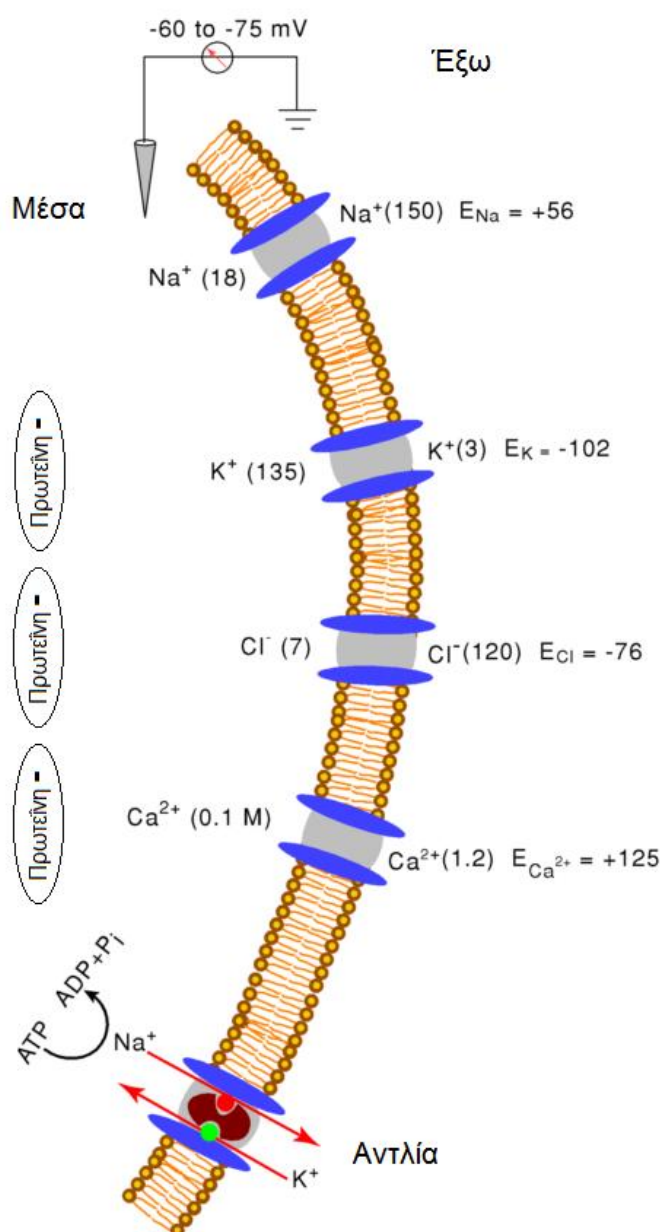


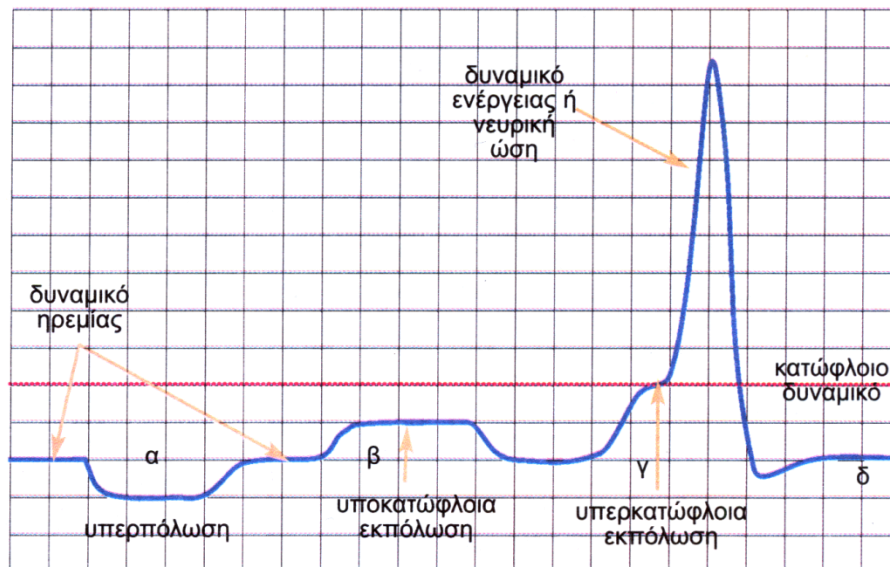
ΗΛΕΚΤΡΟΦΥΣΙΟΛΟΓΙΑ



Καθώς η κυτταρική μεμβράνη είναι αδιαπέραστη για τα περισσότερα μόρια, η συγκέντρωση των διαφόρων ουσιών είναι διαφορετικές στο εσωτερικό και το εξωτερικό κάθε κυττάρου. Στο εσωτερικό του κυττάρου υπάρχουν μεγάλες πρωτεΐνες που είναι αρνητικά φορτισμένες, καθώς και υψηλή συγκέντρωση ιόντων K^+ και χαμηλή συγκέντρωση ιόντων Na^+ . Στο εξωτερικό του κυττάρου δεν υπάρχουν πρωτεΐνες, η συγκέντρωση Na^+ είναι υψηλή και K^+ χαμηλή. Η διαφορά συγκέντρωσης του Na^+ και K^+ διατηρείται με τη βοήθεια μια ειδικής αντλίας ιόντων της κυτταρικής μεμβράνης που μεταφέρει 3 Na^+ προς τα έξω και 2 K^+ προς τα μέσα για κάθε μόριο ATP που καταναλώνει. Λόγω αυτής της ανισότητας (περισσότερα κατιόντα βγαίνουν από ότι μπαίνουν στο κύτταρο), και τις παρουσίες των αρνητικά φορτισμένων πρωτεϊνών, το εσωτερικό του κυττάρου είναι, υπό φυσιολογικές συνθήκες, αρνητικά φορτισμένο σε σχέση με το περιβάλλον του. Η διαφορά δυναμικού αυτή ονομάζεται **δυναμικό ηρεμίας**. Όλα τα κύτταρα έχουν αρνητικό δυναμικό ηρεμίας, το οποίο κυμαίνεται, ανάλογα με το είδος του κυττάρου, από -5mV ως -110mV (π.χ. νευρώνες: -70mV).

Μεταβολή του δυναμικού ηρεμίας προς πιο αρνητικές τιμές ονομάζεται *υπερπόλωση*, ενώ προς πιο θετικές *εκπόλωση*. Όλα τα κύτταρα έχουν τη δυνατότητα να επαναφέρουν το δυναμικό ηρεμίας τους αν αυτό μεταβληθεί από εξωτερικούς παράγοντες. Όμως, σε ορισμένα ήδη κυττάρων (νευρικά, μυϊκά), εκπόλωση πάνω από ένα όριο οδηγεί στη δημιουργία ενός ηλεκτρικού *παλμού* για το λόγω αυτό ονομάζονται *διεγέρσιμα*. Η διεγερσιμότητά τους οφείλεται στην παρουσία στην κυτταρική τους μεμβράνη ειδικών *τασσο-*

ελεγχόμενων πόρων (καναλιών) Na^+ και K^+ , το άνοιγμα των οποίων εξαρτάται από τη διαφορά δυναμικού στις δύο πλευρές της μεμβράνης (δυναμικό μεμβράνης).

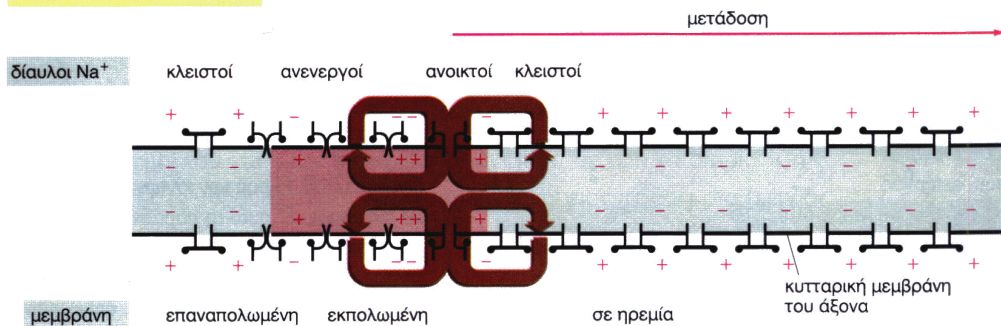


Όταν μια εκπόλωση ξεπεράσει μία κρίσιμη τιμή (κατώφλι ή ουδός, συνήθως -40mV), τότε ανοίγουν τα τασσελεγχόμενα κανάλια Na^+ και Na^+ αρχίζει να εισρέει στο κύτταρο. Αυτό οδηγεί το δυναμικό μεμβράνης σε απότομη αύξηση φτάνοντας τα $+30\text{mV}$ μέσα σε ελάχιστο χρόνο (1msec). Τα κανάλια Na^+ , όμως,

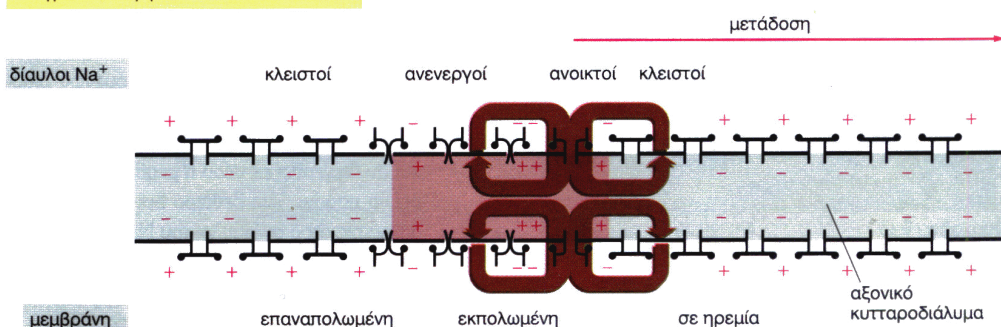
δεν μπορούν να παραμείνουν ανοιχτά πάνω από 1msec και απενεργοποιούνται. Τα απενεργοποιημένα κανάλια Na^+ δεν μπορούν να ξαναανοίξουν για ένα χρονικό διάστημα ($\sim 2\text{msec}$), το οποίο ονομάζεται *ανερέθιστη περίοδος*. Καθώς όμως αυξάνει το δυναμικό της μεμβράνης, ανοίγουν και τα τασσελεγχόμενα κανάλια K^+ , οπότε K^+ αρχίζει να βγαίνει από το κύτταρο. Η εκροή αυτή μειώνει ξανά το δυναμικό της μεμβράνης στην αρχική του τιμή (δυναμικό ηρεμίας), οπότε κλείνουν και τα κανάλια K^+ . Αυτή η σύντομης διάρκειας (συνολικά $\sim 2\text{msec}$) εναλλαγή του δυναμικού της μεμβράνης ονομάζεται **δυναμικό ενέργειας**. Οι αλλαγές στις συγκεντρώσεις Na^+ και K^+ λόγω της ροής τους κατά τη διάρκεια του δυναμικού ενέργειας επαναφέρονται με τη δράση της αντλίας Na^+/K^+ .

Η δημιουργία δυναμικού ενέργειας σε ένα σημείο της μεμβράνης εκπολώνει γειτονικές περιοχές πέρα από το κατώφλι, οπότε δημιουργούνται δυναμικά ενέργειας και σε αυ-

στιγμιαία άποψη σε $t = 0$

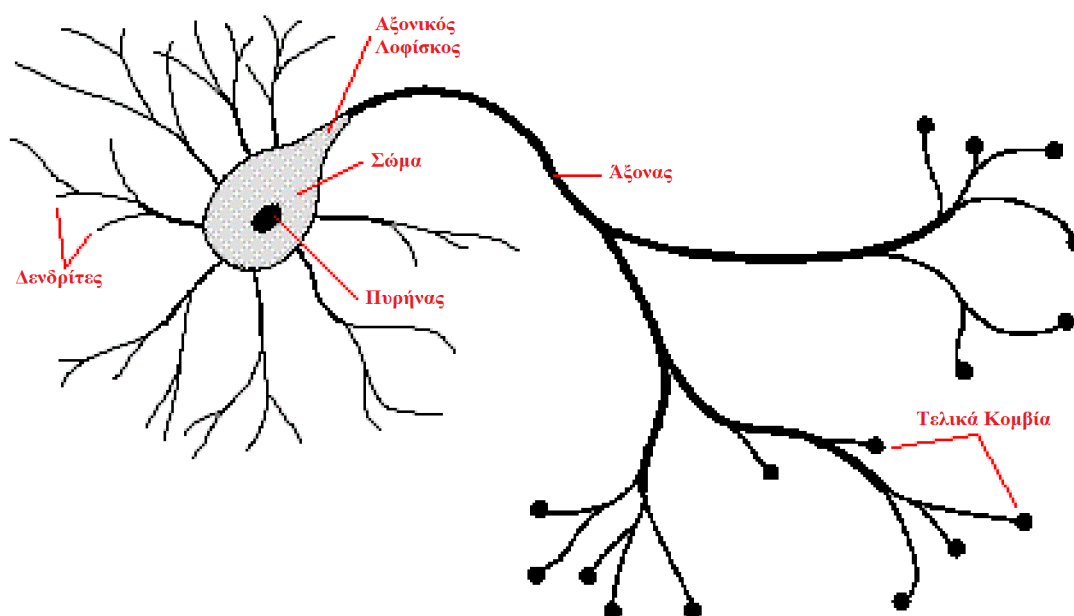


στιγμιαία άποψη σε $t = 1 \text{ millisecond}$



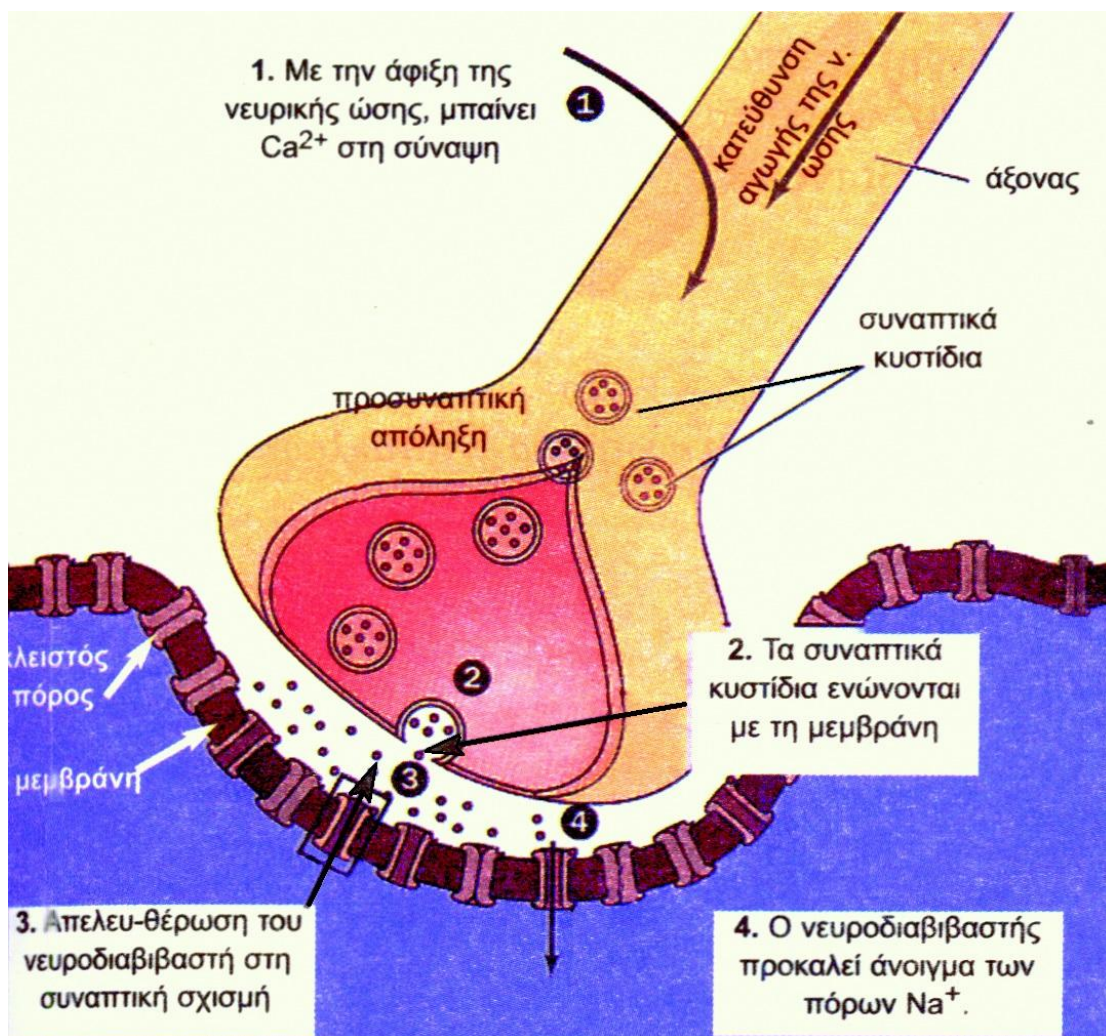
τές. Αυτά με τη σειρά τους θα εκπολώσουν παραπέρα περιοχές της μεμβράνης, που θα παράγουν δυναμικά ενέργειας. Με τον τρόπο αυτό το δυναμικό ενέργειας μεταδίδεται κατά μήκος της μεμβράνης. Η απενεργοποίηση των καναλιών Na^+ από το δυναμικό ενέργειας, απαγορεύει το «πισωγύρισμα» του σε περιοχή που έχει μόλις διεγερθεί.

Νευρικό Κύτταρο



Τα νευρικά κύτταρα ή νευρώνες αποτελούνται από το κυτταρικό σώμα, στο οποίο βρίσκονται όλα τα οργανίδια, και από ένα μεγάλο αριθμό αποφυάδων, με μεγάλο αριθμό διακλαδώσεων, που ονομάζονται δενδρίτες. Μία από τις αποφυάδες, όμως, διαφέρει: είναι μακρύτερη, παχύτερη, με σπάνιες διακλαδώσεις, εκτός από το τελικό άκρο της και ονομάζεται άξονας. Το σημείο του σώματος από το οποίο ξεκινά ο άξονας ονομάζεται αξονικός λοφίσκος. Στα άκρα των αξονικών απολήξεων υπάρχουν διογκώσεις που ονομάζονται τελικά κομβία. Το σώμα και οι δενδρίτες δεν έχουν τασεοελεγχόμενα κανάλια και έτσι δεν μπορούν να δημιουργήσουν δυναμικά ενέργειας. Αντίθετα ο αξονικός λοφίσκος και ο άξονας μπορούν. Όποιες υπερπολώσεις ή εκπολώσεις δημιουργηθούν στους δενδρίτες και το σώμα μεταδίδονται παθητικά (όπως το ρεύμα σε ένα καλώδιο) προς τον αξονικό λοφίσκο. Όταν το άθροισμά τους ξεπεράσει το κατώφλι, ο αξονικός λοφίσκος παράγει δυναμικό ενέργειας που μεταδίδεται κατά μήκος του άξονα μέχρι τα τελικά κομβία. Η ταχύτητα μετάδοσης είναι μεγαλύτερη σε παχύτερους άξονες και αυξάνει περεταίρω όταν ο άξονας περιβάλλεται από ένα ειδικό μονωτικό στρώμα που ονομάζεται μυελίνη.

Τα τελικά κομβία του άξονα είναι σε στενή επαφή με τους δενδρίτες ή το σώμα άλλων νευρικών κυττάρων. Η επαφή αυτή ονομάζεται **σύναψη**. Αν μεταξύ της μεμβράνης του τελικού κομβίου (προσυναπτική μεμβράνη) και της μεμβράνης του επόμενου νευρώνα (μετασυναπτική μεμβράνη) υπάρχουν **χασμοσύνδεσμοι** (δες κεφάλαιο 3), τότε το δυναμικό ενέργειας της προσυναπτικής μεμβράνης μπορεί να εκπολώσει απευθείας τη μετασυναπτική μεμβράνη. Αυτού του είδους η σύναψη ονομάζεται **ηλεκτρική** και είναι σπάνια. Στις περισσότερες περιπτώσεις όμως, προσυναπτική και μετασυναπτική μεμβράνη δε συνδέονται άμεσα, αλλά διαχωρίζονται από μια στενή λουρίδα εξωκυττάριου υγρού που ονομάζεται **συναπτική σχισμή**. Σε αυτή την περίπτωση, το δυναμικό ενέργειας (νευρική ώση) μεταδίδεται από τον ένα νευρώνα στον επόμενο με τη βοήθεια μιας χημικής ουσίας (νευροδιαβιβαστής). Αυτού του είδους η σύναψη ονομάζεται **χημική**.



Στα τελικά κομβία υπάρχουν πολλά κυστίδια γεμάτα με νευροδιαβιβαστή (π.χ. ακετυλοχολίνη ή νοραδρεναλίνη). Με την άφιξη του δυναμικού ενέργειας στο τελικό κομβίο ενεργοποιούνται ειδικά τασεοελεγχόμενα κανάλια Ca^{2+} που υπάρχουν μόνο σε αυτό. Το Ca^{2+} που εισρέει οδηγεί στην ένωση ορισμένων κυστιδίων με την κυτταρική μεμβράνη, οπότε ο νευροδιαβιβαστής ελευθερώνεται στη συναπτική σχισμή. Στη μετασυναπτική μεμβράνη, όμως, υπάρχουν ειδικοί πόροι (κανάλια) Na^+ : σύνδεση ενός μορίου νευροδιαβιβαστή σε μια ειδική θέση του καναλιού οδηγεί στο άνοιγμά του. Η επακόλουθη εισροή Na^+ στο μετασυναπτικό κύτταρο δημιουργεί μια τοπική εκπόλωση. Σε ορισμένες συνάψεις, ο νευροδιαβιβαστής ανοίγει κανάλια Cl^- αντί για Na^+ . Η εισροή Cl^- στο κύτταρο δημιουργεί μια τοπική υπερπόλωση. Συνάψεις που προκαλούν εκπόλωση ονομάζονται διεγερτικές, ενώ αν προκαλούν υπερπόλωση ανασταλτικές. Η δράση του νευροδιαβιβαστή διαρκεί πολύ λίγο, καθώς αυτός επαναπροσλαμβάνεται από το προσυναπτικό κύτταρο ή καταστρέφεται από ειδικά ένζυμα πολύ γρήγορα.

Νευρομυϊκή σύναψη

Νευρικά κύτταρα συνάπτονται και με μυϊκά. Η σύναψη γίνεται στο μέσο περίπου του μήκους της μυϊκής ίνας (=κυττάρου). Σε αντίθεση με τα νευρικά, τα μυϊκά κύτταρα έχουν την ικανότητα παραγωγής δυναμικών ενέργειας σε οποιοδήποτε σημείο τους. Η τοπική εκπόλωση που προκαλείται από το νευροδιαβιβαστή οδηγεί συνήθως στην παραγωγή δυναμικού ενέργειας που μεταδίδεται σε όλο το μήκος της μυϊκής ίνας. Η κυτταρική μεμβράνη της μυϊκής ίνας έχει ένα μεγάλο αριθμό σωληνοειδών εγκολπώσεων (σωληνάρια T) που διαπερνούν όλο το πάχος της και βοηθούν τη μετάδοση του δυναμικού ενέργειας. Τα σωληνάρια T είναι σε στενή επαφή με το ενδοπλασματικό δίκτυο. Το δυναμικό ενέργειας οδηγεί στο άνοιγμα ειδικών τασεοελεγχόμενων πόρων Ca^{2+} του ενδοπλασματικού δικτύου που απελευθερώνουν Ca^{2+} στο κυτταρόπλασμα, οδηγώντας στη σύσπαση της ίνας (δες κεφάλαιο 5).