



ΠΑΝΕΠΙΣΤΗΜΙΟ
ΘΕΣΣΑΛΙΑΣ

Ηλεκτρικός Μυϊκός Ερεθισμός

Δρ Σάββας Σπανός
Επίκουρος Καθηγητής

Βαλβιδικό ερέθισμα

- Το ερέθισμα που έχει τέτοια τιμή έντασης (βαλβίδα ερεθισμού), ώστε να προκαλεί την παραγωγή δυναμικού ενέργειας.
- Ερέθισμα έντασης χαμηλότερης από την βαλβίδα ερεθισμού ονομάζεται **υποβαλβιδικό**.
- Ερέθισμα έντασης υψηλότερης από την βαλβίδα ερεθισμού ονομάζεται **υπερβαλβιδικό**.

Νόμος «όλον ή ουδέν»

Όταν ένα βαλβιδικό ερέθισμα εφαρμοστεί στην επιφάνεια νευρικής ή μυϊκής ίνας, παράγεται δυναμικό ενέργειας που μεταβιβάζεται κατά μήκος της. Η ένταση του δυναμικού είναι η ίδια ανεξάρτητα από την ένταση του ερεθίσματος. Αν το ερέθισμα είναι βαλβιδικό, η ίνα αντιδρά με μέγιστη ένταση, αν είναι **υποβαλβιδικό** δεν αντιδρά και αν είναι **υπερβαλβιδικό** αντιδρά με την ίδια ένταση που αντιδρά σε βαλβιδικό, δηλαδή μέγιστη.

Κινητική μονάδα & εκούσια μυϊκή σύσπαση

- Αποτελείται από έναν α κινητικό νευρώνα & τις μυϊκές ίνες που νευρώνει, που ποικίλλουν από λίγες (όπου απαιτείται ακρίβεια στην κίνηση) ως 1000-2000 (όπου απαιτείται μεγάλη δύναμη).
- Κάθε κινητική μονάδα αποτελείται από ένα είδος μυϊκών ινών (τύπου I ή τύπου II).
- Κάθε μυς αποτελείται από περισσότερες κινητικές μονάδες, άρα και από διαφορετικού τύπου μυϊκές ίνες.
- Η αναλογία τύπου I και τύπου II (α ή β) ινών προσδίδει ξεχωριστά χαρακτηριστικά σε κάθε μυ.

Κινητική μονάδα & εκούσια μυϊκή σύσπαση

- Οι **τύπου I μυϊκές ίνες** νευρώνονται ανά μικρές ομάδες από κινητικούς νευρώνες μικρής διαμέτρου, που μεταφέρουν διαρκώς ώσεις σε χαμηλή συχνότητα. Έχουν μεγάλη συγκέντρωση οξειδωτικών ενζύμων, υψηλή παροχή αίματος, και κουράζονται αργά.
- Οι **τύπου II μυϊκές ίνες** (διακρίνονται σε IIα & IIβ) νευρώνονται ανά μεγάλες ομάδες από κινητικούς νευρώνες μεγάλης διαμέτρου, που μεταφέρουν ώσεις με υψηλότερη συχνότητα. Έχουν μικρότερη συγκέντρωση μυοσφαιρίνης και παροχή αίματος, και κουράζονται σχετικά γρήγορα.
- Κατά τη διάρκεια της εκούσιας σύσπασης η πυροδότηση των κινητικών νευρώνων είναι ασύγχρονη αλλά η σύσπαση ομαλή. Η παραγόμενη δύναμη αυξάνεται με τον **πλήθος** των κινητικών μονάδων που επιστρατεύονται και με τη **συχνότητα** εκπόλωσης των κινητικών νευρώνων.

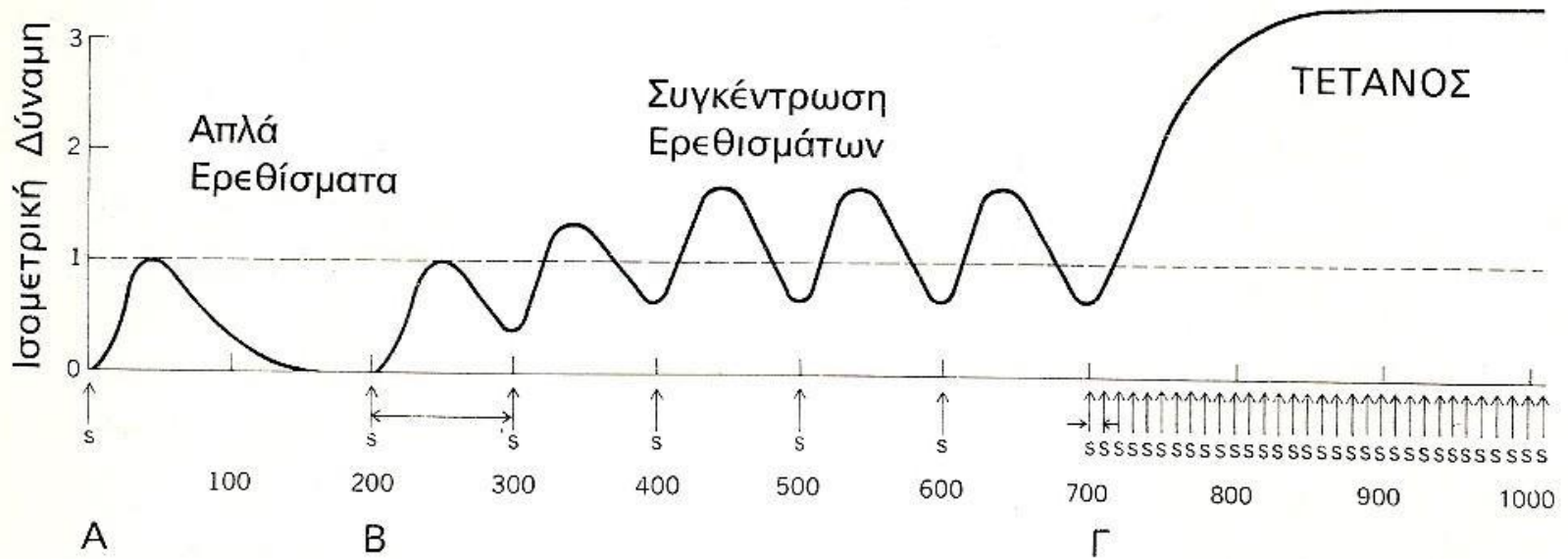
Μέγιστη συστολή

Η ένταση της συστολή (άρα και της δύναμης) που θα παράγει ένας μυς εξαρτάται από:

- Τον **αριθμό** των μυϊκών ινών που θα συσπαστούν σε συγκεκριμένο χρόνο (αριθμός κινητικών μονάδων, μέγεθος κινητικών μονάδων).
- Το **ποσό** της επιμέρους δύναμης που αναπτύσσεται σε κάθε μυϊκή ίνα που συσπάται (συχνότητα συστολής μυϊκής ίνας, μήκος μυϊκής ίνας την στιγμή της συστολής, είδος μυϊκής ίνας, ελαστική αντίσταση και αντίσταση τριβής των στοιχείων της μυϊκής ίνας).

Συχνότητα συστολής της μυϊκής ίνας

Αυξανόμενης της συχνότητας των δυναμικών ενέργειας, αυξάνεται η συχνότητα απάντησης της μυϊκής ίνας μέχρι αυτή να φτάσει στο μέγιστο σημείο συχνότητας συστολής (τέτανος).

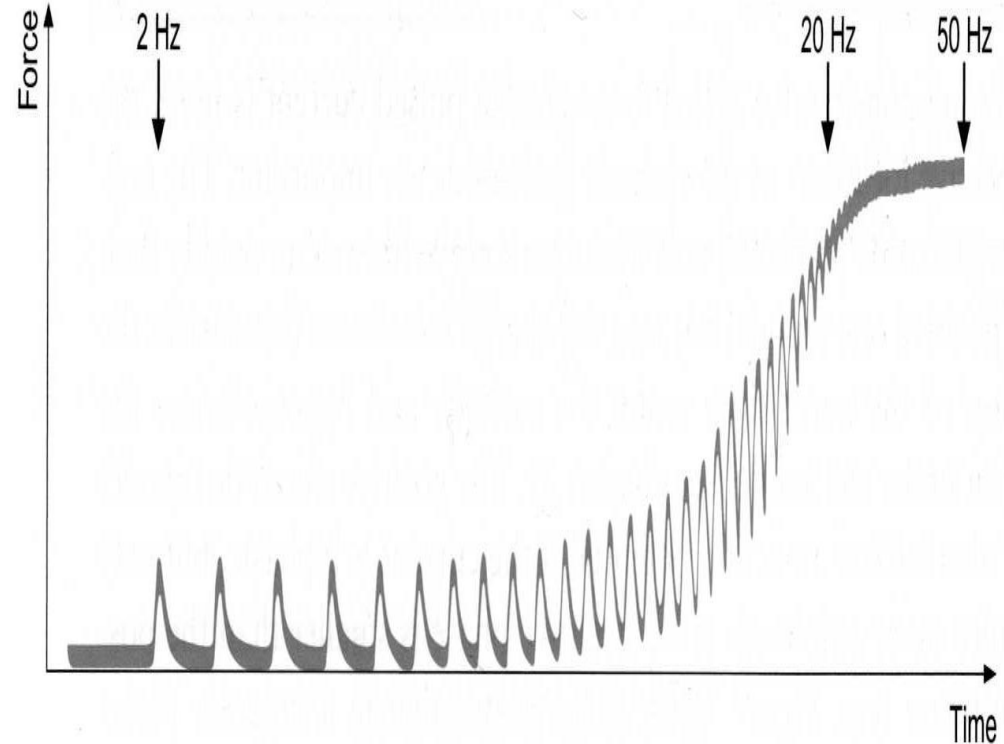
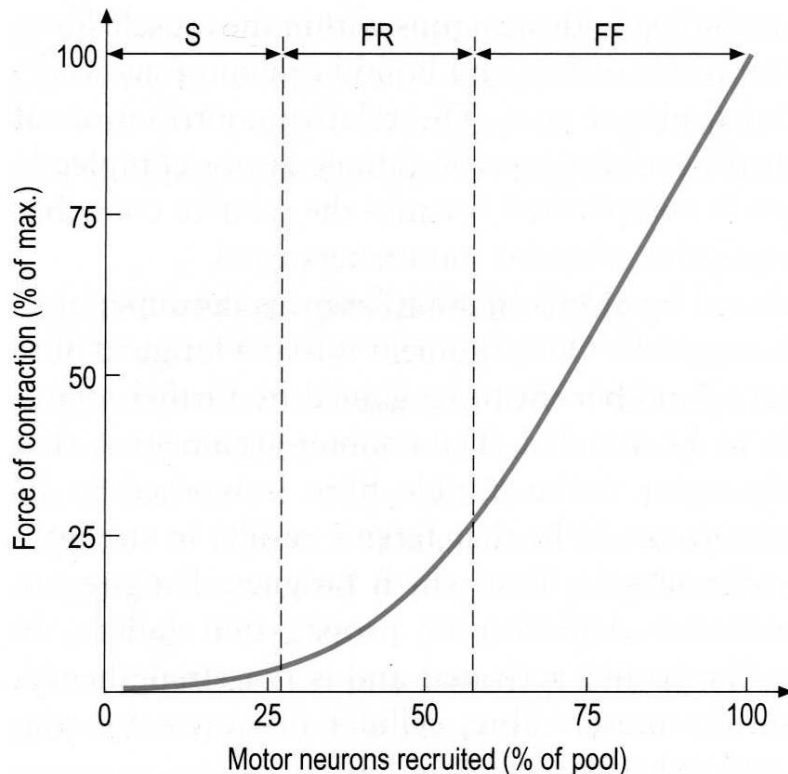


Ισομετρική συστολή παραγόμενη από ερεθίσματα διάφορης συχνότητας
A = 2 ερεθίσματα στο δευτερόλεπτο
B = 10 ερεθίσματα στο δευτερόλεπτο
Γ = 100 ερεθίσματα στο δευτερόλεπτο (Vander 1980)

30Hz για τονική μυϊκή ίνα και 60-100Hz για φασική μυϊκή ίνα.

Κινητική μονάδα & εκούσια μυϊκή σύσπαση

- Σε χαμηλά επίπεδα δύναμης, η δύναμη αυξάνεται κυρίως με την επιστράτευση περισσότερων μυϊκών ινών (σχήμα αριστερά).
- Σε υψηλά επίπεδα δύναμης η δύναμη αυξάνεται κυρίως με τη συχνότερη πυροδότηση των κινητικών νευρώνων (σχήμα δεξιά).



Απόκριση των μυών στον μυϊκό ερεθισμό

- Πρόκληση μυϊκής σύσπασης με τη χρήση ηλεκτρικού ρεύματος για τον ερεθισμό κινητικών νεύρων (εννευρωμένοι μύες) ή μυϊκών ινών (απονευρωμένοι μύες).
- Ο ηλεκτρικός ερεθισμός «μιμείται» τις επιδράσεις στους μύες των εκούσια επιβαλλόμενων απαιτήσεων (voluntary imposed demands) που μπορούν να επιφέρουν φυσιολογικές μεταβολές στα χαρακτηριστικά των μυών.

Η ενδυνάμωση απαιτεί έντονες συσπάσεις & λίγες επαναλήψεις.

Η αύξηση της αντοχής απαιτεί μικρότερη επιβάρυνση & πολλές επαναλήψεις.

- **Απαιτούνται διαφορετικές παράμετροι** για να είναι στοχευμένος & αποτελεσματικός ο ηλεκτρικός ερεθισμός διαφορετικών μυών.

Παράμετροι αποτελεσματικότητας ηλεκτρικού μυϊκού ερεθισμού

Ένταση των ερεθισμάτων

Διάρκεια των ερεθισμάτων

Χρόνος ανύψωσης των ερεθισμάτων

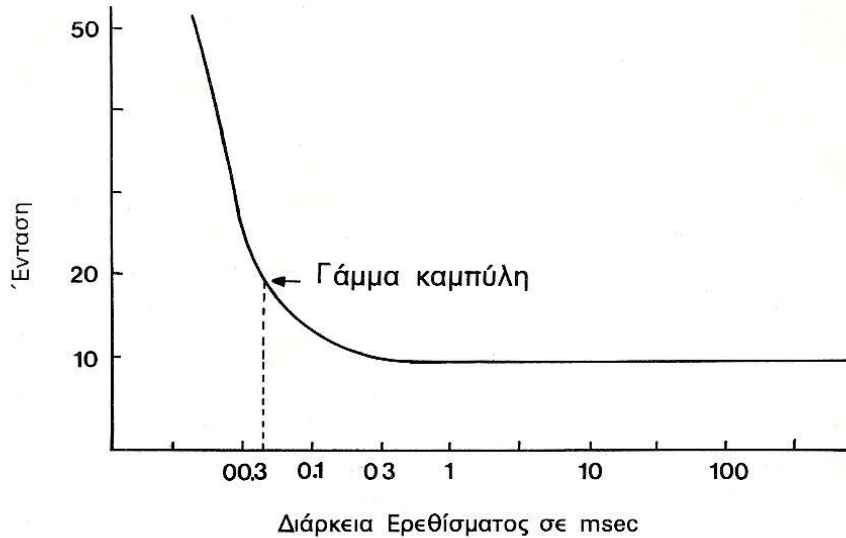
Συχνότητα των ερεθισμάτων

Ένταση των ερεθισμάτων

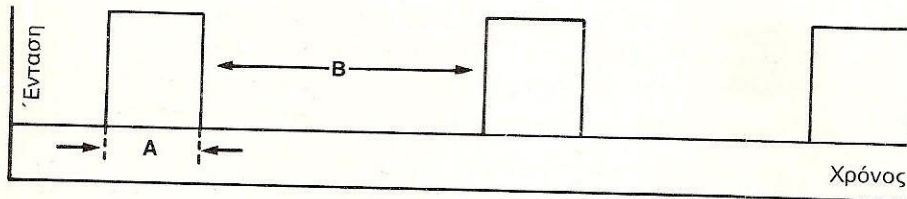
- Ένταση τουλάχιστον στην βαλβίδα ερεθισμού (νόμος «όλον ή ουδέν»).
- Η αύξηση της έντασης θα επιστρατεύσει περισσότερες μυϊκές ίνες και θα αυξήσει την ένταση της συστολής (από **ελάχιστα ορατή** συστολή σε **μέγιστη** συστολή), αυξάνοντας το βάθος διεύσδυσης.
- Η κλίμακα έντασης μεταξύ ελάχιστα ορατής και μέγιστης συστολής αποτελεί την **κλίμακα διέγερσης**.
- Για τους φυσιολογικά εννευρωμένους μύες η κλίμακα διέγερσης είναι περιορισμένη, ενώ για τους απονευρωμένους μύες η κλίμακα διέγερσης είναι σχετικά μεγάλη.
- Μετά την επίτευξη μέγιστης συστολής η παραπέρα αύξηση της έντασης δεν θα προκαλέσει εντονότερη συστολή.

Διάρκεια των ερεθισμάτων

Η σχέση μεταξύ της διάρκειας του ερεθίσματος και της έντασης αυτού για έκλυση ελάχιστα ορατής συστολής φυσιολογικά εννευρωμένου μυός με τη χρήση παλμικού συνεχούς ρεύματος τετράγωνης μορφής παριστάνεται με την **καμπύλη έντασης-διάρκειας ή γάμμα καμπύλη**.



Σχέση διάρκειας και έντασης ερεθίσματος τετραγωνικής μορφής-παλμικού συνεχούς ρεύματος για έκλυση ελάχιστα ορατής σύσπασης.



Τετραγωνικό παλμικό συνεχές ρεύμα

A: Διάρκεια παλμού.

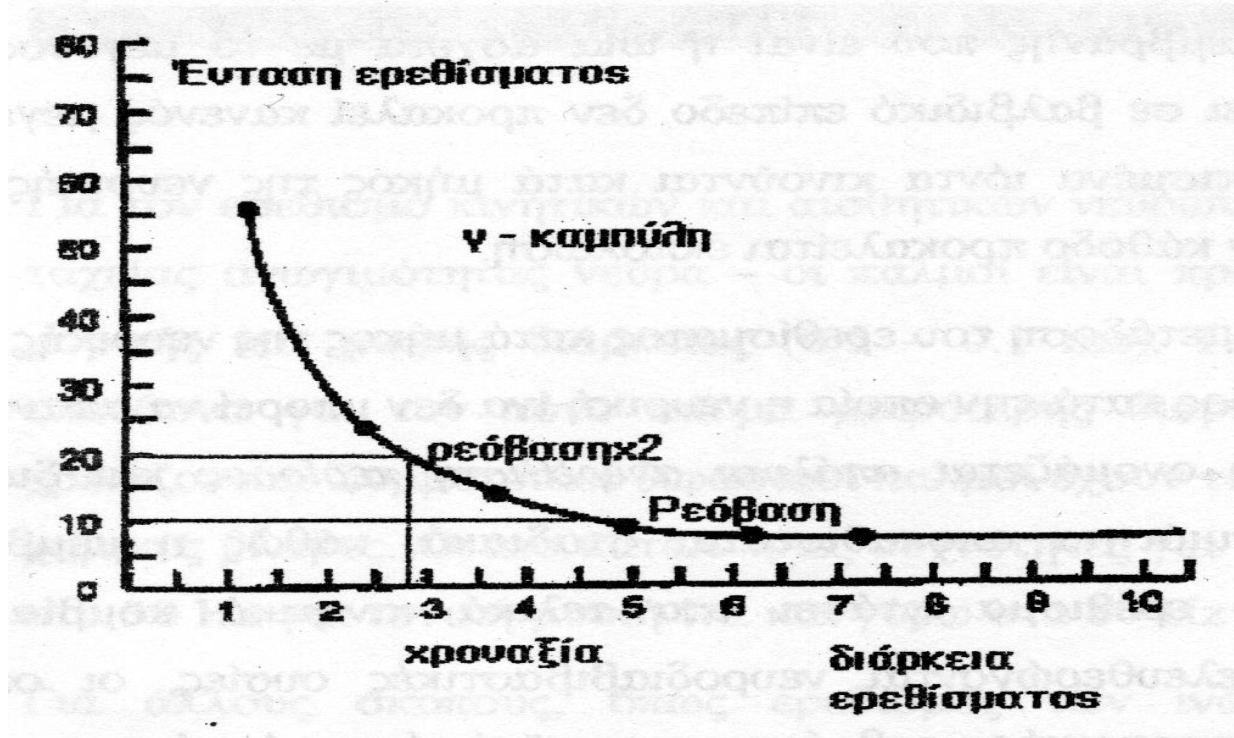
B: Παύλα μεταξύ παλμών

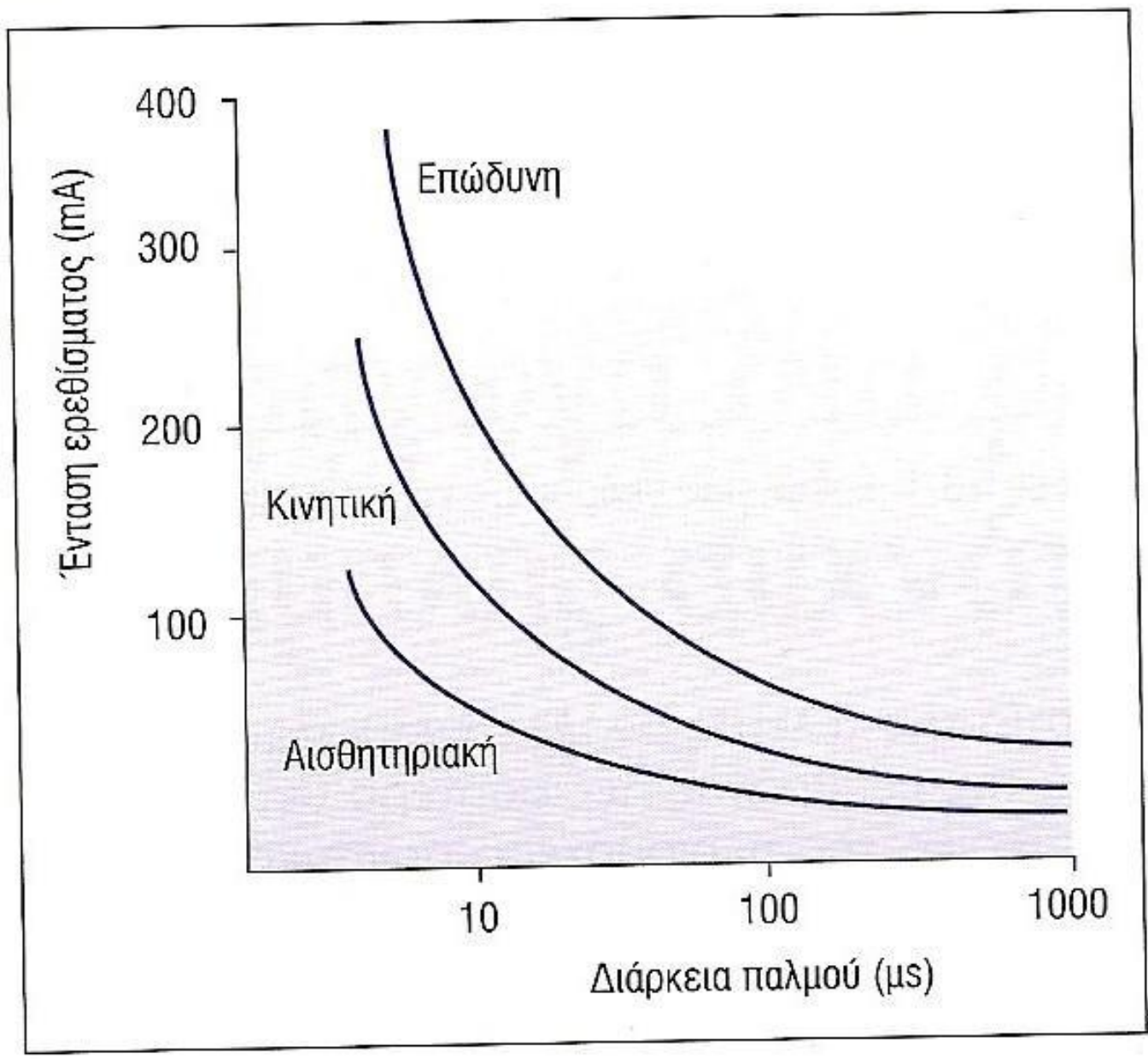
Χρόνος ανόδου παλμού: Απειροελάχιστος

- Μεγάλη διάρκεια ερεθίσματος απαιτεί μικρή ένταση για την πρόκληση συστολής, και το αντίστροφο.
- Είναι απαραίτητος κάποιος ελάχιστος χρόνος εφαρμογής (0,01msec ή 10μs για φυσιολογικούς μύες) για την επίτευξη σύσπασης ακόμα και με «μέγιστης» έντασης ερεθίσματα, και το αντίστροφο.

Διάρκεια των ερεθισμάτων

- **Ρεόβαση** καλείται η ένταση που προκαλεί μια παρατηρήσιμη αντίδραση του ιστού (εδώ ελάχιστα ορατή μυϊκή σύσπαση) όταν χρησιμοποιείται συνεχές παλμικό ρεύμα τετράγωνης μορφής, άπειρης χρονικής διάρκειας. Για πρακτικούς σκοπούς ερεθισμός χρονικής διάρκειας μεγαλύτερης των 100 - 200 msec θεωρείται άπειρος.
- **Χροναξία** καλείται η ελάχιστη χρονική διάρκεια ερεθισμού που μπορεί να προκαλέσει ελάχιστα ορατή μυϊκή σύσπαση χρησιμοποιώντας ρεύμα έντασης διπλάσιας της ρεόβασης.

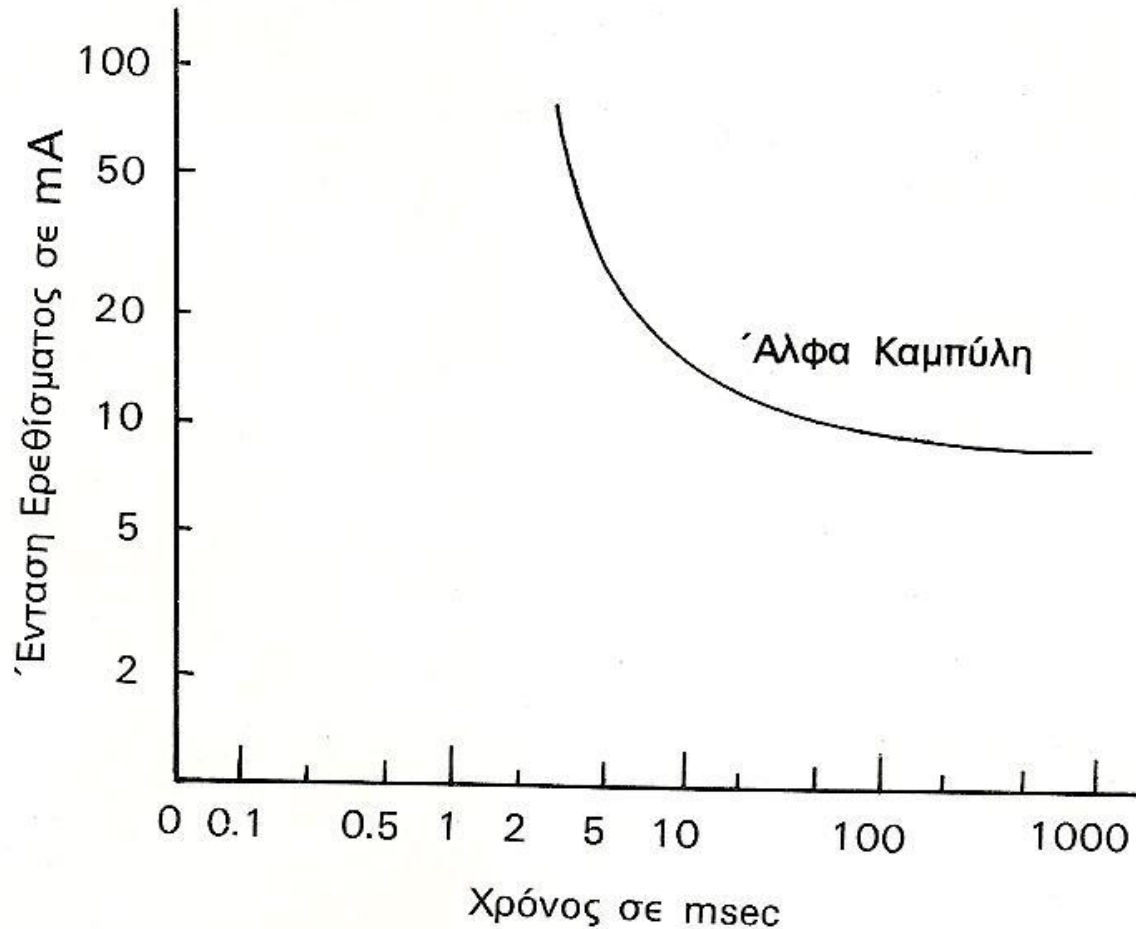




Διάρκεια των ερεθισμάτων

- Σε φυσιολογικά **εννευρωμένους** μύες η χροναξία είναι λιγότερη από 1msec.
- Μια αλλαγή που υφίσταται ένας μυς λόγω **απονεύρωσης** είναι η κατάργηση της δυνατότητας να συσπάται με ερεθίσματα **μικρής** χρονικής διάρκειας.
- Στους **απονευρωμένους** μύες η χροναξία είναι συνήθως 10-100 φορές μεγαλύτερη από του **εννευρωμένου**.
- Στην περίπτωση απονευρωμένου μυός **άγνωστης** χροναξίας χρησιμοποιείται διάρκεια ερεθισμού 100msec (η μεγαλύτερη χροναξία που αναμένεται να έχει ένας απονευρωμένος μυς).
- Η σχέση μεταξύ διάρκειας ερεθίσματος και έντασης αυτού για την έκλυση σύσπασης απονευρωμένου μυός παριστάνεται με την **άλφα καμπύλη**.

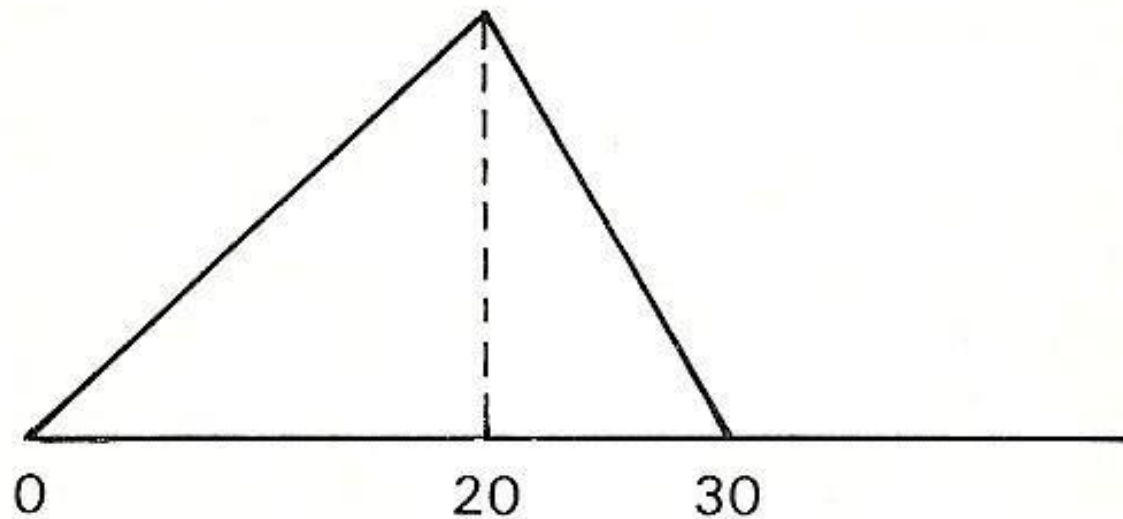
Διάρκεια των ερεθισμάτων



Σχέση μεταξύ διάρκειας και έντασης ερεθίσματος για έκλυση σύσπασης απονευρωμένου μυ. Όσο μεγαλώνει η χροναξία του απονευρωμένου μυ τόσο μετακινείται η άλφα καμπύλη προς τα δεξιά.

Χρόνος ανύψωσης των ερεθισμάτων

Χρόνος ανόδου είναι εκείνος που απαιτείται μεταξύ της έναρξης του ερεθίσματος και της μέγιστης τιμής της έντασης αυτού, δηλαδή ο χρόνος που απαιτείται για να φτάσει το ερέθισμα στην μέγιστη ένταση.



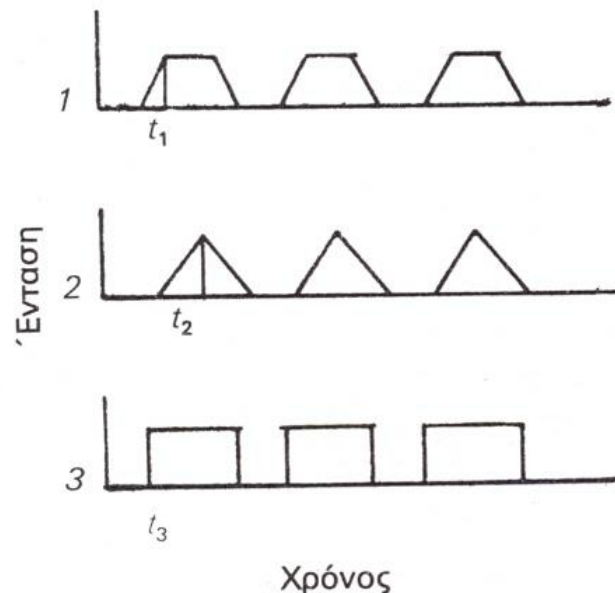
Χρόνος σε msec

Χρόνος ανόδου ερεθίσματος 20msec

Διάρκεια ερεθίσματος 30msec

Χρόνος ανύψωσης των ερεθισμάτων

- Οι φυσιολογικά εννευρωμένοι μύες δεν απαντούν σε ερεθίσματα αργά αυξανόμενης έντασης λόγω προσαρμογής (του νευρικού ιστού) σε αντίθεση με τους απονευρωμένους που απαντούν (μυϊκός ιστός).
- Όσο υψηλότερος είναι ο ρυθμός ανόδου (μικρότερος χρόνος ανύψωσης), τόσο μεγαλύτερη είναι η ικανότητα του ηλεκτρικού ρεύματος να διεγείρει τον νευρικό ιστό (άρα να προκαλέσει συστολή εννευρωμένου μυός).



Συχνότητα των ερεθισμάτων

- Ο αριθμός των ερεθισμάτων στη μονάδα του χρόνου (ώσεις/sec).
- Στους εννευρωμένους μύες, σε χαμηλή συχνότητα, επιτρέπεται χαλάρωση της σύσπασης στα μεσοδιαστήματα άρα οι συσπάσεις είναι **αιφνίδιες**.
- Αυξάνοντας την συχνότητα εμφανίζεται το φαινόμενο της **προσωρινής άθροισης**.
- Αν η συχνότητα αυξηθεί τόσο ώστε ο μυς να μην προλαβαίνει να χαλαρώσει στα μεσοδιαστήματα, οι συσπάσεις αθροίζονται σε μια συνεχή συστολή που διαρκεί όσο χρόνο διαρκεί η σειρά των ερεθισμάτων (παλμοσειρά). Έτσι επιτυγχάνεται τετανική συστολή (3-4 φορές εντονότερη από την στιγμιαία συστολή).
- Στους φυσιολογικά εννευρωμένους μύες με συχνότητα 20Hz παρουσιάζεται μερικός τέτανος (δηλαδή όχι πλήρης χαλάρωση μεταξύ των ερεθισμάτων). Με συχνότητα 30-50Hz παρουσιάζεται ομαλή τετανική συστολή.
- Στους απονευρωμένους μύες ο τέτανος συμβαίνει σε συχνότητα 3-10Hz. Όμως λόγω του γαλβανικού τετάνου δίνεται η εικόνα τετανικής συστολής σε οποιαδήποτε συχνότητα.