

## 2. Μεμβρανικά δυναμικά του νευρικού κυττάρου

### **Στόχοι κατανόησης:**

- Διαφορά δυναμικού της κυτταρικής μεμβράνης ενός νευρικού κυττάρου: Τί είναι; Πώς δημιουργείται; Ποιά είδη διαφοράς δυναμικού της μεμβράνης ενός κυττάρου αναφέραμε; Τί είναι δυναμικό ηρεμίας, κατώφλιο δυναμικό, δυναμικό ενεργείας.
- Τί είναι διεγέριμο κύτταρο; Ποια είδη διεγέρισμων κυττάρων αναφέραμε;
- Τί είναι πόλωση, εκπόλωση, υπερπόλωση;
- Σε τί διαφέρουν εκπολώσεις της μεμβράνης κάτω και πάνω από το κατώφλιο δυναμικό;

### **2.1. Τι είναι δυναμικό:**

Στον ηλεκτρισμό όταν σε ένα σημείο του χώρου υπάρχει περίσσεια είτε θετικού είτε αρνητικού ηλεκτρικού φορτίου τότε το σημείο αυτό έχει κάποιο δυναμικό, αφού όταν στο σημείο αυτό πλησιάσω ένα ηλεκτρικό φορτίο τότε θα ασκηθεί επάνω σε αυτό μία δύναμη. Π.χ. αν πλησιάσω ένα θετικό ηλεκτρικό φορτίο σε ένα θετικά φορτισμένο σημείο τότε στο φορτίο θα ασκηθεί απωστική δύναμη (τα ομόνυμα απωθούνται), ενώ αν το ίδιο φορτίο το πλησιάσω σε ένα αρνητικά φορτισμένο σημείο τότε σε αυτό θα ασκηθεί ελκτική δύναμη (τα ετερόνυμα έλκονται).

### **2.2. Τι είναι διαφορά δυναμικού:**

Όταν δυο σημεία του χώρου έχουν διαφορετικά ηλεκτρικά δυναμικά, δηλαδή διαφορετική συσσώρευση φορτίου, τότε λέμε ότι μεταξύ των σημείων αυτών υπάρχει *διαφορά δυναμικού*.

### **2.3. Τι είναι διεγέριμο κύτταρο:**

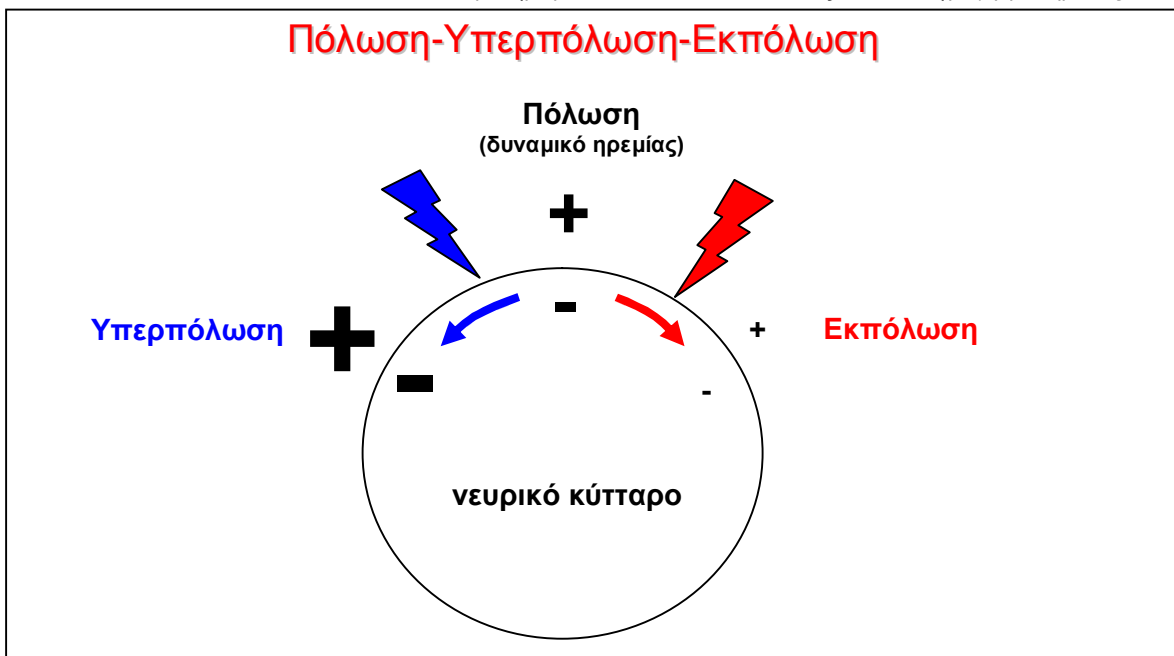
Σε όλα τα κύτταρα υπάρχει διαφορά δυναμικού μεταξύ του εσωτερικού και του εξωτερικού της κυτταρικής μεμβράνης που είναι γνωστή ως *διαφορά δυναμικού* της κυτταρικής μεμβράνης ή πιο απλά ως *μεμβρανικό δυναμικό*. Με άλλα λόγια η μεμβράνη των κυττάρων χαρακτηρίζεται από μια *πόλωση*, μια διαφορά δυναμικού μεταξύ του εσωτερικού και του εξωτερικού της κυτταρικής μεμβράνης. Η διαφορά αυτή του δυναμικού είναι χαρακτηριστική για κάθε είδος κυττάρου και έχει μέγεθος λίγα millivolt (mV).

Μολονότι όλα τα κύτταρα του σώματός μας είναι *πολυμένα*, έχουν δηλαδή μια διαφορά δυναμικού στην κυτταρική τους μεμβράνη δεν είναι όλα τους *διεγέριμα*.

**Διεγέριμο κύτταρο** είναι το κύτταρο εκείνο το οποίο μπορεί να ανταποκρίνεται σε ένα ερέθισμα που δέχεται με παραγωγή ηλεκτρικού σήματος που μεταφέρεται αμείωτο κατά μήκος της μεμβράνης.

Διεγέριμα κύτταρα είναι τα νευρικά κύτταρα, τα μυϊκά κύτταρα και πολλά κύτταρα αισθητηρίων υποδοχέων.

Τα διεγέριμα κύτταρα απαντούν σε ερεθίσματα που δέχονται μεταβάλλοντας το δυναμικό της μεμβράνης τους είτε αυξάνοντάς το (*υπερπόλωση*) είτε μειώνοντάς το (*εκπόλωση*) (βλέπε σχήμα 1). Όταν ένα κύτταρο δεν δέχεται κανένα ερέθισμα τότε η διαφορά δυναμικού της κυτταρικής του μεμβράνης ονομάζεται **δυναμικό ηρεμίας**. Το δυναμικό ηρεμίας εξαρτάται από το είδος του κυττάρου και κυμαίνεται από -50 μέχρι -150 mV με ηλεκτρικότερο πάντα το εσωτερικό του κυττάρου.

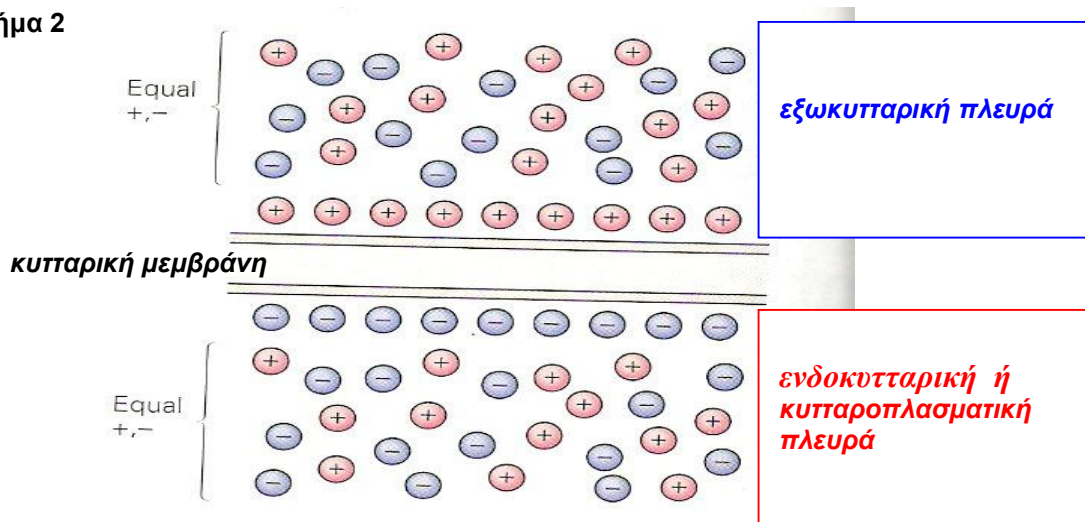


Σχήμα 1: Πόλωση, υπερπόλωση και εκπόλωση ενός νευρικού κυττάρου.

**2.4. Πώς δημιουργείται το δυναμικό ηρεμίας ενός νευρικού κυττάρου;**

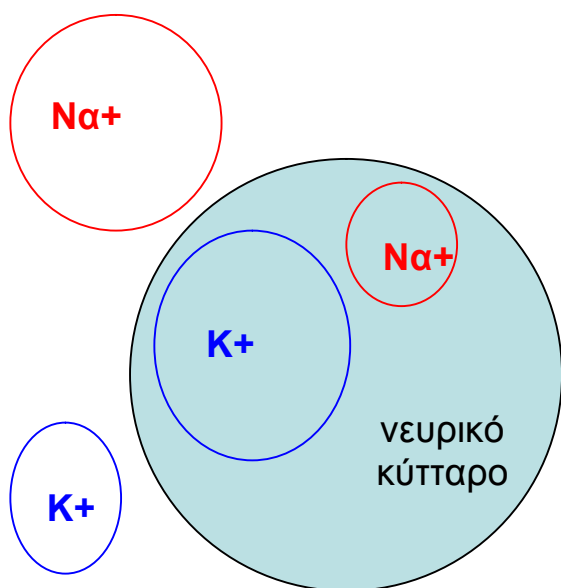
Τόσο στον εξωκυττάριο όσο και στον ενδοκυττάριο χώρο υπάρχουν αρνητικά και θετικά φορτία (ιόντα) τα οποία είναι ίσα μεταξύ τους. Τα θετικά φορτισμένα ιόντα ονομάζονται *κατιόντα*, τα αρνητικά φορτισμένα ιόντα ονομάζονται *ανιόντα*. Στον εξωκυττάριο χώρο το κύριο κατιόν (θετικό φορτίο) είναι το ιόν νατρίου ( $\text{Na}^+$ ) και το κύριο ανιόν (αρνητικό φορτίο) το ιόν χλωρίου ( $\text{Cl}^-$ ). Αντίστοιχα στο ενδοκυττάριο χώρο το κύριο κατιόν είναι το ιόν καλίου ( $\text{K}^+$ ) και το κύριο ανιόν είναι διάφορα οργανικά ανιόντα. Το κάθε υγρό χωριστά (ενδοκυττάριο, εξωκυττάριο) είναι ηλεκτρικά ουδέτερο αφού όσα θετικά φορτία έχει τόσα αρνητικά φορτία έχει. Ωστόσο ο αριθμός των φορτίων αμέσως έξω και αμέσως μέσα από την κυτταρική μεμβράνη είναι διαφορετικός με συνέπεια τη δημιουργία μιας διαφοράς δυναμικού στις δυο πλευρές της μεμβράνης (σχήμα 2).

Σχήμα 2

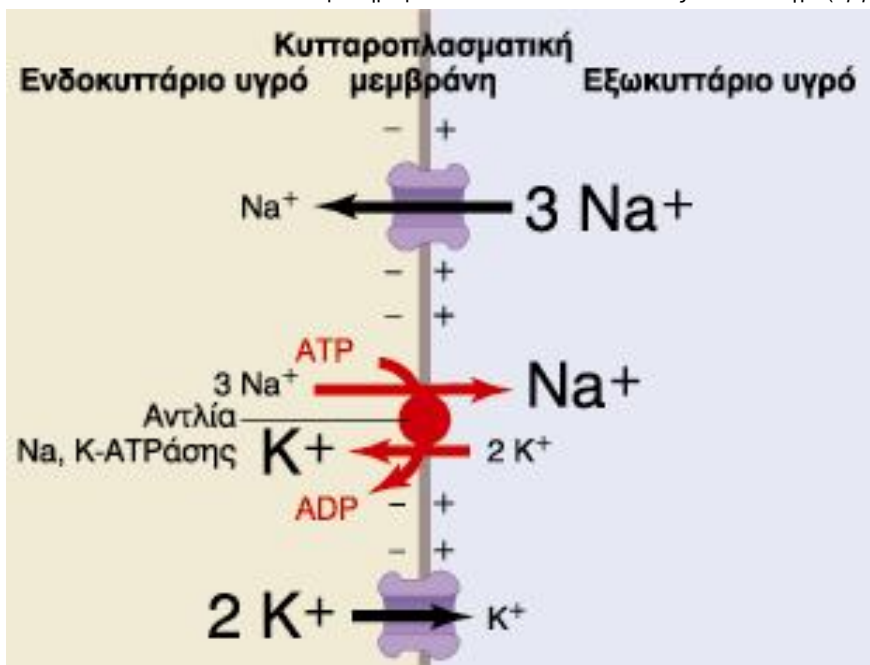


Συγκεκριμένα υπάρχουν συνολικά περισσότερα θετικά ιόντα στην εξωτερική πλευρά της μεμβράνης σε σχέση με την εσωτερική. Με άλλα λόγια, το εξωτερικό της μεμβράνης παρουσιάζει μια σχετική ηλεκτροθετικότητα, ενώ το εσωτερικό της μεμβράνης μια σχετική ηλεκτροαρνητικότητα. Έτσι, το εσωτερικό της μεμβράνης ενός νευρικού κυττάρου που είναι σε κατάσταση ηρεμίας (δηλαδή δεν δέχεται κανένα ερέθισμα) είναι περίπου 70mV πιο αρνητικό σε σχέση με το εξωτερικό της μεμβράνης ενός κυττάρου.

Τα θετικά φορτία στο εξωτερικό του κυττάρου είναι κατεξοχήν το  $\text{Na}^+$  (και λίγο  $\text{K}^+$ ) ενώ στο εσωτερικό του κυττάρου είναι κατεξοχήν το  $\text{K}^+$  (και λίγο  $\text{Na}^+$ ) (βλεπε σχήμα 32) και τα θετικά φορτία έξω από το κύτταρο είναι συνολικά περισσότερα από ό,τι μέσα στο κύτταρο. Αυτή τη διαφορά των θετικών φορτίων στις δυο πλευρές της μεμβράνης τη δημιουργεί και τη συντηρεί η **αντλία  $\text{Na}^+ - \text{K}^+$**  (σχήμα 4). Η αντλία  $\text{Na}^+ - \text{K}^+$  χρησιμοποιεί την ενέργεια που απελευθερώνεται από την διάσπαση (υδρόλυση) ενός μορίου ATP (σε  $\text{ADP} + \text{P}$ ) για να μεταφέρει ιόντα  $\text{Na}^+$  και  $\text{K}^+$  από την χαμηλότερη προς την υψηλότερη συγκέντρωση. Η μεταφορά αυτή είναι ενεργοβόρος (ενεργός μεταφορά) αφού γίνεται σε κατεύθυνση αντίθετη από εκείνη της παθητικής διάχυσης. Έτσι, για κάθε 3 ιόντα  $\text{Na}^+$  που μεταφέρει η αντλία προς τα έξω, εισαγάγει στο κύτταρο 2 ιόντα  $\text{K}^+$ .



**Σχήμα 3:** Τα ιόντα  $\text{Na}^+$  είναι πολύ περισσότερα στο εξωτερικό του κυττάρου από ό,τι στο εσωτερικό του, ενώ αντιστρόφως τα ιόντα  $\text{K}^+$  είναι πολύ περισσότερα στο εσωτερικό του κυττάρου παρά στο εξωτερικό του. Το σύνολο των θετικών φορτίων στο εξωτερικό του κυττάρου είναι μεγαλύτερο από ό,τι στο εσωτερικό του, έτσι ο εξωκυττάριος χώρος είναι σχετικά ηλεκτροθετικός, ενώ ο εσωτερικός χώρος του κυττάρου είναι σχετικά πιο ηλεκτροαρνητικός.

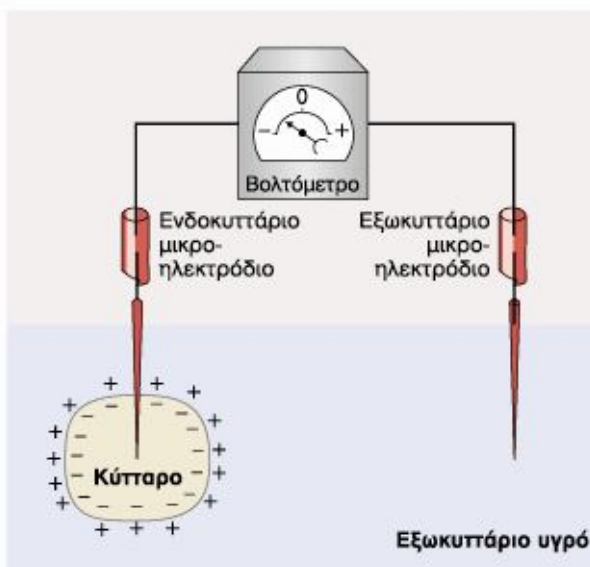


Σχήμα 4

**Σχήμα 4:** Η αντλία  $\text{Na}^+ - \text{K}^+$  χρησιμοποιεί την ενέργεια που απελευθερώνεται από την διάσπαση (υδρόλυση) ενός μορίου ATP (σε  $\text{ADP} + \text{P}$ ) για να μεταφέρει ιόντα  $\text{Na}^+$  και  $\text{K}^+$  από την χαμηλότερη προς την υψηλότερη συγκέντρωση. Η μεταφορά αυτή είναι ενεργοβόρος (ενεργός μεταφορά) αφού γίνεται σε κατεύθυνση αντίθετη από εκείνη της παθητικής διάχυσης. Έτσι, για κάθε 3 ιόντα  $\text{Na}^+$  που μεταφέρει η αντλία προς τα έξω, εισαγάγει στο κύτταρο 2 ιόντα  $\text{K}^+$ .

**2.5. Πώς μετρούμε το μεμβρανικό δυναμικό ενός νευρικού κυττάρου;**

Μπορούμε να μετρήσουμε το δυναμικό ηρεμίας ενός νευρικού κυττάρου αν βάλουμε ένα ηλεκτρόδιο μέσα στο κύτταρο και ένα δεύτερο ηλεκτρόδιο στον εξωκυττάριο χώρο και τα συνδέσουμε με ευαίσθητο βολτόμετρο (όργανο που μετράει διαφορά δυναμικού σε Volt (βόλτ)) (σχήμα 5). Το μεμβρανικό δυναμικό ορίζεται ως το ενδοκυτταρικό δυναμικό σε σχέση με το εξωκυτταρικό δυναμικό. Το δυναμικό έξω από το κύτταρο κατά σύμβαση θεωρείται μηδέν και επειδή υπάρχει σχετική περίσσεια αρνητικών φορτίων μέσα από τη μεμβράνη, η διαφορά δυναμικού εκφράζεται ως αρνητική τιμή.



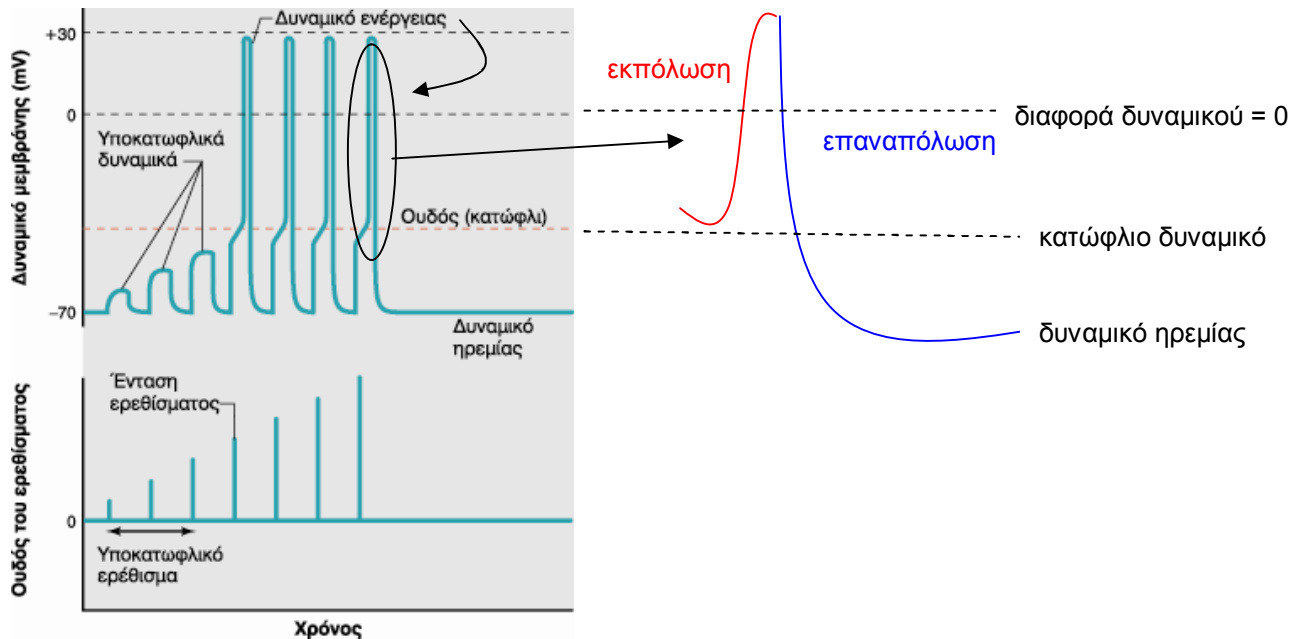
Σχήμα 5

## 2.6. Τι είναι δυναμικό ενεργείας ενός νευρικού κυττάρου;

Ας φανταστούμε ένα κύτταρο σε κατάσταση ηρεμίας και έστω ένα ερέθισμα που δέχεται το κύτταρο αυτό και το οποίο προκαλεί μια μείωση του δυναμικού της μεμβράνης του κυττάρου από την αρχική τιμή (δυναμικό ηρεμίας) σε μια νέα χαμηλότερη τιμή. Το ερέθισμα προκάλεσε, επομένως, μια εκπόλωση και όσο ισχυρότερο είναι το ερέθισμα, τόσο μεγαλύτερη και η εκπόλωση. Η εκπόλωση όμως δεν κρατάει πολύ και έτσι η μεμβράνη του κυττάρου επανέρχεται σύντομα στο αρχικό της δυναμικό (το δυναμικό ηρεμίας). Όσο η εκπόλωση είναι κάτω από μια ορισμένη τιμή (-55 mV), γνωστή ως **κατώφλιο δυναμικό** (ή επίπεδο πυροδότησης), τότε πάντα η εκπόλωση (μικρή ή μεγάλη) θα ακολουθείται από επαναπόλωση και αυτές οι αλλαγές στο δυναμικό της μεμβράνης θα παραμένουν περιορισμένες στο σημείο του κυττάρου που δέχτηκε το σήμα. ΑΝ όμως η διαφορά δυναμικού της μεμβράνης μειωθεί (εκπόλωση) πέρα από την τιμή του κατώφλιου δυναμικού τότε προκαλείται μια παλμική μεταβολή του δυναμικού της μεμβράνης (*παλμική μεταβολή* σημαίνει γρήγορη, μεγάλη και σύντομη εκπόλωση, ακολουθούμενη από ταχεία επαναπόλωση) που ονομάζεται **δυναμικό ενεργείας** (σχήμα 6).

Χαρακτηριστικά του δυναμικού ενεργείας:

- (1) Μεταφέρεται αμείωτο κατά μήκος της μεμβράνης.
- (2) Διέπεται από τον «νόμο όλο ή ουδέν». Αυτό σημαίνει ότι αν ένα ερέθισμα προκαλεί εκπόλωση μεγαλύτερη από το κατώφλιο δυναμικό τότε όσο κι αν αυξάνεται η ένταση του ερεθίσματος αυτού θα προκαλεί πάντα το ίδιο πάντα δυναμικό ενεργείας.



Σχήμα 6

**Σχήμα 6:** Σε κάθε **ερέθισμα** (κάτω διάγραμμα) απαντά το κύτταρο με μια μείωση της διαφοράς δυναμικού της μεμβράνης του, δηλαδή με μια **εκπόλωση** (πάνω διάγραμμα). Διακρίνουμε δύο περιπτώσεις: (1) η προκαλούμενη εκπόλωση να είναι μικρότερη από το κατώφλιο δυναμικό και (2) η εκπόλωση να είναι πάνω από το κατώφλιο δυναμικό. Στην **πρώτη περίπτωση** οι εκπολώσεις του κυττάρου αυξάνονται αναλογικά με την ένταση του ερεθίσματος, δηλαδή όσο αυξάνεται το ερέθισμα τόσο αυξάνεται η εκπόλωση. Στη **δεύτερη περίπτωση** η ένταση του ερεθίσματος είναι αρκετά μεγάλη ώστε να προκαλέσει μια μεγάλη εκπόλωση, δηλαδή μια μεγάλη μείωση της διαφοράς δυναμικού της μεμβράνης του κυττάρου. Όταν η διαφορά αυτή του δυναμικού μειωθεί από -70 mV σε -55 mV (που είναι το κατώφλιο δυναμικό) τότε, το κύτταρο παράγει από **μόνο του** ένα ηλεκτρικό σήμα, μια μεγάλη και σύντομη μεταβολή του δυναμικού της μεμβράνης, γνωστή ως **δυναμικό ενεργείας**. Στην παλμική αυτή μεταβολή ξεχωρίζουμε μια ανοδική φάση (η εκπόλωση) και μια καθοδική φάση (η επαναπόλωση). Κατά τη διάρκεια του δυναμικού ενεργείας το δυναμικό της μεμβράνης αναστρέφεται (από αρνητικό γίνεται θετικό).