



## Ηλεκτρική δραστηριότητα των κυττάρων

Στο εσωτερικό κάθε ζωντανού οργανισμού μπορούμε να καταγράψουμε ένα πλήθος από βιοηλεκτρικά δυναμικά, που σχετίζονται με τη λειτουργία συγκεκριμένων οργάνων, αλλά και με τη μεταφορά πληροφοριών από και προς το κεντρικό νευρικό σύστημα. Η καταγραφή και η επεξεργασία αυτής της ηλεκτρικής δραστηριότητας προσφέρει σημαντικές διαγνωστικές αλλά και προγνωστικές δυνατότητες στη σύγχρονη ιατρική. Για παράδειγμα αναφέρουμε το ηλεκτροκαρδιογράφημα, το εγκεφαλογράφημα ή το μυογράφημα. Η δημιουργία, διατήρηση και η μετάδοση αυτών των ηλεκτρικών δυναμικών στους οργανισμούς οφείλεται στην ηλεκτροχημική δραστηριότητα μιας συγκεκριμένης κατηγορίας κυττάρων, των λεγομένων διεγέρσιμων κυττάρων.

Ο συσχετισμός μεταξύ της δραστηριότητας οργάνων ή μυϊκών ιστών με τον ηλεκτρισμό άρχισε από πολύ παλιά. Ενδεικτικά μπορούμε να αναφερθούμε στο “ζωικό ηλεκτρισμό” που επινόησε ο Galvani (18<sup>ος</sup> αιώνας) για να ερμηνεύσει την προκαλούμενη από ηλεκτρισμό σύσπαση των μυών του βατράχου, καθώς και τη διαμάχη του για το θέμα αυτό με τον Volta.

### 1.1. Κυτταρικές μεμβράνες

Το κύτταρο είναι η βασική δομή κάθε γνωστού είδους ζωής. Στο κύτταρο εκτελούνται οι θεμελιώδεις λειτουργίες της βιοσύνθεσης, του χημι-

κού μεταβολισμού καθώς και η αποθήκευση της ενέργειας στη μορφή του μορίου ATP. Το κύτταρο, για την πραγματοποίηση όλων αυτών των λειτουργιών, αλληλεπιδρά συνεχώς με το περιβάλλον του διαμέσου της κυτταρικής μεμβράνης. Η κυτταρική μεμβράνη διαχωρίζει το εσωτερικό από το εξωτερικό του κυττάρου και έχει πάχος περίπου 10 nm.

Οι μεμβράνες δεν είναι παθητικές ημιδιαπερατές διαχωριστικές επιφάνειες, αλλά έχουν έναν άμεσο και σημαντικό ρόλο σε όλες τις λειτουργίες του κυττάρου. Μεταξύ των άλλων, οι βιολογικές μεμβράνες μεταφέρουν ενεργά και επιλεκτικά ουσίες μέσα και έξω από το κύτταρο, και μάλιστα αντιτιθέμενες στο χημικό και στο ηλεκτρικό δυναμικό που συνήθως υπάρχει εκατέρωθεν της μεμβράνης, μετέχουν στη διαδικασία της φωτοσύνθεσης καθώς και στην αποθήκευση ενέργειας στο μόριο του ATP.

Η κύρια λειτουργία που θα μας απασχολήσει εδώ είναι η βιοηλεκτρική δραστηριότητα, δηλαδή η δημιουργία και η μετάδοση των βιοδυναμικών.

Οι βιολογικές μεμβράνες αποτελούνται κύρια από λίπη και πρωτεΐνες. Συνήθως, κοντά στα μόρια των πρωτεϊνών σχηματίζονται “κανάλια” και “πύλες” στην επιφάνεια της μεμβράνης, μέσω των οποίων μπορούν να περάσουν από τη μια πλευρά της μεμβράνης στην άλλη ιόντα και συγκεκριμένα είδη μορίων. Η διαπερατότητα της μεμβράνης συνήθως διαχωρίζεται στην “παθητική” και στην “ενεργητική” διαπερατότητα. Για τα φαινόμενα παθητικής διαπερατότητας η μεμβράνη θεωρείται απλά σαν μια ημιδιαπερατή μεμβράνη μεταξύ δύο διαλυμάτων διαφορετικών συγκεντρώσεων (οσμωτικό φαινόμενο). Στην περίπτωση που στα διαλύματα υπάρχουν και ιόντα, τότε εκτός από το λεγόμενο “χημικό δυναμικό” (λόγω των διαφορετικών συγκεντρώσεων σε κάθε διάλυμα), πρέπει να συνυπολογιστεί και η ύπαρξη του ηλεκτρικού δυναμικού (λόγω των ιόντων). Έτσι λοιπόν περιμένει κανείς να εμφανιστούν φαινόμενα διάχυσης τα οποία να οδηγούν σε μια κατάσταση ελάχιστης ενέργειας βάσει των ηλεκτροχημικών δυναμικών που αναπτύσσονται και αυτό ακριβώς ονομάζεται παθητική διαπερατότητα.

Ωστόσο στα ζωντανά κύτταρα υπάρχει σε σταθερή κατάσταση, μια μεγάλη ανομοιογένεια όσον αφορά στις συγκεντρώσεις των  $\text{Na}^+$ ,  $\text{K}^+$ ,  $\text{Cl}^-$  μεταξύ του εσωτερικού και του εξωτερικού του κυττάρου. Συγκεκριμένα η συγκέντρωση των ιόντων  $\text{K}^+$  στο εσωτερικό είναι 10 με 20 φορές μεγαλύτερη από την αντίστοιχη συγκέντρωση στο εξωτερικό και οι συγκεν-

τρώσεις  $\text{Na}^+$  και  $\text{Cl}^-$  στο εξωτερικό είναι πολύ μεγαλύτερες από τις αντίστοιχες στο εσωτερικό. Συνεπώς φαίνεται ότι η διαπερατότητα της μεμβράνης στα ιόντα είναι εκλεκτική και όχι παθητική. Αυτή η ανομοιογένεια στις συγκεντρώσεις των φορτισμένων σωματιδίων είναι υπεύθυνη για τη διαφορά δυναμικού που το κύτταρο παρουσιάζει στην κατάσταση ηρεμίας. Συγκεκριμένα, στη λεγόμενη κατάσταση ηρεμίας (απουσία εξωτερικού ερεθίσματος) το εσωτερικό του κυττάρου έχει ένα ηλεκτρικό δυναμικό περίπου  $-80 \text{ mV}$  σχετικά με το εξωτερικό του. Υπάρχει δηλαδή μια μη μηδενική διαμεμβρανική διαφορά δυναμικού, που οφείλεται στις διαφορετικές συγκεντρώσεις ιόντων εκατέρωθεν της μεμβράνης.

Προφανώς αυτό αντιβαίνει στην κατάσταση ελάχιστης ενέργειας που θα περίμενε κανείς να υπάρχει εκατέρωθεν της μεμβράνης, όπως αναλύθηκε παραπάνω. Πιο συγκεκριμένα, χρειάζεται κατανάλωση ενέργειας για να διατηρούνται οι συγκεκριμένες συγκεντρώσεις των ιόντων, ενάντια στα ηλεκτροχημικά δυναμικά, που οι διαφορετικές αυτές συγκεντρώσεις δημιουργούν. Η ενέργεια αυτή προσφέρεται από τη διάσπαση του μορίου του ATP, της ενεργειακής αποθήκης δηλαδή του κυττάρου. Μέσω της ενέργειας αυτής δραστηριοποιείται ο μηχανισμός της ενεργητικής διαπερατότητας της μεμβράνης. Ο συγκεκριμένος μηχανισμός μέσω του οποίου πραγματοποιείται η επιλεκτική μεταφορά των ιόντων εκατέρωθεν της μεμβράνης ονομάζεται "αντλία καλίου - νατρίου". Η αντλία καλίου-νατρίου είναι δηλαδή, σε τελική ανάλυση, ενεργειακά υπεύθυνη για τη δημιουργία και τη διατήρηση των διαφορετικών συγκεντρώσεων των ιόντων εκατέρωθεν της μεμβράνης και άρα για τη διαμεμβρανική τάση που παρουσιάζεται.

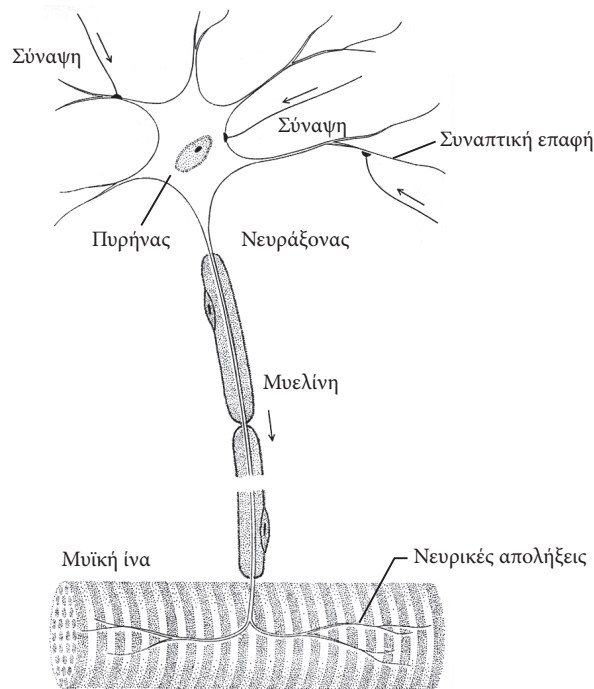
Συνοψίζοντας, υπάρχει στην κατάσταση ηρεμίας μια διαμεμβρανική τάση από  $-50$  μέχρι  $-100 \text{ mV}$  ανάλογα με το εξωτερικό μέσο. Αυτή η διαφορά δυναμικού οφείλεται στις διαφορετικές συγκεντρώσεις ιόντων στα διαλύματα εκατέρωθεν της μεμβράνης. Το φαινόμενο είναι σύνθετο και οι κυριότεροι παράγοντες που το επηρεάζουν είναι (α) οι κλίσεις διάχυσης που αναπτύσσονται λόγω της διαφορετικής συγκέντρωσης των ιόντων (β) οι ηλεκτρικές δυνάμεις που αναπτύσσονται (γ) η εκλεκτική διαπερατότητα της μεμβράνης και (δ) η αντλία καλίου-νατρίου που αποκαθιστά και συντηρεί αυτή τη διαφορά δυναμικού.

## 1.2. Νευρικό σύστημα

Το νευρικό σύστημα στους αναπτυγμένους οργανισμούς χωρίζεται στο κεντρικό (εγκέφαλος και νωτιαίος μυελός) και το περιφερειακό νευρικό σύστημα (υπάρχουν βέβαια και τα “αυτόνομα” γάγγλια, που ρυθμίζουν ανεξάρτητα από τον εγκέφαλο τη λειτουργία συγκεκριμένων οργάνων και την κυκλοφορία του αίματος). Τα εξωτερικά ερεθίσματα ανιχνεύονται από συγκεκριμένα κύτταρα αισθητήρες, τα οποία είναι ειδικευμένα για κάθε συγκεκριμένη αίσθηση (όραση, ακοή, όσφρηση, αφή, γεύση) που ακολούθως τα μετατρέπουν σε μικρές διαφορές δυναμικού, σε νευρικές ώσεις. Η νευρική αυτή διέγερση ή νευρική ώση, διαδίδεται μέσω νευρικών ινών που ονομάζονται νευράξονες. Με άλλα λόγια το νευρικό σήμα είναι μια χαμηλή διαφορά δυναμικού που διαδίδεται κατά μήκος του νευράξονα. Με τον τρόπο αυτό μεταφέρεται η πληροφορία από τα αισθητήρια όργανα προς το κεντρικό νευρικό σύστημα, όπου οι πληροφορίες αυτές “ολοκληρώνονται” και όπου τελικά λαμβάνεται ενδεχόμενα η απόφαση που πηγάζει από το συγκεκριμένο ερέθισμα. Με ανάλογο τρόπο, από το κεντρικό νευρικό σύστημα μεταφέρεται η πληροφορία της απάντησης, δηλαδή της απόκρισης στο συγκεκριμένο ερέθισμα προς τους μυϊκούς ή αδενικούς ιστούς.

Το δομικό στοιχείο του νευρικού συστήματος είναι το νευρικό κύτταρο (νευρώνας), το οποίο αποτελείται από το κυρίως κυτταρικό σώμα, τους πολυάριθμους δενδρίτες που διασκορπίζονται γύρω από την κεντρική περιοχή του κυττάρου και το μοναδικό (ανά νευρικό κύτταρο) νευράξονα (σχήμα 1.1). Η επικοινωνία μεταξύ δύο νευρικών κυττάρων ή μεταξύ νευρικού κυττάρου και μυϊκού ή αδενικού ιστού γίνεται μέσω των συνάψεων. Από κάθε νευρικό κύτταρο το σήμα που “εκπέμπεται” διαδίδεται κατά μήκος του νευράξονα.

Τα νευρικά κύτταρα ανήκουν στην κατηγορία των λεγόμενων διεγερσιμων κυττάρων. Αντιδρούν στον ηλεκτρισμό και έχουν τη δυνατότητα να παράγουν ηλεκτρισμό, συνεπώς λειτουργούν τόσο σαν πομποί όσο και σαν δέκτες πληροφορίας.



**Σχήμα 1.1:** Διάγραμμα του νευρικού κυττάρου (νευρώνα).

### 1.3. Παραγωγή και διάδοση της νευρικής ώσης

Στην κατάσταση ηρεμίας τα διεγέρσιμα κύτταρα έχουν ένα διαμεμβρανικό δυναμικό γνωστό σαν “παραμένον” ή “παθητικό” ή δυναμικό ηρεμίας. Συγκεκριμένα το εσωτερικό του κυττάρου βρίσκεται σε δυναμικό περίπου  $-80$  mV, σε σχέση με το εξωτερικό μέρος του κυττάρου (παράγραφος 1.1). Όταν το κύτταρο διεγερθεί κατάλληλα, τότε αλλάζει η πολικότητα της διαμεμβρανικής διαφοράς δυναμικού. Συγκεκριμένα παίρνει περίπου την τιμή  $+40$  mV, δυναμικό που ονομάζεται “ενεργό” δυναμικό. Λέμε τότε ότι η κυτταρική μεμβράνη “εκπολώνεται” διότι χάνει την πόλωση της. Αυτή η διαδικασία εκπόλωσης της μεμβράνης είναι τοπική (δηλαδή στο σημείο όπου εμφανίζεται το εξωτερικό ερέθισμα) αλλά αφού δημιουργηθεί, διαδίδεται κατά μήκος του νευράξονα. Η ταχύτητα διάδοσης αυτής της νευρικής ώσης είναι από  $0,1$  m/s μέχρι  $100$  m/s ανάλογα με τη λειτουργία, τη θέση και το μέγεθος του συγκεκριμένου νεύρου. Στη διαδι-

κασία μετάδοσης αυτής της ηλεκτρικής μεταβολής, μετά από σύντομο χρονικό διάστημα, η μεμβράνη τοπικά επαναπολώνεται, αποκτά δηλαδή ξανά το δυναμικό ηρεμίας και είναι και πάλι έτοιμη να διεγερθεί.

Απομονώνοντας μεγάλου μήκους νευράξονες από συγκεκριμένα είδη οργανισμών (π.χ. από μεγάλα καλαμάρια) δόθηκε η δυνατότητα να παρατηρηθούν οι ηλεκτρικές δραστηριότητες και ο τρόπος με τον οποίο η ηλεκτρική διέγερση μεταδίδεται κατά μήκος του νευράξονα. Η διέγερση στα πειράματα είναι εξωτερική, με την απευθείας τοπική εφαρμογή μιας διαφοράς δυναμικού στη μεμβράνη.

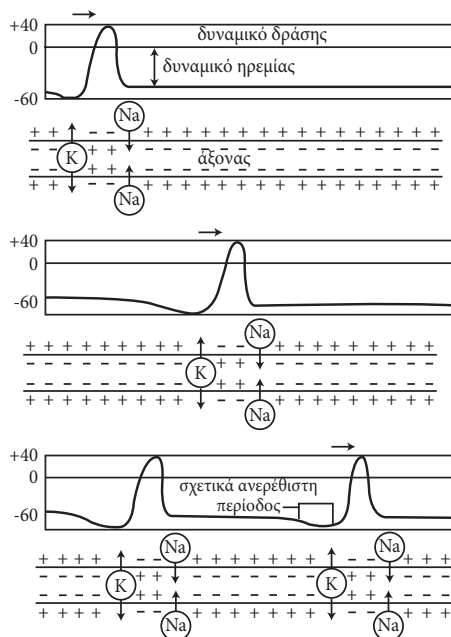
Από τα πειράματα αυτά έχει βγει το συμπέρασμα ότι για να διεγερθεί ο νευράξονας χρειάζεται μια ελάχιστη ποσότητα εξωτερικής ηλεκτρικής διέγερσης. Όταν η εξωτερική διέγερση είναι μικρότερη από αυτήν την ελάχιστη τιμή, τότε το νευρικό κύτταρο δε διεγείρεται καθόλου. Εξωτερική διέγερση μεγαλύτερη από αυτήν την ελάχιστη τιμή δεν προκαλεί απόκριση μεγαλύτερης έντασης στο νευρικό κύτταρο, ούτε απόκριση μεγαλύτερης χρονικής διάρκειας. Αυτή η συμπεριφορά, δηλαδή η δυαδική κατάσταση του κυττάρου πριν και μετά το “κατώφλι διέγερσης”, ονομάζεται νόμος του “όλα ή τίποτα”.

Μια από τις συνέπειες του νόμου “όλα ή τίποτα” είναι ότι οι διαβαθμίσεις μιας πληροφορίας, για παράδειγμα στην ένταση των μυϊκών συσπάσεων, δεν οφείλονται σε διαφορετικές έντασης διεγέρσεις του ίδιου νευρικού κυττάρου, αλλά στον αριθμό των νευρικών κυττάρων που διεγείρονται, και κυρίως στον ρυθμό επανάληψης της διέγερσης τους. Έτσι λοιπόν το νευρικό σύστημα λειτουργεί με βάση μάλλον κβαντικές παρά συνεχείς παραμέτρους. Η λειτουργία του νευρικού συστήματος μπορεί να προσομοιωθεί με ένα μάλλον ψηφιακό παρά αναλογικό σύστημα επικοινωνίας, το οποίο αποτελείται από ένα πλήθος καναλιών, που μεταφέρουν απλά μια δυαδική πληροφορία με τη βοήθεια μιας κυματομορφής, καθώς και τον ρυθμό επανάληψης της κυματομορφής που στέλνεται.

Αμέσως μετά από μια νευρική ώση (διέγερση) το νευρικό κύτταρο βρίσκεται στη λεγόμενη “απόλυτα ανερέθιστη περίοδο” και δε μπορεί να ξαναδιεγερθεί. Αυτή η περίοδος ακολουθείται από τη “σχετικά ανερέθιστη περίοδο” στην οποία το κατώφλι για την επαναδιέγερση του νευρικού κυττάρου είναι αυξημένο. Η ύπαρξη της απόλυτα ανερέθιστης περιόδου δημιουργεί ένα ανώτερο όριο στον ρυθμό επαναδιέγερσης της μεμ-

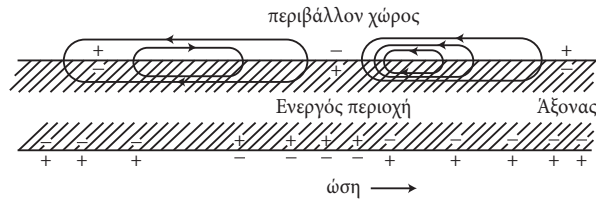
βράνης. Συγκεκριμένα, ένα ερέθισμα πρέπει να απέχει χρονικά από το προηγούμενο τουλάχιστον 1 ms. Αυτό σημαίνει ότι η μέγιστη συχνότητα διέγερσης είναι περίπου 1 KHz.

Αυτή η ηλεκτρική συμπεριφορά της μεμβράνης εξηγείται από το γεγονός ότι οι εκλεκτικές διαφοροποιήσεις της διαμεμβρανικής αγωγιμότητας εμπλέκουν χρονική αδράνεια, κύρια λόγω της κίνησης των αντίστοιχων ιόντων. Έτσι, όταν εφαρμόζεται το επαρκές εξωτερικό ερέθισμα στη μεμβράνη, διαφοροποιείται η διαμεμβρανική αγωγιμότητα στα ιόντα  $\text{Na}^+$  (σχήμα 1.2). Σαν αποτέλεσμα τα ιόντα του Na από την εξωτερική πλευρά της μεμβράνης εισβάλλουν στην εσωτερική πλευρά σε μικρό αλλά πεπερασμένο χρόνο. Ακολούθως, στη διαδικασία επαναπόλωσης της μεμβράνης, αυξάνεται η διαπερατότητα της μεμβράνης στα ιόντα  $\text{K}^+$  με αντίστοιχη χρονική εξέλιξη. Όταν ολοκληρωθούν οι μετακινήσεις αυτές, η μεμβράνη αποκτά ξανά το δυναμικό ηρεμίας και τότε μόνον είναι έτοιμη να διεγερθεί ξανά.

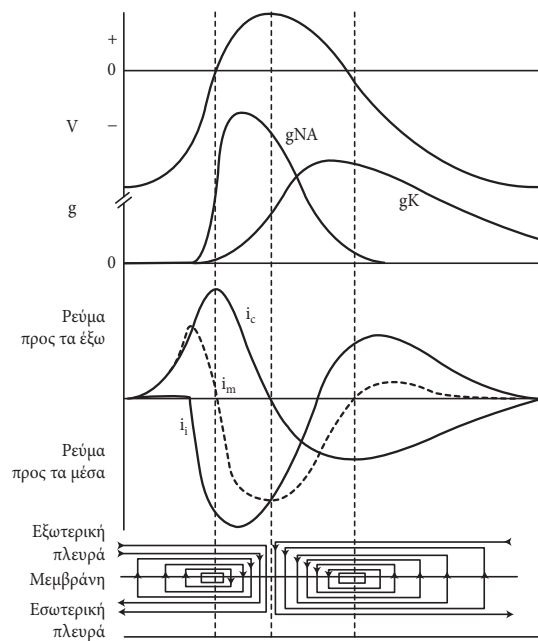


**Σχήμα 1.2:** Η διάδοση της νευρικής ώσης οφείλεται σε μεταβολές των διαμεμβρανικών αγωγιμοτήτων για τα ιόντα που υπάρχουν εκατέρωθεν της μεμβράνης. Με τον τρόπο αυτό αλλάζει η τοπική πολικότητα της διαμεμβρανικής τάσης, η αλλαγή της οποίας οποία διεγείρει τις παρακείμενες περιοχές.

Η εκπόλωση της μεμβράνης δημιουργεί ρεύματα τα οποία κλείνουν μέσω και του εξωτερικού περιβάλλοντος (σχήμα 1.3). Συνεπώς τα ρεύματα αυτά διεγείρουν κάθε φορά το επόμενο τμήμα της μεμβράνης και έτσι δημιουργείται μια “αυτοδιεγειρόμενη διαδικασία”. Στο σχήμα 1.4 φαίνεται η μεταβολή στις αγωγιμότητες των ιόντων, στη διάρκεια διάδοσης της νευρικής ώσης, καθώς και τα ρεύματα που ρέουν διαμέσου της μεμβράνης.



**Σχήμα 1.3:** Η κατανομή των φορτίων και τα ρεύματα στη γειτονιά της ενεργής περιοχής μιας μεμβράνης.



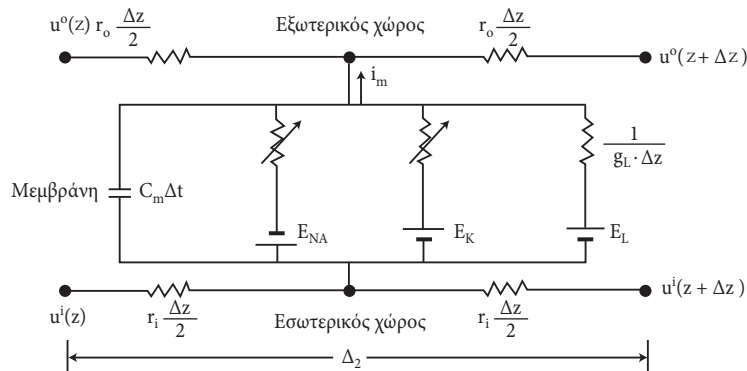
**Σχήμα 1.4:** Στη διάρκεια διάδοσης της νευρικής ώσης, αλλάζουν οι διαμεμβρανικές αγωγιμότητες και τα ιόντα (ρεύματα) διαπερνούν τη μεμβράνη. Στο σχήμα φαίνεται το δυναμικό της μεμβράνης, μετά οι αγωγιμότητες και τα ρεύματα που ρέουν, και τέλος τα αντίστοιχα ρεύματα που δημιουργούνται.



Συνοψίζοντας λοιπόν, όταν η διέγερση υπερβαίνει το συγκεκριμένο κατώφλι διέγερσης, δημιουργείται ένα “κύμα μεταβολής του δυναμικού ηρεμίας”, το οποίο (α) συνίσταται σε μια βραχύχρονη άρση του δυναμικού ηρεμίας, (β) η διάρκεια του και η ένταση του είναι ανεξάρτητες από το ερέθισμα και (γ) η ένταση του είναι αμετάβλητη κατά τη διάδοση του κατά μήκος του κυττάρου. Το φαινόμενο οφείλεται στην ενεργό μεταβολή των διαμεμβρανικών αγωγιμοτήτων, δηλαδή στην επιλεκτική διαπερατότητα της μεμβράνης.

Η συγκέντρωση συνολικά διαφορετικών προσήμων ιόντων εκατέρωθεν της μεμβράνης μας δίνει τη δυνατότητα να προσομοιάσουμε τη μεμβράνη σαν έναν πυκνωτή. Από τη μια και την άλλη πλευρά της μεμβράνης παρατηρούνται όμως φαινόμενα “διαρροής” των ιόντων. Παρουσιάζεται μια διαφορετική διαμεμβρανική αγωγιμότητα για κάθε κατηγορία ιόντων, και οι αγωγιμότητες αυτές είναι χρονικά μεταβαλλόμενες.

Θα μπορούσε η μετάδοση της νευρικής ώσης κατά μήκος της μεμβράνης να προσομοιωθεί με τη μετάδοση ηλεκτρικής ενέργειας σε μια γραμμή μεταφοράς, ωστόσο με μια σημαντική διαφορά. Επειδή η ηλεκτρική αντίσταση της μεμβράνης ανά μονάδα μήκους είναι πάρα πολύ μεγάλη, εάν δεν υπήρχε ο ενεργός αυτός αναγεννητικός μηχανισμός επαναδιέγερσης, θα είχαμε μια άμεση απόσβεση του σήματος και αδυναμία διάδοσης. Χαρακτηριστικές τιμές των ηλεκτρικών μεγεθών της μεμβράνης: η επιφανειακή αντίσταση της μεμβράνης είναι της τάξης των  $K\Omega/cm^2$ , η αντίστοιχη χωρητικότητα της τάξης των  $\mu F/cm^2$  και η “διαμήκης” αντίσταση του εξωτερικού μέσου της τάξης των εκατοντάδων  $\Omega/cm$ . Με τις τιμές αυτές η νευρική ώση δε θα μεταδιδόταν ούτε για αποστάσεις της τάξης λίγων εκατοστών. Το μοντέλο της γραμμής μεταφοράς που θα επέτρεπε την αξιόπιστη και χωρίς απώλειες μετάδοση της νευρικής ώσης θα έπρεπε να είναι ένα είδος “ενεργής” γραμμής μεταφοράς και όχι η συνηθισμένη “παθητική” γραμμή μεταφοράς. Έτσι λοιπόν στο ισοδύναμο ανά μονάδα μήκους θεωρούμε ότι υπάρχουν και χρονικά μεταβαλλόμενες “πηγές ιόντων”, που προσομοιώνουν τις αντλίες που αποκαθιστούν και διατηρούν τις συγκεκριμένες πυκνότητες των ιόντων εκατέρωθεν της μεμβράνης. Στο σχήμα 1.5 παρουσιάζεται ένα απλό ηλεκτρικό ισοδύναμο μοντέλο (ανά μονάδα μήκους) της μεμβράνης, σύμφωνα με την ανάλυση που έχει προηγηθεί.



**Σχήμα 1.5:** Ένα απλό ανά μονάδα μήκους ισοδύναμο μοντέλο της γραμμής μεταφοράς, με την οποία προσομοιώνουμε τον νευράξονα.

#### 1.4. Συνάψεις και νευροδιαβιβαστές

Όπως έχουμε ήδη αναφέρει, η επικοινωνία μεταξύ του νευρικού κυττάρου και του υποδοχέα του (κάποιο άλλο νευρικό κύτταρο, μυϊκός ή αδενικός ιστός) γίνεται μέσω των συνάψεων. Στο λεγόμενο συναπτικό χάσμα υπάρχουν δύο τρόποι για τη συνέχιση της διάδοσης της πληροφορίας, ο ηλεκτρικός και ο χημικός. Στην περίπτωση που το συναπτικό χάσμα είναι πολύ μικρό, έτσι ώστε να υπάρχει ηλεκτρική συνέχεια μεταξύ της απόληξης του νευράξονα και του υποδοχέα του, τότε η διαδικασία της μεταφοράς της πληροφορίας παραμένει ηλεκτρική. Η νευρική ώση δηλαδή διαδίδεται από το ένα κύτταρο στο επόμενο με ανάλογο όπως προηγούμενα τρόπο.

Στην περίπτωση όμως που οι διαστάσεις του συναπτικού χάσματος δεν επιτρέπουν την ηλεκτρική συνέχεια, τότε συμβαίνει ένα σύνθετο ηλεκτροχημικό φαινόμενο, μέσω του οποίου αποκαθίσταται η επικοινωνία των δύο κυττάρων. Συγκεκριμένα η άφιξη της νευρικής ώσης στην άκρη του νευράξονα απελευθερώνει κάποια ποσότητα συγκεκριμένων ουσιών, των λεγόμενων νευροδιαβιβαστών. Η απελευθέρωση των νευροδιαβιβαστών ανιχνεύεται από το επόμενο νευρικό κύτταρο. Η ανίχνευση

αυτή γίνεται από συγκεκριμένα μόρια “υποδοχείς”, οι οποίοι με τη σειρά τους “ανοίγουν” κάποια επιλεκτικά κανάλια στη μεμβράνη, αλλάζοντας ουσιαστικά τη διαπερατότητα της μεμβράνης στα ιόντα και δημιουργώντας έτσι την εκπόλωση της μεμβράνης. Ο κυριότερος (γνωστός μέχρι σήμερα) νευροδιαβιβαστής είναι η ακετυλοχολίνη.

Έτσι λοιπόν μέσω των νευροδιαβιβαστών γίνεται η μετάβαση του νευρικού σήματος από τη μια στην άλλη πλευρά του συναπτικού χάσματος. Στο επίπεδο δηλαδή που διακόπτεται η ανατομική συνέχεια ανάμεσα στο νευρώνα και στον υποδοχέα του, η χημεία παίρνει πια τη θέση του ηλεκτρισμού για τη διαβίβαση της νευρικής ώσης.

Στο επίπεδο αυτής της ηλεκτροχημικής μετατροπής επεμβαίνουν τα λεγόμενα “χημικά όπλα” καθώς και μια σειρά από δηλητήρια. Αυτά είτε δεν επιτρέπουν την απελευθέρωση συγκεκριμένων νευροδιαβιβαστών είτε “μπλοκάρουν” τους αντίστοιχους υποδοχείς τους. Συνέπεια είναι η αδυναμία της μετάδοσης της νευρικής πληροφορίας και έτσι (ανάλογα με την ουσία) προκαλείται ή παράλυση (για τους νευροδιαβιβαστές στους μυϊκούς ιστούς), ή υπολειτουργία συγκεκριμένων οργάνων.

Τέλος, ας σημειώσουμε ότι οι συνάψεις με τον τρόπο που λειτουργούν έχουν και το ρόλο βαλβίδων, δηλαδή επιτρέπουν τη μονόδρομη μεταφορά πληροφορίας. Με τον τρόπο αυτό η νευρική ώση διαδίδεται μόνο προς μια κατεύθυνση κατά μήκος του νευρικού συστήματος, για παράδειγμα από το κεντρικό νευρικό σύστημα προς το κινητήριο νεύρο ή τη μυϊκή ίνα και όχι αντίστροφα.

## 1.5. Βιβλιογραφία

1. Bernard Katz, Nerve Muscle and Synapse, McGraw-Hill, 1966.
2. J. Webster, Medical Instrumentation: Application and Design, Houghton Mifflin Company, Boston 1978.
3. Russell K. Hobbie, Intermediate Physics for Medicine and Biology John Wiley & Sons, 1988.
4. Jean-Pierre Changeux, Ο Νευρωνικός Άνθρωπος, Εκδόσεις Ράππα, 1894.
5. M.V.Volkenshtein, Biophysics, MIR Publishers, Moscow 1983.
6. Επιστημονική σκέψη 1900-1960, Επιμέλεια R. Harre, Μορφωτικό Ίδρυμα Εθνικής Τράπεζας, Αθήνα 1989.