικό του οργανισμού. Εδώ συμβαίνει η πιο έντονη χημική δράση του κυττάρου για την σύνθεση των ενζύμων, πρωτεϊνών, και άλλων μορίων που είναι απαραίτητα για την ζωή του κυττάρου. Ο άξονας είναι μια μεγάλη επέκταση από το σώμα και εφάπτεται με άλλους νευρώνες. Οι άξονες σε μερικούς νευρώνες είναι καλυμμένοι με μια ουσία, που λέγεται μυελίνη, ενώ άλλοι άξονες είναι τελείως ακάλυπτοι. Κάθε νευρώνας έχει έναν μόνο άξονα, ο οποίος μεταδίδει σήματα σε άλλους νευρώνες, δηλ. στέλνει τα εξερχόμενα σήματα. Τέλος υπάρχουν οι λεπτές επεκτάσεις που μοιάζουν με διακλαδώσεις δένδρου και ονομάζονται δενδρίτες. Οι δενδρίτες κάνουν και αυτοί επαφή με άλλους νευρώνες, και δέχονται τα εισερχόμενα σήματα. Στο σχήμα 3.4 βλέπουμε ένα τμήμα μόνον ενός νευρώνα με όλους όμως τους δενδρίτες του, και παρατηρούμε πόσο περίπλοκο είναι το κύτταρο αυτό. Η ταχύτητα των ηλεκτρικών παλμών στους απλούς νευρώνες κυμαίνεται από 10 - 20 m/sec, ενώ σε αυτούς που οι άξονες είναι καλυμμένοι με μυελίνη η ταχύτητα φθάνει τα 100 m/sec. Το μήκος των νευρώνων ποικίλει. Μερικοί έχουν μήκος μερικά μικρά, άλλοι νευρώνες μπορεί να φθάνουν και το 1 m, ιδίως αυτοί που εκτείνονται στα πόδια. Αυτοί που έχουν ιδιαίτερα μεγάλο μήκος, έχουν πολύ μικρό πάχος, μερικά μικρά μόνο, είναι δηλαδή πολύ λεπτοί.

Τα συστατικά του νευρώνα είναι οργανίδια, νηματίδια, και σωληνοειδή τμήματα που έχουν δημιουργηθεί από περίπου 6×10^9 μόρια πρωτεΐνης, 10^{10} μόρια λιπαρών ουσιών, και 6×10^{11} μόρια RNA. Τα 2/3 του βάρους του συνίσταται από περίπου 1500 μιτοχόνδρια. Τα μιτοχόνδρια μεταφέρουν πολύ γρήγορα ζάχαρη για να παράγεται ενέργεια. Από όλα τα κύτταρα του οργανισμού ο νευρώνας χρησιμοποιεί ενέργεια ταχύτερα από κάθε άλλο. Κάθε μιτοχόνδριο χρειάζεται 10^7 άτομα οξυγόνου ανά sec. Αν το οξυγόνο σταματήσει να παρέχεται για διάστημα πάνω από 10 sec, η λειτουργία των νευρώνων καταστρέφεται και ο άνθρωπος περιέρχεται σε αφασία. Παρόλο ότι ο εγκέφαλος είναι το 2% της μάζας του ανθρώπου, εν τούτοις χρησιμοποιεί παραπάνω από 20% του οξυγόνου που παίρνει ο οργανισμός. Η κατανάλωση ενέργειας στον εγκέφαλο είναι 20 Watt, πράγμα που τον καθιστά πολύ αποδοτικό. Αντίστοιχα ένας υπολογιστής χρειάζεται χιλιάδες Watt. Η μεγάλη αυτή απαίτηση ενέργειας οφείλεται πρώτον στο ότι είναι απαραίτητο να διατηρείται μία

ισορροπία στις συνδέσεις των νευρώνων και η οποία διατηρείται μόνο με σταθερή ανταλλαγή χημικών ουσιών. Και δεύτερον, στο ότι ο νευρώνας έχει τεράστια επιφάνεια σχετικά με τον όγκο του. Η μεγάλη αυτή επιφάνεια έχει συνεχείς διαρροές και εισροές που πρέπει να κρατώνται σε μία ευαίσθητη χημική ισορροπία, πράγμα που απαιτεί μεγάλα ποσά ενέργειας.



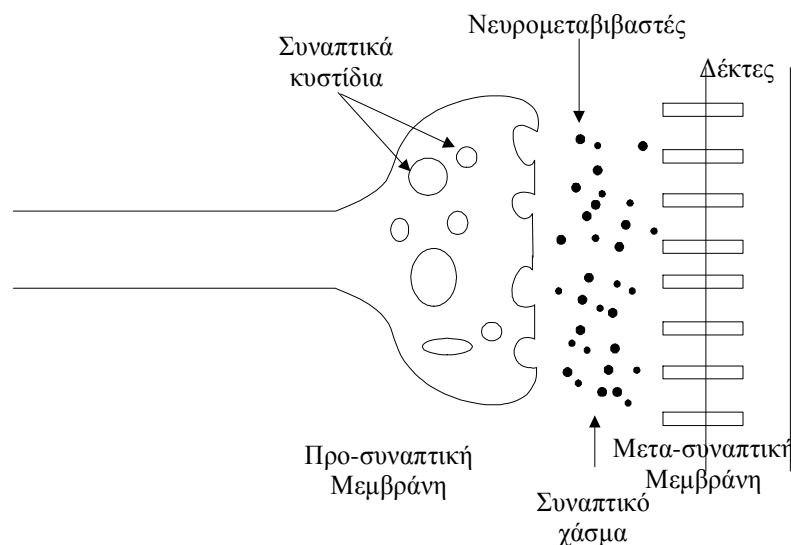
Σχήμα 3.4

Ένας νευρώνας με τις πολλαπλές συνδέσεις του με άλλους νευρώνες.

Ενότητα 3.3: Η συνδεσμολογία

Οι συνδέσεις μεταξύ των νευρώνων, με τους άξονες και τους δενδρίτες, γίνονται στις επαφές που ονομάζονται συνάψεις. Η σύναψη έχει πολύ περίπλοκη δομή και επιτελεί επίσης περίπλοκες διεργασίες κατά την μετάδοση του σήματος. Ο άξονας όπως είδαμε συνήθως έχει πάρα πολλές διακλαδώσεις και έτσι στέλνει πολλά σήματα σε διαφορετικά σημεία. Στα σημεία που εφάντονται οι δενδρίτες δημιουργείται μία σύναψη. Η επαφή που δημιουργείται περιέχει ένα κενό, το συναπτικό χάσμα, το οποίο είναι της τάξης του 0.01 μ. Η μεμβράνη του πρώτου νευρώνα που στέλνει το σήμα ονομάζεται προ-συναπτική μεμβράνη, ενώ αυτή του δεύτερου νευρώνα (δέκτη) ονομάζεται μετα-συναπτική μεμβράνη. Στην άκρη κάθε διακλάδωσης σχηματίζεται ένα μικρό προεξόγκωμα, το οποίο εκκρίνει χημικούς μεταβιβαστές, οι οποίοι διαπερνούν το συναπτικό χάσμα και έτσι φθάνουν στον άλλο νευρώνα. Στο σχήμα 3.5 φαίνεται σε μεγένθυση η δομή της σύναψης. Τα συναπτικά κυστίδια (synaptic vesicles) που βρίσκονται στην άκρη του άξονα ελευθερώνουν τους νευρομεταβιβαστές. Οι νευρομεταβιβαστές διαπερνούν το συναπτικό χάσμα και έτσι φθάνουν στον δενδρίτη του άλλου νευρώνα. Οι νευροβιβαστές είναι περίπλοκα μόρια, πάνω από πενήντα

διαφορετικά είδη, τα οποία συμμετέχουν στις χημικές αντιδράσεις που λαμβάνουν χώρα μέσα στο κύτταρο. Μερικοί νευρομεταβιβαστές είναι πολύ γνωστοί, όπως είναι η ντοπαμίνη (η έλλειψη της οποίας προκαλεί την ασθένεια Parkinson), η σεροτονίνη, η ακετυλοχολίνη (που σχετίζονται με την μνήμη και μάθηση, και η έλλειψη των οποίων προκαλεί την ασθένεια Alzheimer), και άλλοι. Μερικοί νευρομεταβιβαστές είναι διεγερτικοί, ενώ άλλοι είναι ανασταλτικοί. Π.χ. η γλουταμίνη και η ασπαρτίνη είναι διεγερτικοί, ενώ η γλυκίνη είναι ανασταλτικός νευρομεταβιβαστής. Όταν ελευθερώνονται οι μεταβιβαστές από ένα νευρώνα και φθάνουν σε έναν άλλο μέσω της σύναψης τότε επηρεάζεται η μεμβράνη του αποδέκτη-νευρώνα και αλλάζει η κατάσταση του ως προς το σήμα που θα στείλει ακολούθως αυτός ο νευρώνας. Βλέπουμε λοιπόν ότι στην σύναψη η αιτία της αλλαγής του δυναμικού στην μετα-συναπτική μεμβράνη είναι χημικής και όχι ηλεκτρικής μορφής. Πειραματικά μπορούμε εύκολα να μετρήσουμε ένα ηλεκτρικό σήμα που μεταδίδεται σε ένα νευρώνα κάνοντας μία επαφή με ένα μικροηλεκτρόδιο και έτσι η μετάδοση των σημάτων είναι κάτι που μετριέται με μεγάλη ακρίβεια.



Σχήμα 3.5

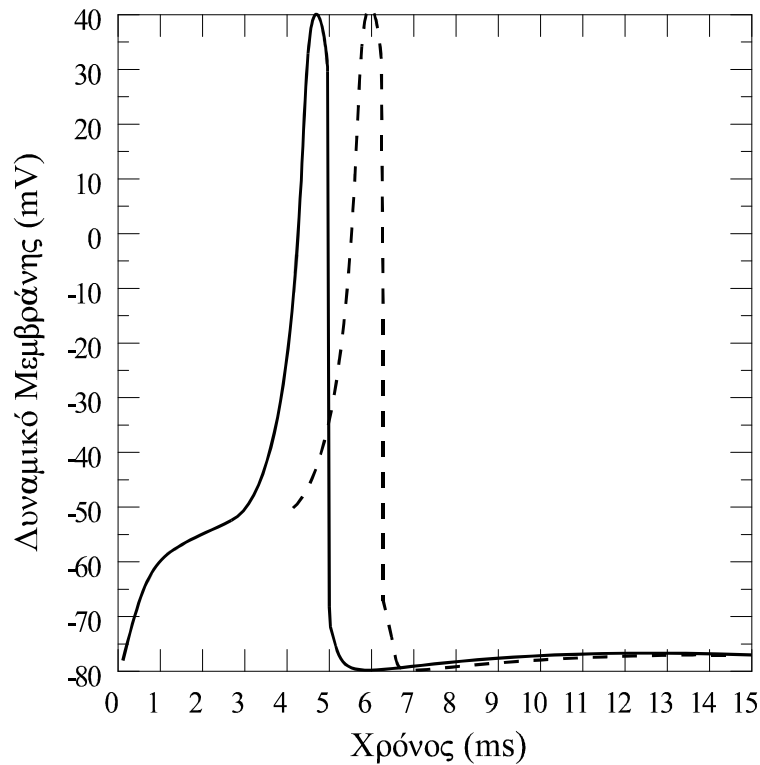
Λεπτομέρεια μιας σύναψης

Ενότητα 3.4: Η λειτουργία

Κάθε νευρώνας έχει δύο δυνατές καταστάσεις στις οποίες μπορεί να βρίσκεται: τις ονομάζουμε ενεργό και μη-ενεργό κατάσταση. Όταν ο νευρώνας είναι ενεργός λέγουμε ότι πυροδοτεί, ενώ όταν είναι μη-ενεργός λέγουμε ότι είναι αδρανής.

Ενδιάμεσες καταστάσεις δεν υπάρχουν. Κατά κάποιο τρόπο βλέπουμε ότι ο νευρώνας είναι δυαδικό (binary) στοιχείο, και μοιάζει στο σημείο αυτό με τους ηλεκτρονικούς υπολογιστές. Όταν ο νευρώνας πυροδοτεί, παράγει ένα ηλεκτρικό σήμα (παλμό), το οποίο κάθε φορά έχει τα ίδια χαρακτηριστικά, όπως φαίνεται στο σχήμα 3.6. Μπορούμε να βάλουμε ένα πολύ λεπτό μικροηλεκτρόδιο κοντά σε ένα νευρώνα, και να καταγράψουμε το ηλεκτρικό ρεύμα που διατρέχει κατά μήκος του άξονα του νευρώνα αυτού. Βρίσκουμε ότι έχει διάρκεια της τάξης του msec και ένταση της τάξης μερικών mV. Το σήμα αυτό ταξιδεύει μέσα στο νευρωνικό δίκτυο από νευρώνα σε νευρώνα χωρίς να ελαττωθεί καθόλου. Ο μέγιστος ρυθμός παραγωγής των παλμών είναι περίπου 1000 παλμοί ανά sec.

Μεγάλο ενδιαφέρον έχει ο τρόπος με τον οποίο δημιουργούνται τα ηλεκτρικά σήματα, που έχει ως εξής: στην μεμβράνη του κυττάρου του νευρώνα δημιουργείται μια διαφορά δυναμικού μεταξύ της εσωτερικής και εξωτερικής επιφάνειας, όπως ακριβώς και σε ένα πυκνωτή. Συνήθως το αρνητικό δυναμικό δημιουργείται στην εσωτερική επιφάνεια. Αυτό γίνεται εξ αιτίας της παρουσίας μορίων πρωτεϊνών με αρνητικό φορτίο και τα οποία δεν μπορούν να περάσουν την μεμβράνη και να βγουν έξω από το κύτταρο. Όταν το κύτταρο είναι σε ισορροπία, χωρίς να μεταδίδεται σήμα, τότε το “δυναμικό ηρεμίας” είναι περίπου -70 mV. Το δυναμικό αυτό είναι σχετικά πολύ μεγάλο, καθ’ ότι το πάχος της μεμβράνης είναι μόλις 1 μm. Η μεμβράνη έχει πολύ μικρές τρύπες σε όλο το μήκος της που επιτρέπει άτομα και ιόντα να την διαπερνούν. Τα πιο σημαντικά είναι τα ιόντα του νατρίου, χλωρίου, καλίου, ασβεστίου (Na^+ , Cl^- , K^+ , Ca^{++}). Κάθε ένα έχει τα δικά του κανάλια, μέσα από τα οποία διαπερνούν την μεμβράνη. Το αξιοσημείωτο είναι ότι τα κανάλια αυτά έχουν πύλες (πόρτες) οι οποίες ανοίγουν και κλείνουν, έτσι ώστε να επιτρέπουν ή να απαγορεύουν την ροή των ιόντων δια μέσω της μεμβράνης. Η μεμβράνη του κυττάρου έχει κάποια μόρια που είναι ειδικές πρωτεΐνες, που δρουν ως “αντλία” και μεταφέρουν τα ιόντα δια μέσω της μεμβράνης. Αναγκάζουν τα ιόντα να κινούνται αντίθετα από την φυσική συγκέντρωση ισορροπίας, πράγμα που για να το κάνουν ξοδεύουν ενέργεια, και για αυτό το λόγο οι νευρώνες χρειάζονται μεγάλα ποσά ενέργειας. Η συγκέντρωση των ιόντων αυτών και ακολούθως η φυσική τους κίνηση κατά μήκος του κυττάρου δημιουργεί ένα ηλεκτρικό ρεύμα το οποίο αποτελεί το ηλεκτρικό σήμα που μεταδίδεται στο κύτταρο. Ο μηχανισμός αυτός των καναλιών στην μεμβράνη εξηγήθηκε πρώτα από τους Hodgkin και Huxley το 1952 [4].



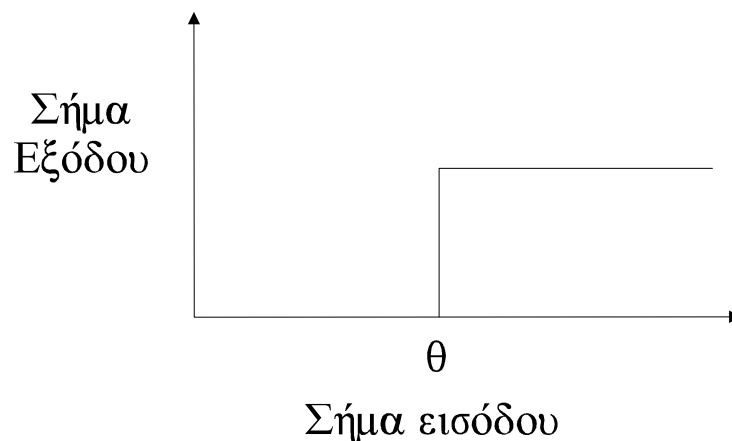
Σχήμα 3.6

Το δυναμικό δράσης ενός νευρώνα όπως εμφανίζεται σε έναν παλμογράφο κατόπιν κατάλληλου ερεθισμού με τη βοήθεια μικροηλεκτροδίων.

Όπως βλέπουμε στο σχήμα 3.6 (απότομη άνοδος και απότομη κάθοδος) το δυναμικό της μεμβράνης δημιουργεί μία πραγματική εκκένωση. Το εσωτερικό του νευρώνα μπορεί να γίνει στιγμιαία ακόμα και θετικά φορτισμένο, ως προς το υπόλοιπο κύτταρο. Σταδιακά όμως επιστρέφει στην κανονική του κατάσταση, στο δυναμικό ηρεμίας. Είναι ιδιαίτερα αξιοσημείωτο ότι κατά την διάρκεια της αποκατάστασης είναι αδύνατο ο νευρώνας να δεχθεί άλλη διέγερση, έστω και αν πολλαπλά σήματα καταφθάσουν ταυτόχρονα και προσπαθήσουν να τον διεγείρουν. Η περίοδος κατά την οποία ισχύει αυτό λέγεται περίοδος μεταστροφής (refractory period).

Όλα τα σήματα που καταφθάνουν σε ένα νευρώνα σε μια δεδομένη στιγμή αθροίζονται. Αυτό σημαίνει ότι αθροίζονται τα ηλεκτρικά δυναμικά τους. Αν το άθροισμα των σημάτων φθάσει ή ξεπεράσει μια δεδομένη τιμή, (κατώφλι) τότε θεωρείται ότι ο νευρώνας βρίσκεται σε διεγερμένη κατάσταση και πυροδοτεί. Αυτό έχει ως αποτέλεσμα να στείλει μέσω του άξονα ένα παλμό. Αν το άθροισμα όμως είναι μικρότερο από την δεδομένη αυτή τιμή, τότε δεν συμβαίνει τίποτα. Ο νευρώνας

παραμένει αδρανής. Το δυναμικό αυτό που είναι μικρότερο από το κατώφλι, χάνεται. Η τιμή του κατωφλίου ονομάζεται θ . Το εισερχόμενο σήμα μπορεί να είναι διεγερτικό ή ανασταλτικό. Όταν το εισερχόμενο σήμα είναι διεγερτικό αυτό σημαίνει ότι το σήμα αυτό είναι θετικό και κάνει το δυναμικό του νευρώνα να πλησιάσει κοντά στο θ . Αν είναι ανασταλτικό τότε συμβαίνει το αντίθετο, δηλ. το σήμα είναι αρνητικό και κάνει το δυναμικό να απομακρύνεται από το θ . Το τελικό αποτέλεσμα εξαρτάται από την συνάρτηση του κατωφλίου, η οποία συνήθως είναι η συνάρτηση Heaviside, όπως φαίνεται στο σχήμα 3.7. Αν το σήμα είναι ίσο ή ξεπερνά το κατώφλι δυναμικού, τότε ο νευρώνας διεγείρεται, και είναι έτοιμος να στείλει έναν παλμό που έχει πάντοτε το ίδιο μέγεθος. Αμέσως μετά τον παλμό, ο νευρώνας επανέρχεται στην αρχική του κατάσταση. Αν οι συνθήκες το επιτρέψουν μπορεί αργότερα να ενεργοποιηθεί πάλι. Το σήμα όμως που μεταδόθηκε συνεχίζει την ίδια διαδικασία σε άλλους νευρώνες του δικτύου χωρίς να ελαττωθεί καθόλου. Μεταδίδεται πάντα προς μία κατεύθυνση, η οποία είναι να απομακρύνεται από το σώμα του κυττάρου.



Σχήμα 3.7

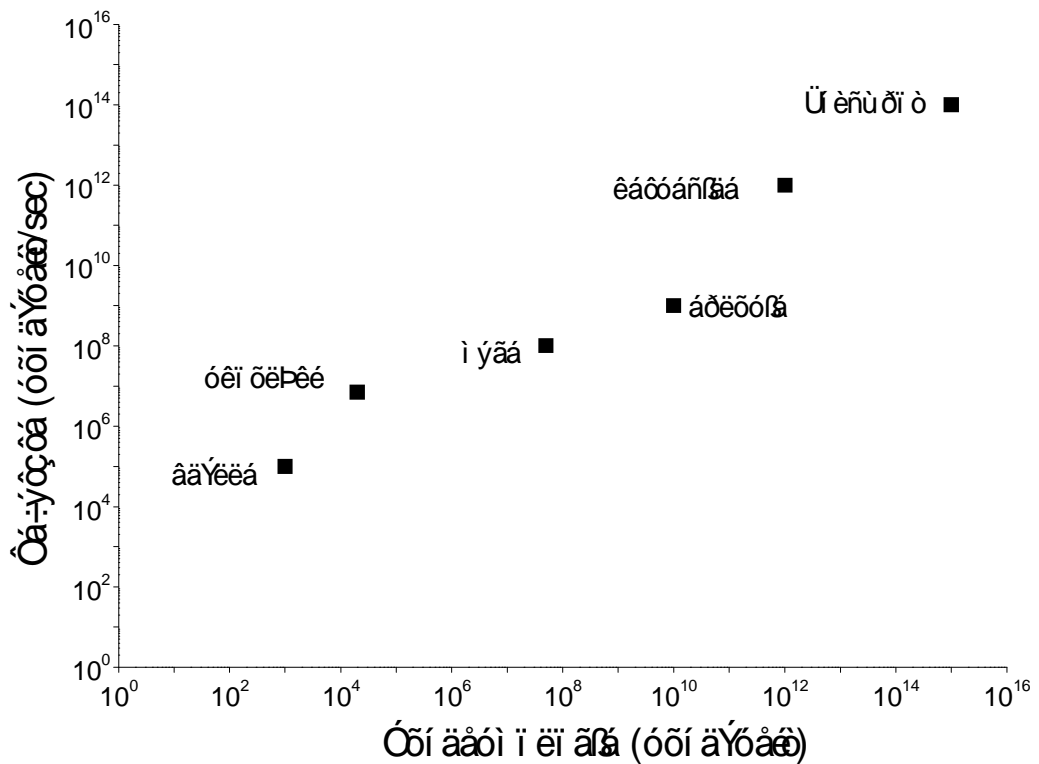
Η συνάρτηση κατωφλίου Heaviside

Ενότητα 3.5: Σύγκριση με τεχνητά νευρωνικά δίκτυα.

Είδαμε ότι οι αριθμοί των μονάδων των νευρώνων και οι συνδέσεις τους είναι πράγματι πολύ μεγάλοι. Ως τάξη μεγέθους είναι πολύ μεγαλύτεροι από τους αριθμούς μονάδων που μπορεί να χειριστεί εύκολα σήμερα ένας υπολογιστής και μάλλον

πλησιάζει το ανάλογο των ατόμων/μορίων στην ύλη (αριθμός του Avogadro). Είναι μάλλον λογικό να είναι έτσι τα πράγματα, αν πάρουμε υπ' όψιν μας την πολυπλοκότητα του ανθρώπινου νου και όλες τις διεργασίες που επιτελεί. Τα τεχνητά νευρωνικά δίκτυα (ΤΝΔ) οπωσδήποτε υπολείπονται κατά πολύ στο σημείο αυτό, και δεν μπορούν να κάνουν πράγματα που ο εγκέφαλος ακόμα και ενός παιδιού επιτελεί με μεγάλη ευκολία. Ένα ΤΝΔ μπορεί να έχει μερικές εκατοντάδες ή χιλιάδες νευρώνες, αλλά όχι την τάξη μεγέθους που έχει ο εγκέφαλος.

Επιπλέον υπάρχουν πολλές άλλες διαφορές, όπως στο ότι οι συνάψεις είναι πολύ περίπλοκες στα βιολογικά, ενώ πολύ απλές στα ΤΝΔ. Η συνδεσμολογία (ο τρόπος και αριθμός συνδέσεων) είναι επίσης πολύ πιο περίπλοκη στα βιολογικά νευρωνικά δίκτυα. Η διαφορά τους αυτή στις συνάψεις είναι μάλλον η πιο σημαντική διαφορά στα δύο αυτά είδη. Η ταχύτητα όμως στους υπολογιστές είναι χιλιάδες φορές μεγαλύτερη από την ταχύτητα διάδοσης του σήματος στα βιολογικά νευρωνικά δίκτυα. Παρ' όλ' αυτά, η διαφορά στην ταχύτητα δεν επαρκεί για να καλύψει την διαφορά στην πολυπλοκότητα. Στο σχήμα 3.8 βλέπουμε διάφορους οργανισμούς, σχετικά με τον ολικό αριθμό των συνδέσεων (συνάψεων) των νευρώνων (άξονας χ), ως προς την ταχύτητα με την οποία οι συνάψεις αυτές μπορούν να αλλάξουν [5]. Τα τεχνητά νευρωνικά δίκτυα (ΤΝΔ) έχουν μόλις ξεπεράσει το σκουλήκι, προσπαθούν να φτάσουν τη μύγα, αλλά υπολείπονται κατά πολύ του ανθρώπινου εγκέφαλου. Ενώ ο ανθρώπινος εγκέφαλος μαθαίνει, καταλαβαίνει πολύ γρήγορα, η μάθηση στο ΤΝΔ παίρνει πολύ χρόνο, ακόμα και στον πιο γρήγορο υπολογιστή. Τέλος, ο εγκέφαλος μπορεί να κάνει σύγχρονη ή ασύγχρονη ενημέρωση των μονάδων του (δηλ. σε συνεχή χρόνο), ενώ το ΤΝΔ κάνει μόνον σύγχρονη ενημέρωση, δηλ. σε διακριτό χρόνο.



Σχήμα 3.8

Σύνοψη: Ο ανθρώπινος οργανισμός αποτελείται από πολλά συστήματα και υποσυστήματα, αν και συχνά στην καθημερινή μας ζωή το αναφέρουμε ως ένα όργανο. Περιέχει ένα πολύ μεγάλο αριθμό νευρώνων, πολλών διαφορετικών τύπων, οι οποίοι έχουν πολύ περίπλοκη συνδεσμολογία και απαρτίζουν πολλά νευρωνικά δίκτυα. Τα δίκτυα μεταφέρουν ηλεκτρικά σήματα σε ολόκληρο το Κεντρικό Νευρικό Σύστημα, τα οποία και ελέγχουν κάθε λειτουργία του. Τα σήματα αυτά δημιουργούνται με την απότομη αλλαγή του δυναμικού δράσης εξ αιτίας της μεταβολής των συγκεντρώσεων των ιόντων κυρίως του νατρίου και ασβεστίου στο εσωτερικό και εξωτερικό του κυττάρου του νευρώνα. Στο σημερινό επίπεδο γνώσεων, γνωρίζουμε και εξηγούμε ικανοποιητικά τόσο την ανατομική δομή των κυττάρων αυτών, όσο και τον μηχανικό τρόπο λειτουργία τους. Στο σημείο όμως που η επιστήμη ακόμη και σήμερα έχει πολύ μικρή πρόοδο, είναι στο πώς αυτές οι πρωτογενείς λειτουργίες μετατρέπονται σε αφηρημένες έννοιες που κατανοούν όλοι οι ζώντες οργανισμοί. Οπωσδήποτε όμως, οι ιδέες από τη δομή και λειτουργία των νευρωνικών δικτύων των ζώντων οργανισμών χρησιμοποιούνται άμεσα για την κατασκευή υπολογιστικών νευρωνικών δικτύων που

μπορούν να επιτελούν ένα πλήθος από διεργασίες και να λύνουν ικανοποιητικά πολλά προβλήματα.

Βιβλιογραφία

1. D. Purves, G. J. Augustine, D. Fitzpatrick, L. C. Katz, A. S. Lamantia, J. O. McNamara, Neuroscience, Sinauer Associates, Sutherland, Mass (1997).
2. G. Adelman and B. H. Smith, Elsevier's Encyclopedia of Neuroscience, Elsevier, Amsterdam (1997).
3. W. Penfield and T. Rasmussen, The cerebral cortex of man, McMillan, NY (1955).
4. A. L. Hodgkin and A. F. Huxley, A quantitative description of membrane current and its applications to conduction and excitation in nerve, J. Physiology (London),117,500(1952).
5. DAPRA Neural Network Study, AFCEA International Press, October 1987-February 1988 (1988).