



کنترل سیستم های عصبی-عضلانی

واحد حرکتی و عملکرد عضله

Motor Unit and Muscle Action

<http://maleki.semnan.ac.ir>

Semnan University, Biomedical Engineering Department, Dr. A. Maleki

Spring 2023

فهرست مطالب:

- مقدمه ←
- معماری عضله
- فیزیولوژی عضله و مکانیزم انقباض
- واحد حرکتی
- نحوه‌ی تولید نیرو در عضله: اصل اندازه
- روابط نیرو-طول و نیرو-سرعت عضله
- انواع انقباض عضلانی
- دوک عضلانی
- اندام تاندون گلژی (GTO)
- مدل‌های عضله



مقدمه:

سیستم حرکتی انسان:

- کنترل کننده
- عملگر
- مسیرهای فیدبک

ماهیچه



انرژی شیمیایی ← ماهیچه → انرژی مکانیکی: تولید نیرو و انقباض ماهیچه

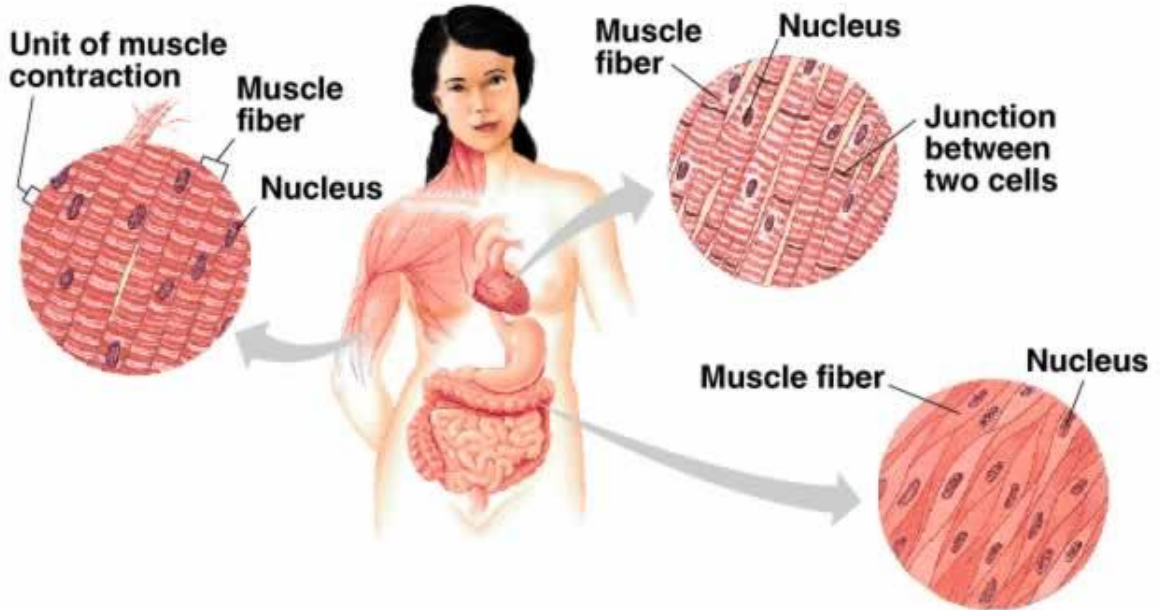


ANATOMY REVIEW: SKELETAL MUSCLE TISSUE

Skeletal muscles are associated with movements of the body. These movements are the result of unique characteristics of skeletal muscle cells.

انواع عضله در بدن:

- عضله اسکلتی (مخطط)
- عضله صاف
- عضله قلبی



انواع عضله در بدن:

- عضله اسکلتی (مخطط)
- عضله صاف
- عضله قلبی



ماهیچه اسکلتی



ماهیچه صاف

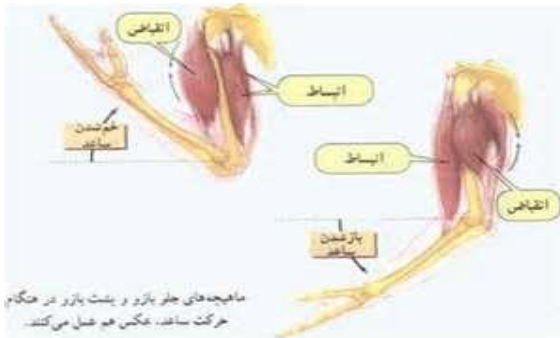


ماهیچه قلبی

نوع ماهیچه	اسکلتی	صاف	قلبی
رنگ	قرمز	سفید	قرمز
ویژگی سلول	رشته‌ای، چند هسته‌ای، دارای خطوط تیره و روشن (مخطط)	دوکی شکل، یک هسته‌ای	رشته‌ای، منشعب، دارای یک یا دو هسته، مخطط
عملکرد	ارادی	غیرارادی	غیرارادی

اهداف انقباض عضله

- انقباض و کوتاه شدن ماهیچه برای ایجاد حرکت اندام حول محور رابطها و مفاصل: ۷
- بلند کردن وزنه
- انقباض ماهیچه برای مقابله با یک نیروی خارجی و حفظ موقعیت موجود: نگه داشتن وزنه در ارتفاع ثابت



فهرست مطالب:

مقدمه

معماری عضله 

فیزیولوژی عضله و مکانیزم انقباض

واحد حرکتی

نحوهی تولید نیرو در عضله: اصل اندازه

روابط نیرو-طول و نیرو-سرعت عضله

انواع انقباض عضلانی

دوک عضلانی

اندام تاندون گلژی (GTO)

مدلهای عضله



معماری عضله به موقعیت آناتومیک عضله، نحوه اتصال آن و نوع عملکرد عضله وابسته است. این معماری در نحوه تولید نیرو و دینامیک حرکت موثر می‌باشد.

• شناخت معماری عضله

- توزیع عرضی فیبرها در عضله
- توزیع طولی فیبرها در عضله
- شکل هندسی عضله

اجزای اصلی عضله:

۱۰

عضله از دو بخش اصلی تشکیل شده است:

- **بافت عضلانی**

بافت عضلانی که خاصیت انقباضی داشته و بیشتر شامل فیلامان‌های اکتین و میوزین است. بافت عضلانی از فیبرهای عضلانی تشکیل می‌گردد. هر فیبر عضلانی یک سلول عضلانی است.

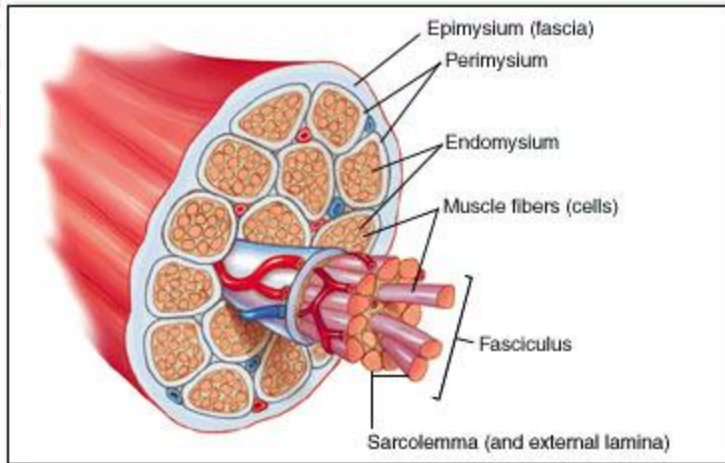
- **بافت همبند**

بافت همبند (یعنی اپی‌میزیوم، پری‌میزیوم و اندومیزیوم) که به صورت غلاف‌هایی بافت عضلانی را احاطه می‌کنند. این غلاف‌ها در ترتیب‌های متنوعی ترکیب شده و تاندون را می‌سازند که عضله اسکلتی را به استخوان متصل می‌کند.

بافت‌های همبند عضله:

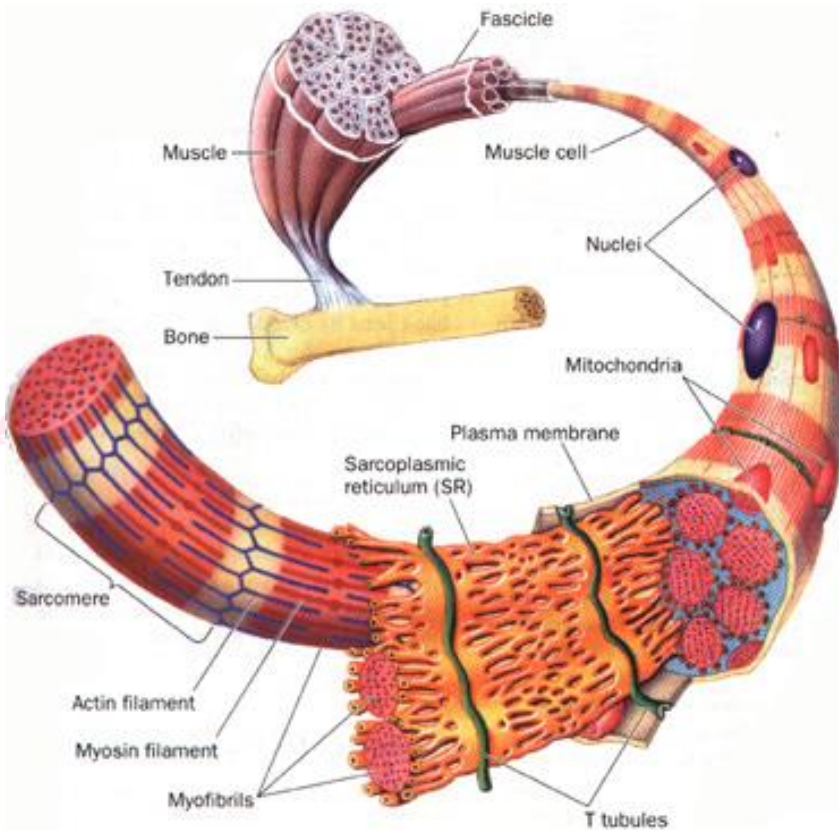
- اندومیزیوم: فیبرها را احاطه می‌کند و شامل عروق خونی و اعصاب کوچک است.
- پری‌میزیوم: فسیکل‌ها را احاطه می‌کند و لایه فشرده‌ای از کلاژن و فیبرهای الاستیک است.
- اپی‌میزیوم: ماهیچه را احاطه می‌کند.

۳ بافت همبند در انتهای عضله به هم پیوسته تاندون نامیده می‌شود.



توزیع عرضی فیبرها در عضله:

- عضله
- فسیکل
- تار عضلانی
- میوفیبریل
- اکتین و میوزین



توزیع طولی فیبرها در عضله

اهمیت: نقش مهم در نحوه کنترل فیبرهای عضلانی و دینامیک حرکتی آنها

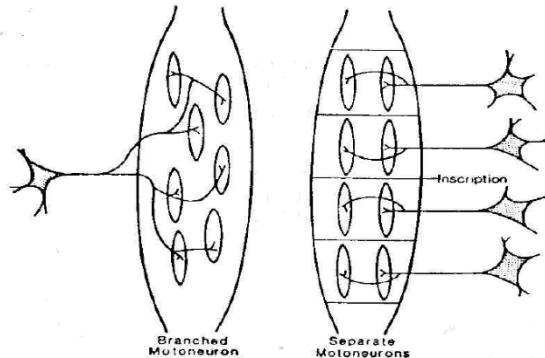
• انواع توزیع فیبر:

- توزیع سراسری: هر فیبر عضلانی از یک انتهای عضله آغاز می شود و تا انتهای دیگر ادامه دارد.
- توزیع سری
- توزیع پرشکل

طول فیبرها بسیار کوچکتر از طول عضله است و فیبرها به صورت متوالی قرار می‌گیرند و به دو

صورت عصب‌دهی می‌شوند:

- عصب‌دهی توسط نورون‌های حرکتی مجزا
- عصب‌دهی توسط نورون‌های حرکتی فرعی (شاخه ای)

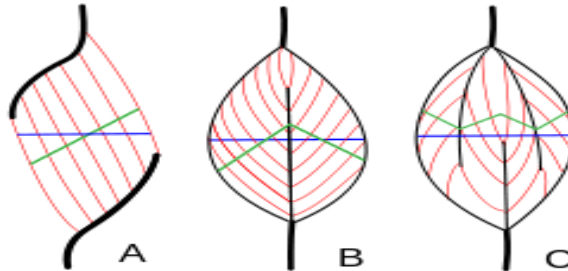


توزیع پر شکل

۱۵

توزیع پر شکل:

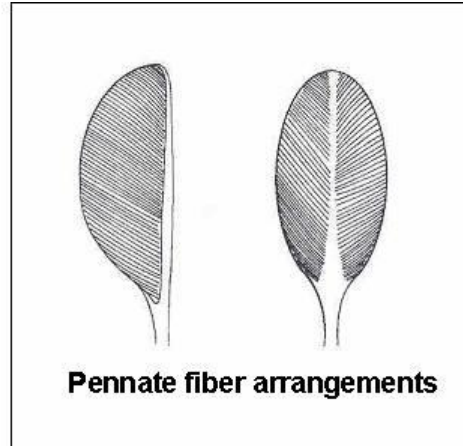
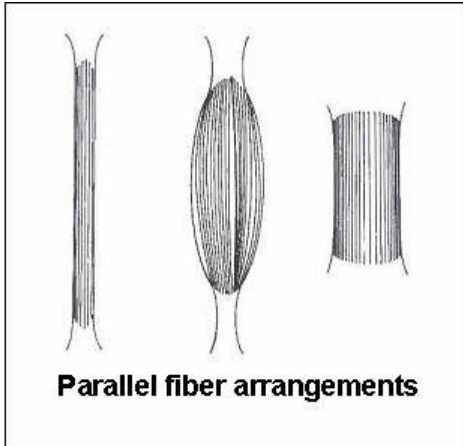
فیبر عضلانی ← پوشش وتری ← تاندون ← BTJ

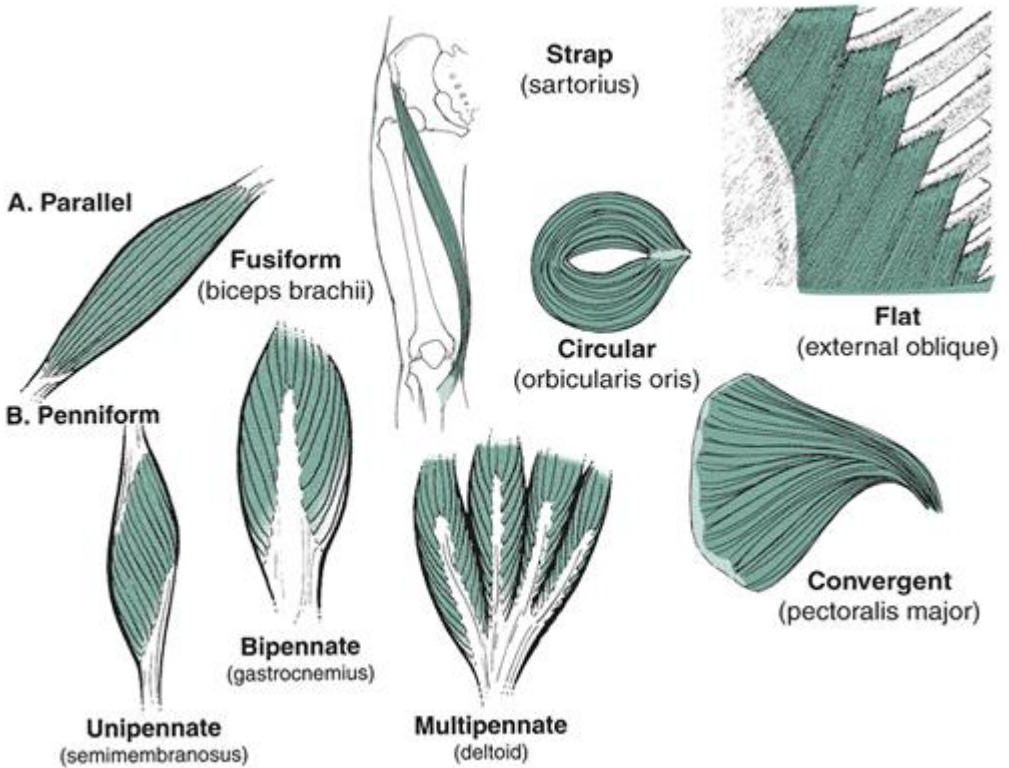


شکل هندسی عضلات:

شکل هندسی عضلات بستگی دارد به:

- طول فیبرها
- زاویه فیبرها نسبت به محور عضله:
- امتداد فیبرها با خط انتقال نیرو یا محور عضله هم جهت است.
- امتداد فیبرها با خط انتقال نیرو یا محور عضله هم جهت نیست و زاویه دار است.



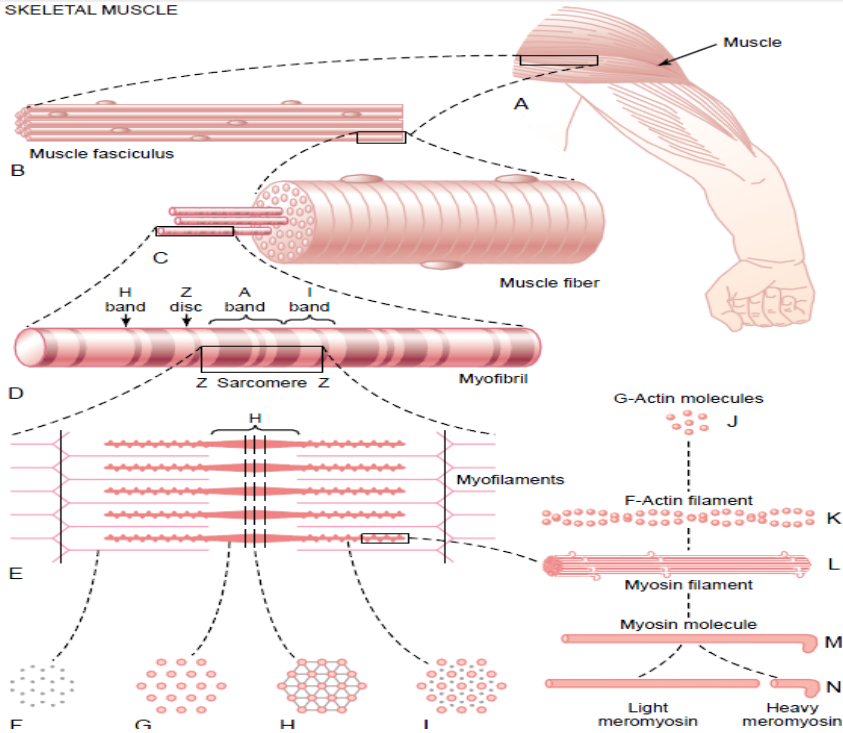


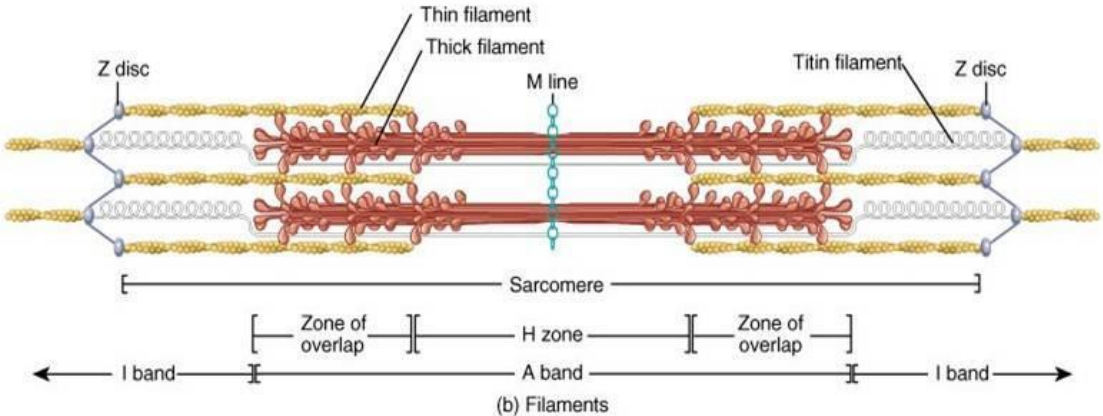
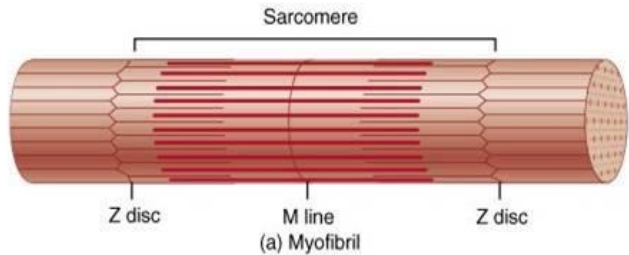
فهرست مطالب:

- مقدمه
- معماری عضله
- فیزیولوژی عضله و مکانیزم انقباض ←
- واحد حرکتی
- نحوه‌ی تولید نیرو در عضله: اصل اندازه
- روابط نیرو-طول و نیرو-سرعت عضله
- انواع انقباض عضلانی
- دوک عضلانی
- اندام تاندون گلژی (GTO)
- مدل‌های عضله



SKELETAL MUSCLE





انواع فیبرهای عضلانی

۲۱

تقسیم بندی انواع فیبر عضلانی از دو جهت مورد بحث قرار می گیرد:

• از نظر دینامیکی:

• آهسته

• سریع

• از نظر متابولیک:

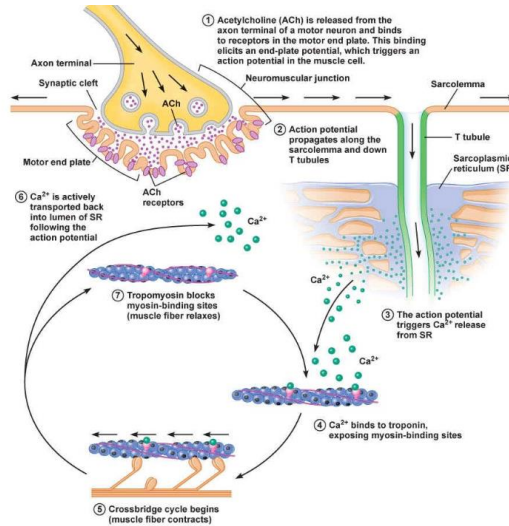
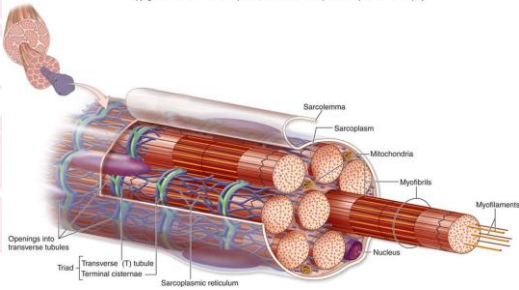
• Oxidative

• Glycolytic

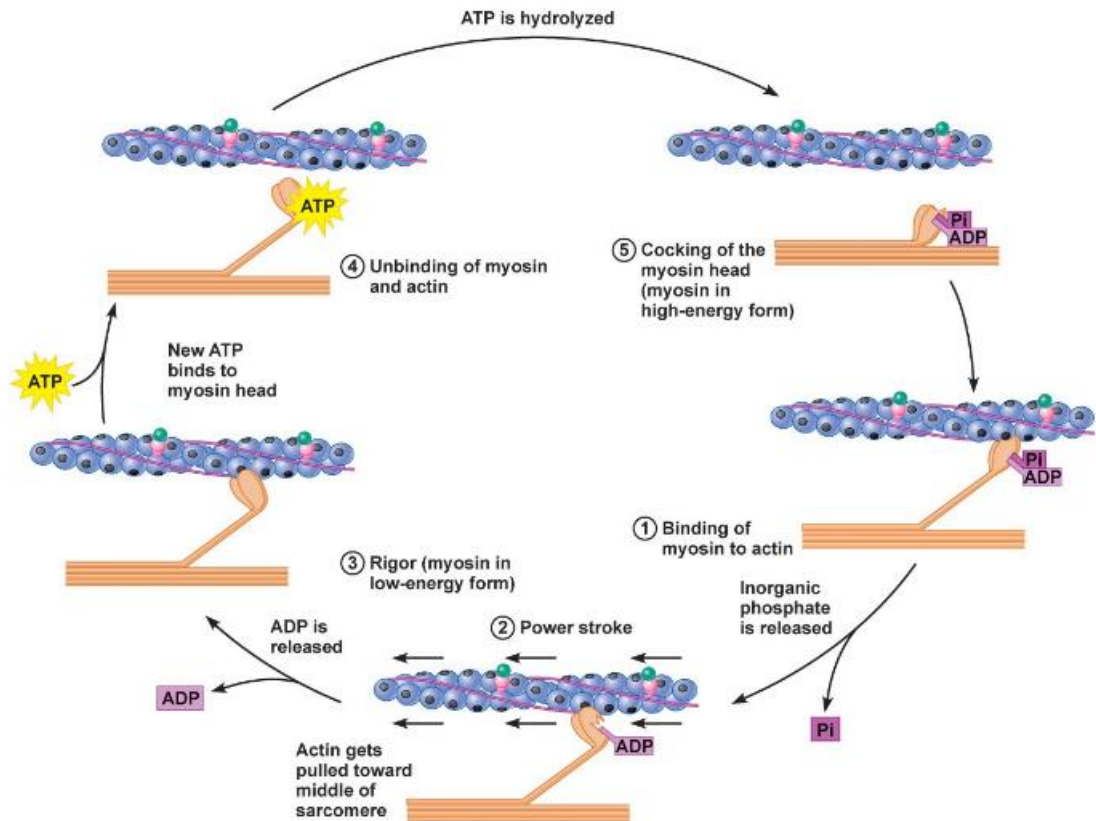
متابولیک	دینامیک	نوع فیبر
Oxydative	Slow	SO(I)
Oxydative Glycolytic	Fast	FOG(IIA)
Glycolytic	Fast	FG(IIB)

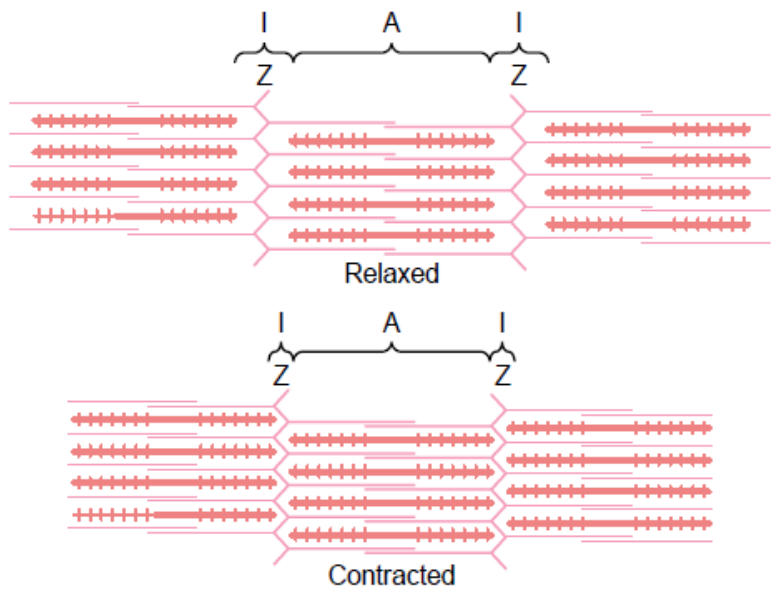
- ۱- پتانسیل عملی که در طول عصب حرکتی منتشر می‌شود، به انتهای عصب روی فیبرهای ماهیچه می‌رسد.
 - ۲- در هر یک از پایانه‌های عصبی، عصب مقدار کمی استیل‌کولین را ترشح می‌کند.
 - ۳- استیل‌کولین بر روی یک ناحیه موضعی از غشای فیبر عضلانی از طریق مولکول‌های پروتئین شناور در غشا شروع به باز کردن چند کانال می‌کند.
 - ۴- باز شدن کانال‌ها باعث نفوذ مقدار زیادی یون سدیم به داخل غشای فیبر عضلانی می‌شود، این آغاز پتانسیل عمل در غشاست
 - ۵- پتانسیل عمل در طول غشای فیبر عضلانی مانند غشای فیبر عصبی منتشر می‌شود.
 - ۶- پتانسیل عمل غشای عضلانی را پلاریزه می‌کند، قسمت اعظم پتانسیل عمل از طریق مرکز فیبرهای عضلانی جریان می‌یابد و در نتیجه شبکه سارکوپلاسمیک مقدار زیادی یون کلسیم ذخیره شده را آزاد می‌کند.
 - ۷- یون‌های کلسیم نیروهای جاذبه بین فیلامنت‌های اکتین و میوزین را آغاز می‌کنند و باعث فرورفتن آن‌ها در هم به صورت کشویی می‌شوند و روند انقباضی عضله آغاز می‌شود.
- پس از گذشت کسری از ثانیه، یون‌های کلسیم توسط پمپ غشای کلسیم به شبکه سارکوپلاسمیک

Copyright © The McGraw-Hill Companies, Inc. Permission required for reproduction or display.



© 2011 Pearson Education, Inc.





منبع انرژی برای انقباض عضله

۲۶ انرژی لازم برای اتصال اکتین و میوزین از طریق تجزیه ATP و تبدیل آن به ADP صورت می‌گیرد. ATP موجود در فیبرکم است بنابراین باید ATP تولید شود. تولید ATP از دو طریق صورت

می‌گیرد:

- تجزیه ماده کراتین فسفات: مقدار آن محدود و کم است و زمان انقباض را ۵ برابر می‌کند.
- تجزیه گلوکز و گلیکوژن در سلول‌ها (گلیکولیز) و اکسیداسیون کربوهیدرات ۴ در میتوکندری که به ترتیب انرژی فرآیندهای قدرتی و سرعتی در ماهیچه‌های سفید و انرژی فرآیندهای کند و مداوم در ماهیچه‌های قرمز را تامین می‌کنند.

فهرست مطالب:

- مقدمه
- معماری عضله
- فیزیولوژی عضله و مکانیزم انقباض
- واحد حرکتی 
- نحوه‌ی تولید نیرو در عضله: اصل اندازه
- روابط نیرو-طول و نیرو-سرعت عضله
- انواع انقباض عضلانی
- دوک عضلانی
- اندام تاندون گلژی (GTO)
- مدل‌های عضله





واحد حرکتی

○ هر نورون حرکتی پس از ورود به ماهیچه به تعداد زیادی فیبر عضلانی عصب‌دهی می‌کند

نورون حرکتی + فیبرهای عضلانی ← واحد حرکتی

کوچکترین واحد عضله از لحاظ ساختاری ← فیبر عضلانی

کوچکترین واحد عضله از لحاظ عملکردی ← واحد حرکتی

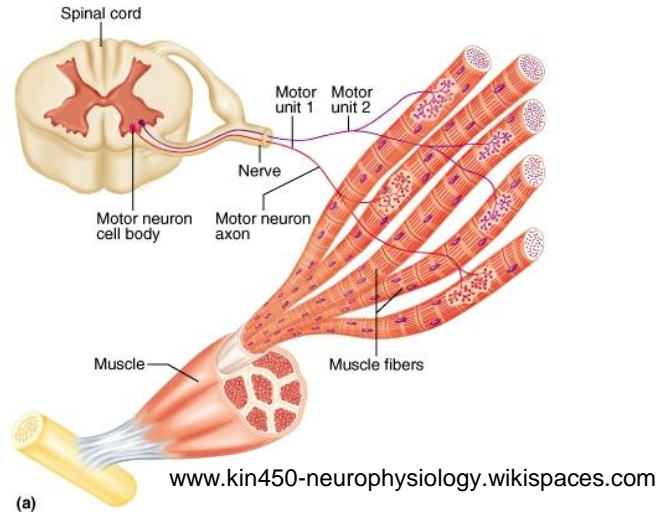


تحت کنترل CNS

توزیع فیبرهای یک واحد حرکتی در عضله

۲۹

تعداد متوسط فیبرهای یک واحد حرکتی = $\frac{\text{کل فیبرهای عضلانی}}{\text{نسبت عصب گیری}}$ = تعداد نرون های حرکتی در یک عضله



ابتدا با تحریک نرون مربوطه، فیبرهای یک واحد حرکتی را تحریک می کنند و سپس با روش **Periodic Acid Schiff** این فیبرها را به صورت انتخابی رنگ آمیزی می کنند نتایج این آزمایش نشان می دهد که:

فیبرهای یک واحد عضلانی متمرکز نیستند و در قسمت های زیادی از عضله پراکنده اند و با واحدهای حرکتی دیگر هم پوشانی دارند.

انواع واحدهای حرکتی

تقسیم بندی واحدهای حرکتی از لحاظ خواص دینامیکی و فیزیولوژیکی :

- **Fast & Fatigable (FF)**
- **Slow(S)**
- **Fast & Fatigue Resistant (FR)**

Fast & Fatigable (FF) •

- بزرگترین و سریعترین و قدرتمندترین نوع واحد حرکتی
- دارای نوروں حرکتی و فیبرهای عضلانی قطور
- نسبت عصب‌گیری آن زیاد است.
- در انقباض‌های مداوم و پیوسته خیلی زود خسته می‌شود.
- فیبرهای این واحد حرکتی اغلب از نوع FG (IIB) است.

• Slow(S)

- این واحد حرکتی ضعیف ولی در مقابل خستگی مقاوم است.
- سطح مقطع فیبرها و نسبت عصب‌گیری و سرعت انقباض آن کم است.
- در کارهای ضعیف و طولانی می‌تواند به کار رود.
- فیبرهای این واحد حرکتی اغلب از نوع SO(I) می‌باشد

Fast & Fatigue Resistant (FR) •

- این واحد حرکتی برای کارهای سریع و مداوم مناسب است.
- قطر فیبرها و نسبت عصب‌گیری آن کم است.
- زمان انقباض آن متوسط است.
- فیبرهای این واحد حرکتی اغلب از نوع **FOG (IIA)** است.

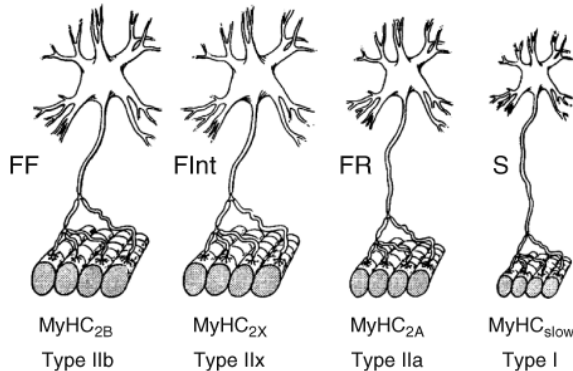
انواع واحدهای حرکتی

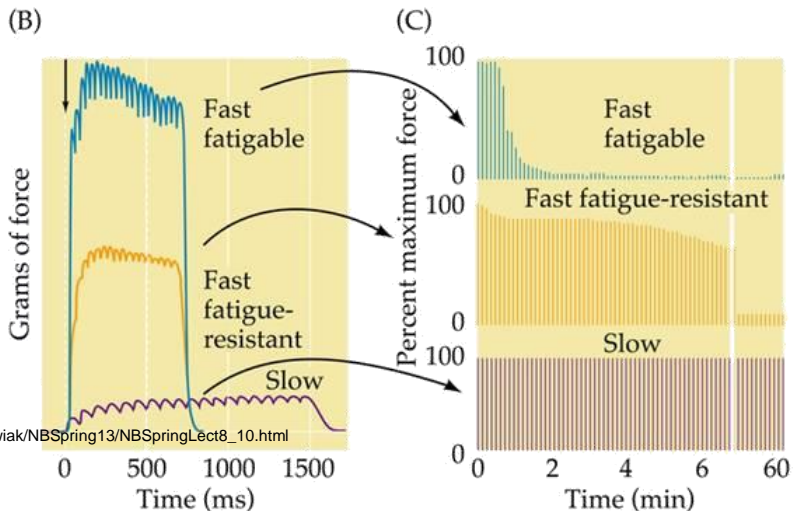
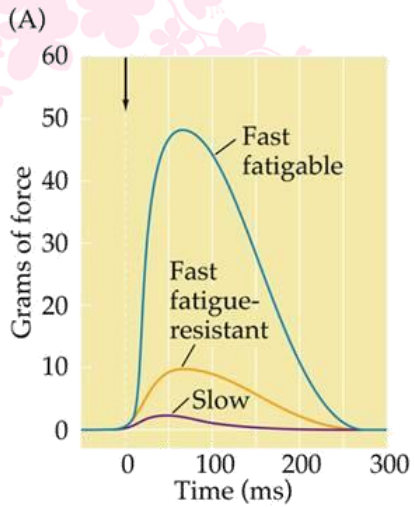
تقسیم بندی واحدهای حرکتی از لحاظ خواص دینامیکی و فیزیولوژیکی :

• **Fast & Fatigable (FF)**

• **Slow(S)**

• **Fast & Fatigue Resistant (FR)**





انواع واحدهای حرکتی بر اساس اندازه

۳۶

• واحد حرکتی بزرگ

- بدنه سلول نرون حرکتی : بزرگ
- قطر آکسون نرون حرکتی: بزرگ
- شاخه های انشعابی آکسون : زیاد

• واحد حرکتی کوچک

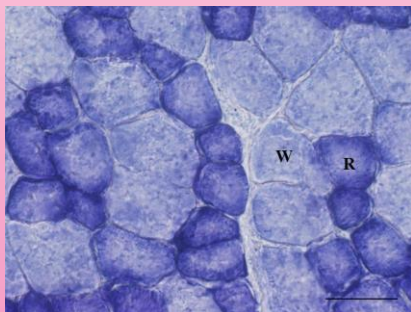
- سرعت هدایت پتانسیل نرون حرکتی : کم
- انشعابات آکسون: کم

انواع عضلات



عضلات سفید:

- واکنش این عضله بسیار سریع است.
- در مدت کوتاهی خسته می‌شود.
- برای فعالیت‌های سریع و قوی مثل پرش مناسب است.
- به طور عمده از واحدهای حرکتی FF با فیبرهایی از نوع IIA و IIB تشکیل شده است.
- به دلیل کم بودن شبکه رگ‌های خونی به رنگ روشن دیده می‌شود.





انواع عضلات

عضلات قرمز:

- این عضله پاسخی آهسته دارد.
- برای فعالیت عضلانی مداوم و طولانی از قبیل حفظ موقعیت و وضعیت بدن و مسابقات ورزشی دراز مدت مناسب است.
- به طور عمده از واحدهای حرکتی نوع SLOW با فیبرهای آهسته از نوع I تشکیل شده است.
- به خاطر گسترده بودن شبکه رگ های خونی به رنگ قرمز در می آید.

فهرست مطالب:

- ✓ مقدمه
- ✓ معماری عضله
- ✓ فیزیولوژی عضله و مکانیزم انقباض
- ✓ واحد حرکتی
- نحوه‌ی تولید نیرو در عضله: اصل اندازه ←
- روابط نیرو-طول و نیرو-سرعت عضله
- انواع انقباض عضلانی
- دوک عضلانی
- اندام تاندون گلژی (GTO)
- مدل‌های عضله

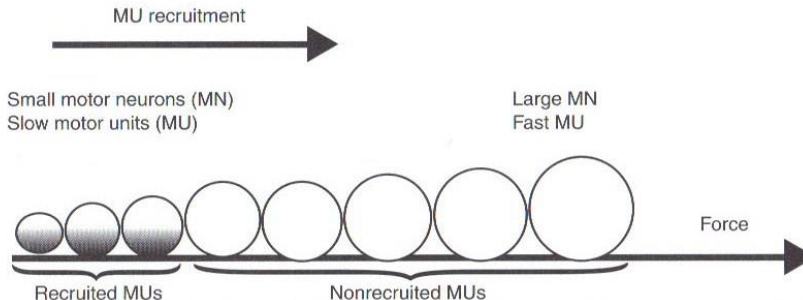


تولید نیرو در عضله

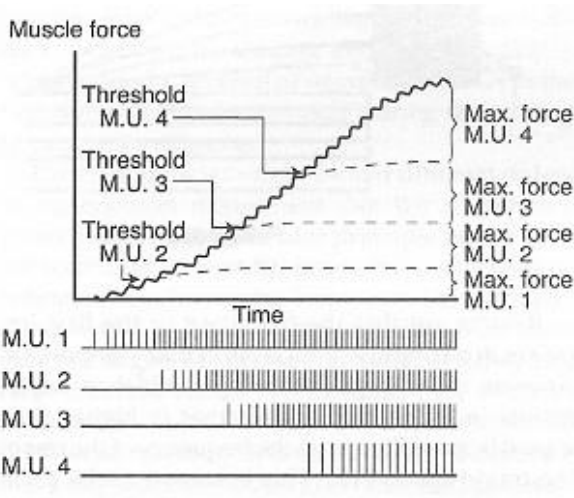
۴۰

فرآیند افزایش نیروی انقباضی در واحدهای حرکتی با توجه به نیروی لازم در دو مرحله صورت می‌پذیرد

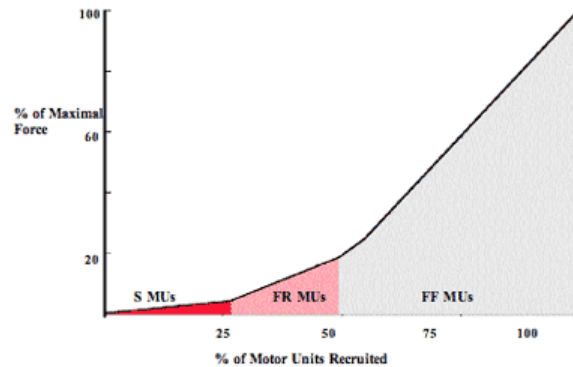
- افزایش نرخ تحریک عصبی واحد حرکتی فعال
- فعال نمودن واحدهای حرکتی جدید



درگیر شدن واحدهای حرکتی در فعالیت انقباضی عضله متناسب با اندازه آنهاست و در یک روند افزایش نیرو ابتدا واحدهای حرکتی کوچکتر و سپس به ترتیب واحدهای حرکتی بزرگتر فعال می‌شوند.



Size Principle



توجیه الکتروفیزیولوژیک اصل اندازه

۴۲

توجیه اصل اندازه با توجه به مقاومت‌های ورودی نورون‌های حرکتی صورت می‌گیرد.

اگر ورودی سیناپسی واحدهای حرکتی مختلف مشابه باشد هنگام تحریک جریان ورودی به همه نرون‌ها یکسان می‌باشد. اما سطح مقطع نرون‌ها متفاوت و در نتیجه مقاومت آن‌ها متفاوت است. پس پتانسیل تحریک در واحدهای حرکتی کوچکتر، بزرگتر است و زودتر به حد آستانه می‌رسد. و زودتر از نرون‌های دیگر تحریک می‌شوند و پیام‌های عصبی را منتقل می‌کنند

$$R = \rho \frac{L}{A}$$

$$V = RI$$

موارد استثناء در اصل اندازه

۴۳

در برخی موارد به دلیل عملکرد حرکتی خاص اصل اندازه در عضله رعایت نمی‌گردد در این موارد CNS مستقیماً برای انتخاب صحیح ترتیب درگیر شدن واحدهای حرکتی وارد عمل شده و متناسب با حرکت مورد نظر انقباض لازم انجام می‌شود. این موضوع در حرکات انقباضی خیلی سریع و قوی دیده می‌شود.

فهرست مطالب:

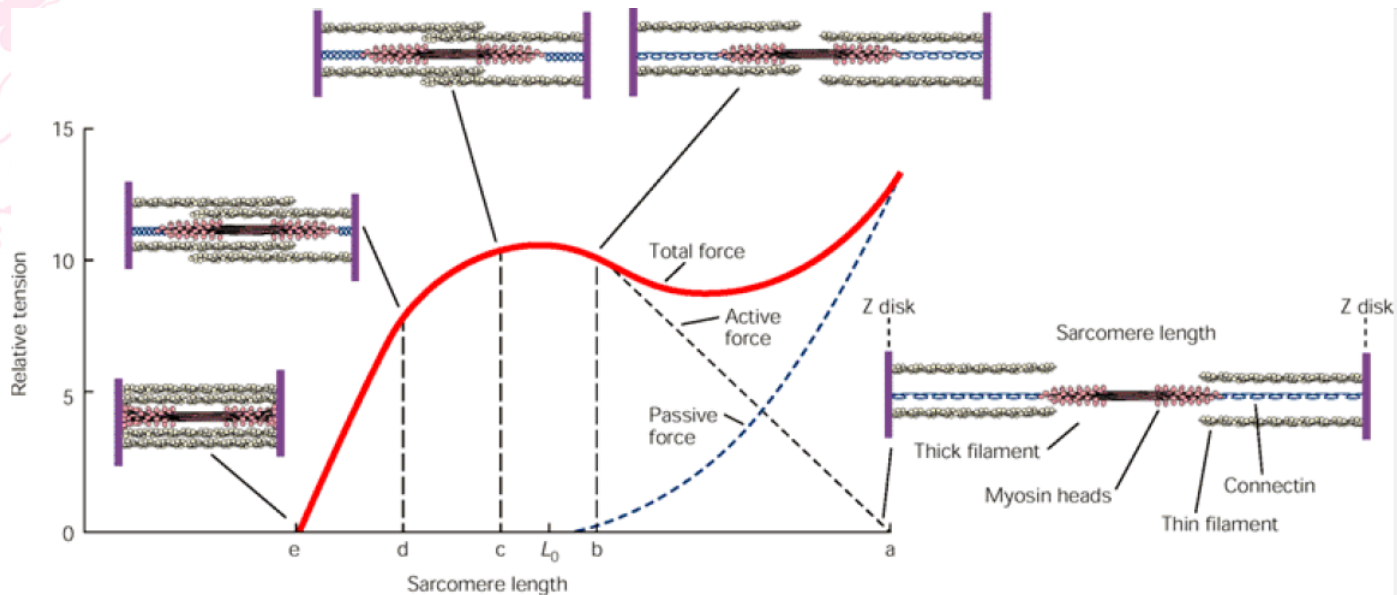
- مقدمه
- معماری عضله
- فیزیولوژی عضله و مکانیزم انقباض
- واحد حرکتی
- نحوه‌ی تولید نیرو در عضله: اصل اندازه
- روابط نیرو-طول و نیرو-سرعت عضله
- انواع انقباض عضلانی
- دوک عضلانی
- اندام تاندون گلژی (GTO)
- مدل‌های عضله



- **نیروی غیرفعال (passive force)**
 - تنها با افزایش طول ماهیچه مخالفت می کند و در طول های کمتر از طول اولیه ماهیچه صفر است.
- **نیروی فعال (active force)**
 - نیرویی است که توسط پل های عرضی و اتصال بین اکتین و میوزین ایجاد می شود.
- **نیروی کلی (total force)**
 - مجموع «نیروی غیرفعال» و «نیروی فعال»، نیروی کلی را ایجاد می کند.

- در طول متوسط سارکومر (L_0) همپوشانی بین اکتین و میوزین بهینه است و نیروی نسبی ماکزیمم است.
- وقتی طول سارکومر برابر a است، همپوشانی بین اکتین و میوزین وجود ندارد و چون سرهای میوزین نزدیک محل اتصال نیستند، پل‌های عرضی (crossbridge) تشکیل نمی‌شود و میزان نیرو کم می‌شود.
- با کاهش طول سارکومر از طول a به b و در نتیجه افزایش همپوشانی اکتین و میوزین، تعداد محل‌های اتصال و در نتیجه تعداد پل‌های عرضی افزایش یافته و نیروی بیشتری تولید می‌گردد.
- در طول $b-c$ میزان نیرو ثابت می‌ماند چون سرهای میوزین در قسمت‌های مرکزی فیلامنت‌های ضخیم وجود ندارد که تشکیل پل دهد.
- در طول $c-d$ نیرو کاهش می‌یابد؛ چون فیلامنت‌های نازک با هم همپوشانی پیدا می‌کنند و عروق مکان‌های اتصال پتانسیل مسدود می‌گردد.
- در طول $d-e$ فیلامنت‌های ضخیم به نوارهای Z متصل شده و مثل فنر فشرده شده با نیروی فعال تولیدشده توسط پل‌های عرضی مخالفت می‌کنند.

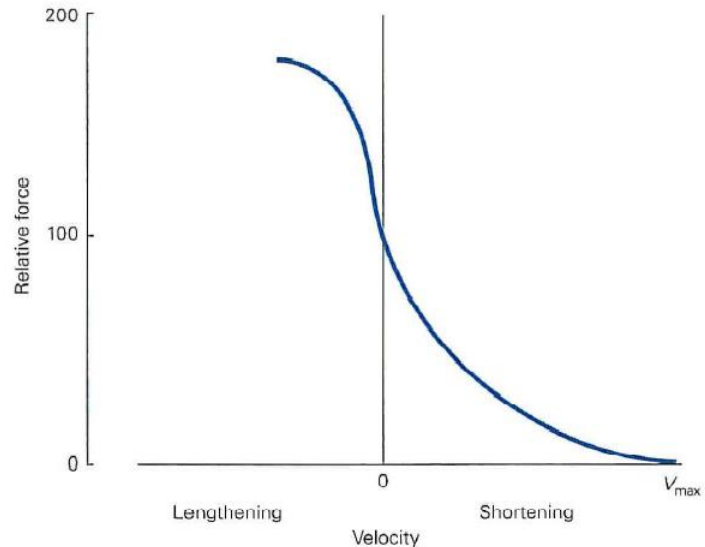




مقدار نیروی انقباضی با سرعت تغییر طول سارکومر تغییر می‌کند.

نسبت به نیرویی که یک سارکومر می‌تواند در هنگام انقباض ایزومتریک (سرعت صفر) اعمال کند، حداکثر نیرو با افزایش سرعت کوتاه شدن سارکومر کاهش می‌یابد. در سرعت کوتاه شدگی ماکزیمم نیروی ماهیچه به حداقل خود می‌رسد. برعکس وقتی سارکومر در حالت فعالیت کش می‌آید، نیروی ماکزیمم افزایش می‌یابد و مقدارش بزرگتر از حالت انقباض ایزومتریک می‌شود.

B Rate of change



فهرست مطالب:

- ✓ مقدمه
- ✓ معماری عضله
- ✓ فیزیولوژی عضله و مکانیزم انقباض
- ✓ واحد حرکتی
- ✓ نحوه‌ی تولید نیرو در عضله: اصل اندازه
- ✓ روابط نیرو-طول و نیرو-سرعت عضله
- انواع انقباض عضلانی 
- دوک عضلانی
- اندام تاندون گلژی (GTO)
- مدل‌های عضله



• Isometric Contraction

- در این انقباض طول ماهیچه با افزایش کشش ماهیچه ثابت می ماند.
- مثال: نگه داشتن وزنه در حالت ایستا در زمان طولانی

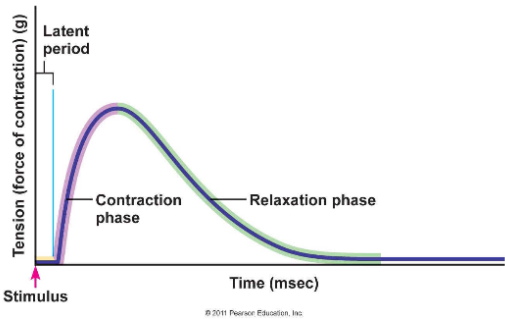
• Concentric Contraction

- در این انقباض طول ماهیچه با افزایش کشش ماهیچه کاهش می یابد. چون نیروی تولید شده برای غلبه بر مقاومت کافی است.
- مثال: بلند کردن وزنه

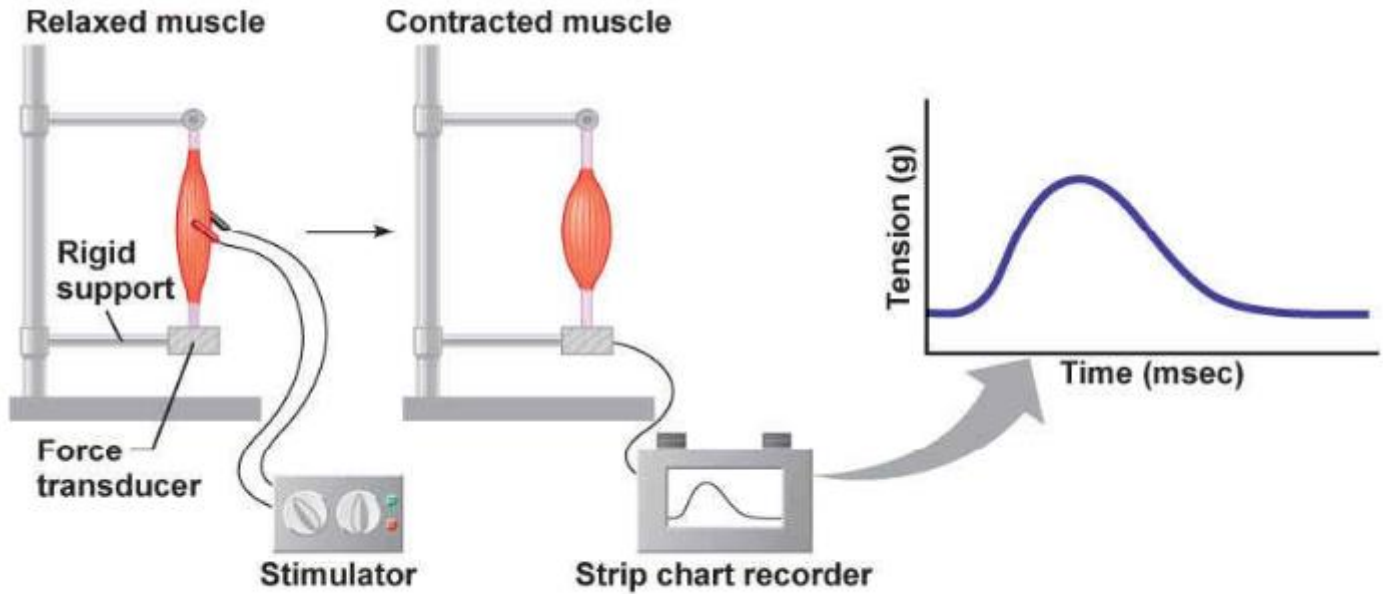
• Eccentric Contraction

- در این انقباض طول ماهیچه با کاهش کشش ماهیچه افزایش می یابد. چون نیروی تولید شده برای غلبه بر مقاومت کافی نیست.
- مثال: پایین آوردن وزنه به آرامی

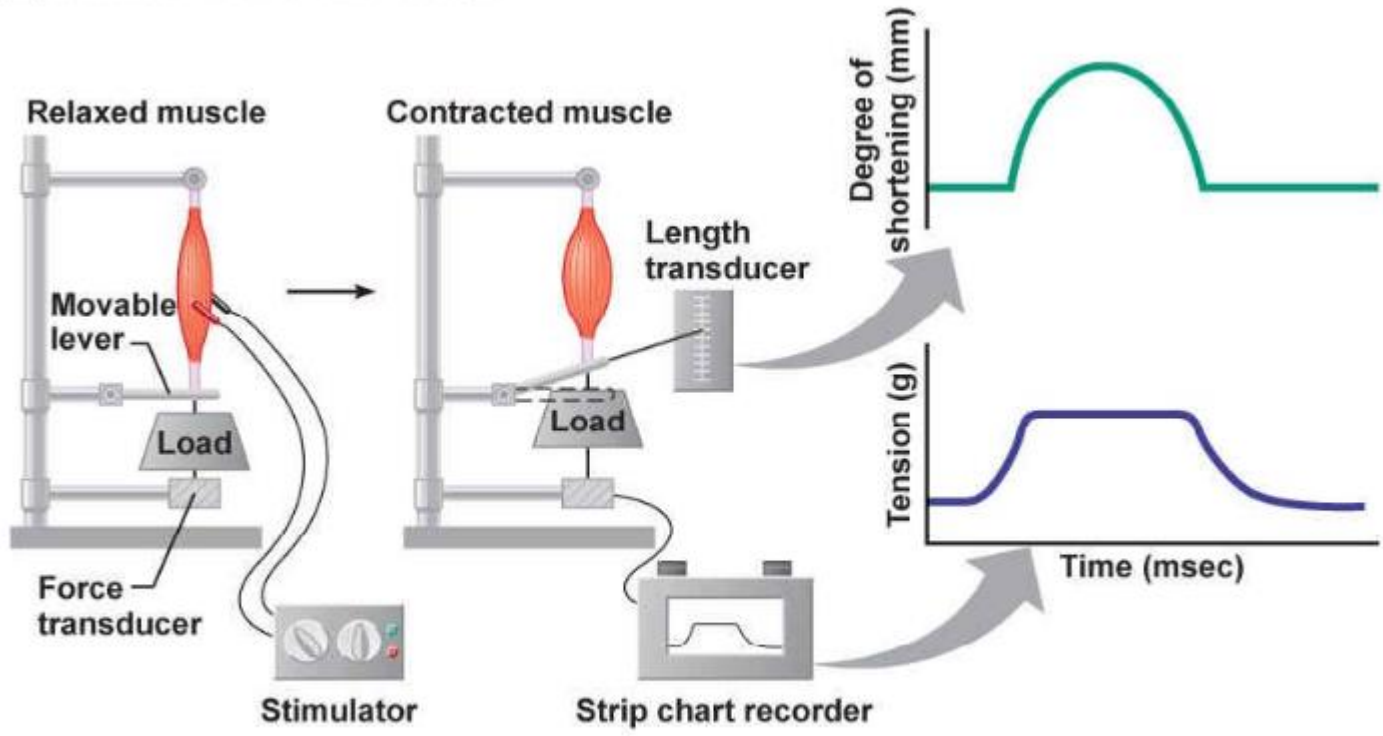
۵۲



© 2011 Pearson Education, Inc.

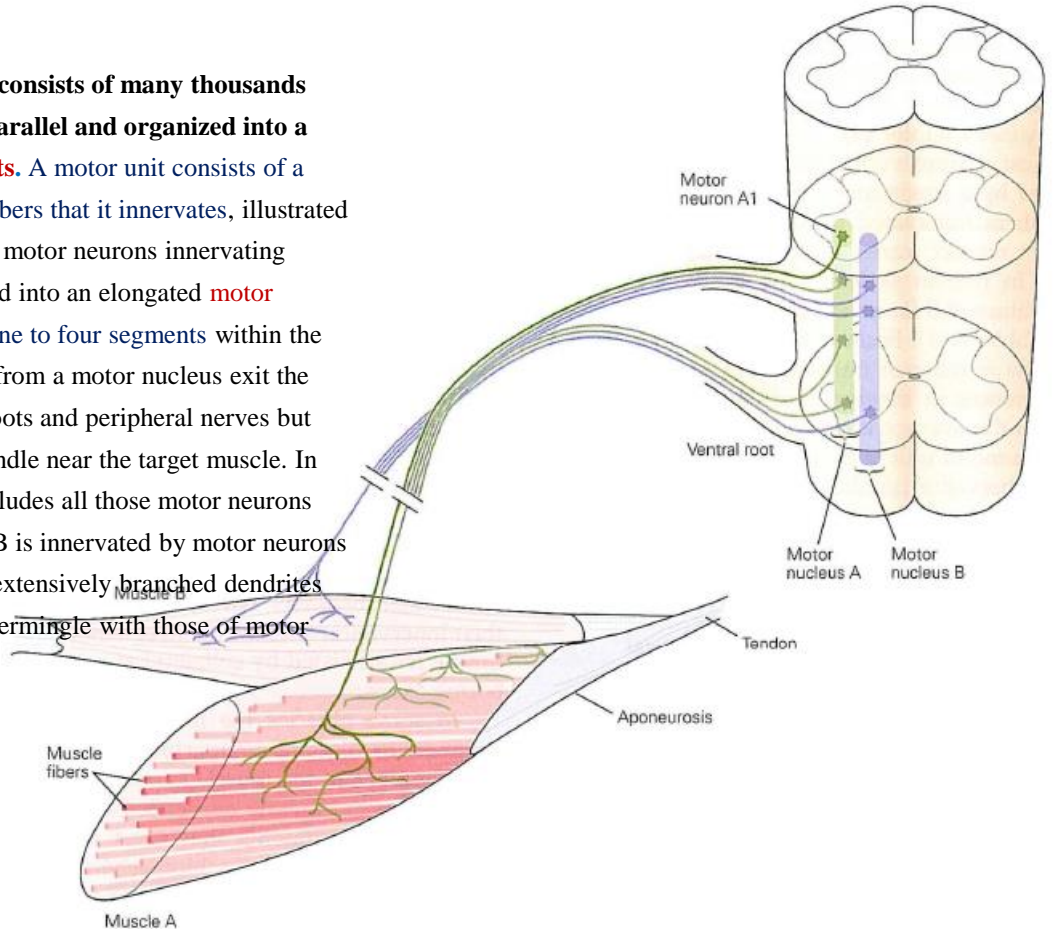


(a) Isometric muscle contraction



(b) Isotonic muscle contraction

Figure 34-1 A typical muscle consists of many thousands of muscle fibers working in parallel and organized into a smaller number of **motor units**. A motor unit consists of a motor neuron and the muscle fibers that it innervates, illustrated here by motor neuron A 1. The motor neurons innervating one muscle are usually clustered into an elongated **motor nucleus** that may extend over one to four segments within the ventral spinal cord. The axons from a motor nucleus exit the spinal cord in several ventral roots and peripheral nerves but are collected into one nerve bundle near the target muscle. In the figure, motor nucleus A includes all those motor neurons innervating muscle A; muscle B is innervated by motor neurons lying in motor nucleus B. The extensively branched dendrites of one motor neuron tend to intermingle with those of motor neurons from other nuclei.



عدد عصبدهی در عضلات اسکلتی انسان

۵۵

Table 34-1 Innervation Numbers in Human Skeletal Muscles

Muscle	Alpha motor axons	Muscle fibers	Innervation number
Biceps brachii	774	580,000	750
Brachioradialis	333	>129,200	>410
Cricothyroid	112	18,550	155
Gastrocnemius (medial)	579	1,042,000	1,800
Interossei dorsales (1)	119	40,500	340
Lumbricales (1)	96	10,269	107
Masseter	1,452	929,000	640
Opponens pollicis	133	79,000	595
Platysma	1,096	27,100	25
Posterior cricoarytenoid cricothyroid	140	16,200	116
Rectus lateralis	4,150	22,000	5
Temporalis	1,331	1,247,000	936
Tensor tympani	146	1,100	8
Tibialis anterior	445	272,850	613
Transverse arytenoid	139	34,470	247

نیروی واحد حرکتی بر حسب نرخ پتانسیل عمل

۵۶

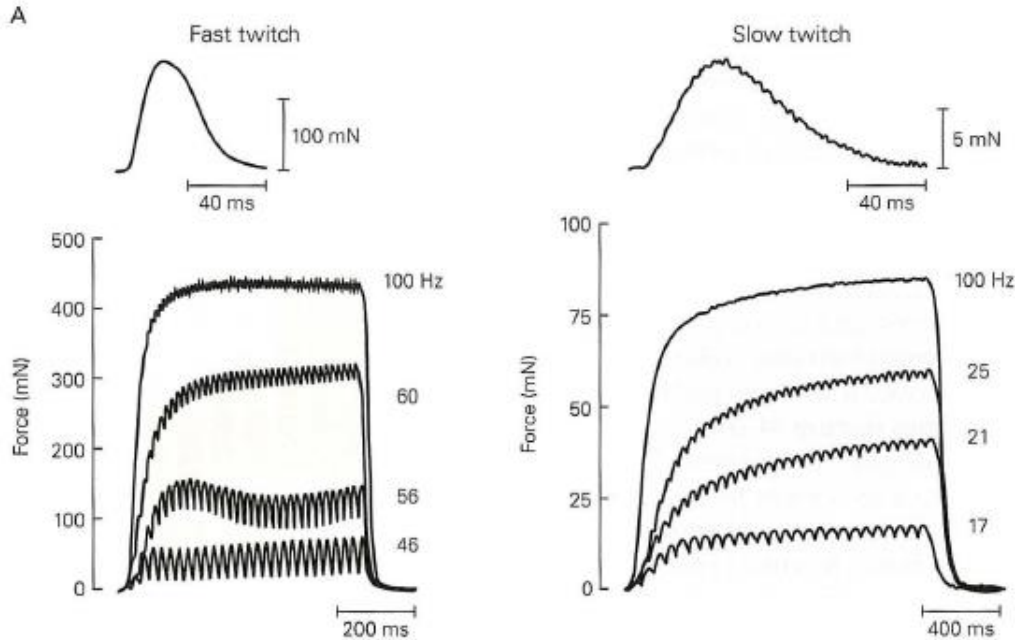


Figure 34-2 The force exerted by a motor unit varies with the rate of the action potentials.

A. Traces show the forces exerted by fast- and slow-twitch motor units in response to a single action potential (top trace) and a series of action potentials (set of four traces below). The time to the peak twitch force, or contraction time, is briefer in the fast-twitch unit. The rates of the action potentials used to evoke the tetanic contractions ranged from 17 to 100 Hz in the slow-twitch unit to 46 to 100 Hz in the fast-twitch unit. The peak force for the 100 Hz tetanus is greater in the fast twitch unit. Note the different force scales for the two sets of traces.

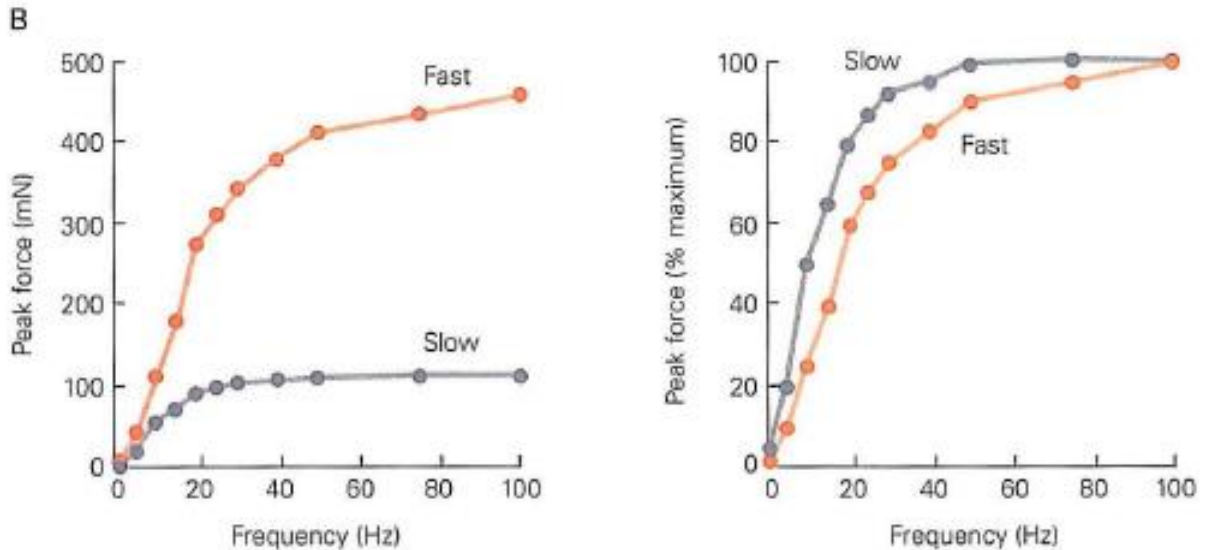
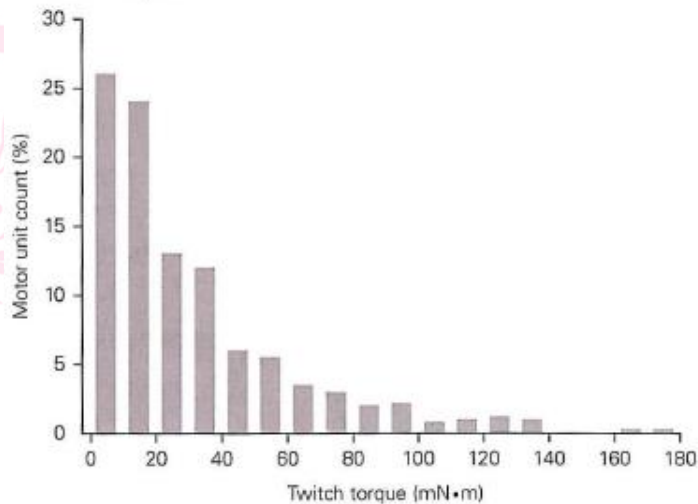


Figure 34-2 The force exerted by a motor unit varies with the rate of the action potentials.

B. Relation between peak force and the rate of action potentials for fast- and slow-twitch motor units. The absolute force (left plot) is greater for the fast-twitch motor unit at all frequencies. At lower stimulus rates (right plot) the force evoked in the slow-twitch motor unit summed to a greater relative force (longer contraction time) than in the fast-twitch motor unit (briefer contraction time).

A Twitch torques



B Twitch contraction times

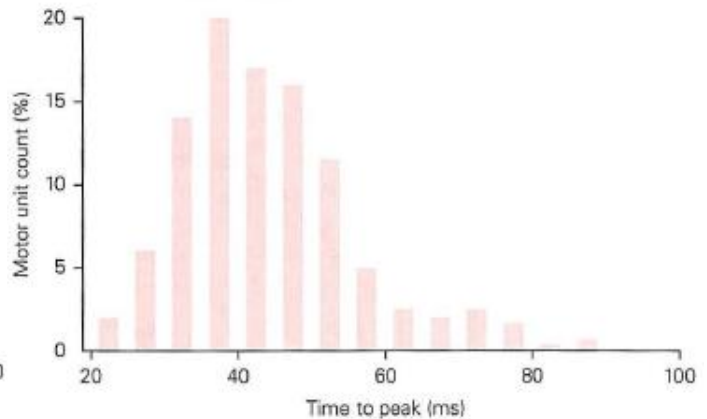
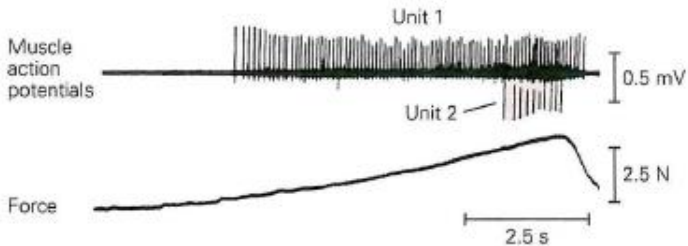


Figure 34-3 Distributions of motor unit properties.

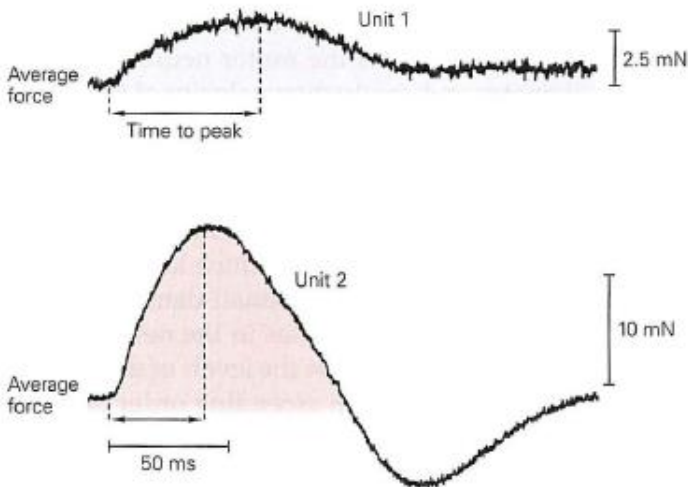
A. Distribution of twitch torques for 528 motor units in the tibialis anterior muscle.

B. Distribution of twitch contraction times for 528 motor units in the tibialis anterior muscle.

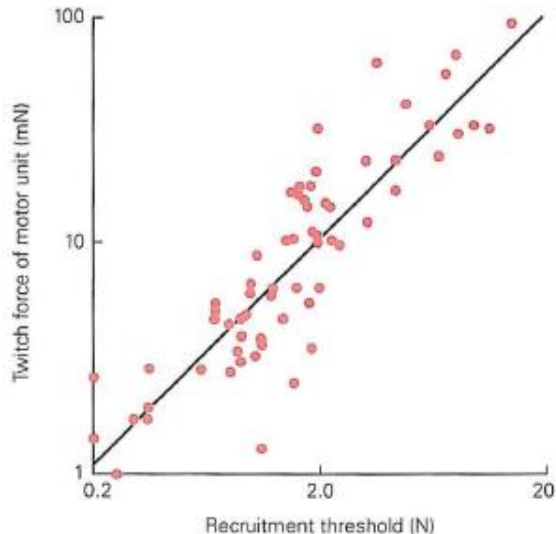
A Action potentials in two motor units



B Force produced by the two units



C Recruitment of 64 motor units in one muscle



B. Average **twitch forces** for motor units 1 and 2 as extracted with an averaging procedure during the voluntary contraction.
C. The plot shows the forces at which 64 motor units in a hand muscle of one person were recruited (recruitment threshold) during a voluntary contraction versus the twitch forces of the motor units.

Figure 34-4 Motor units that exert low forces are recruited before those that exert greater forces.

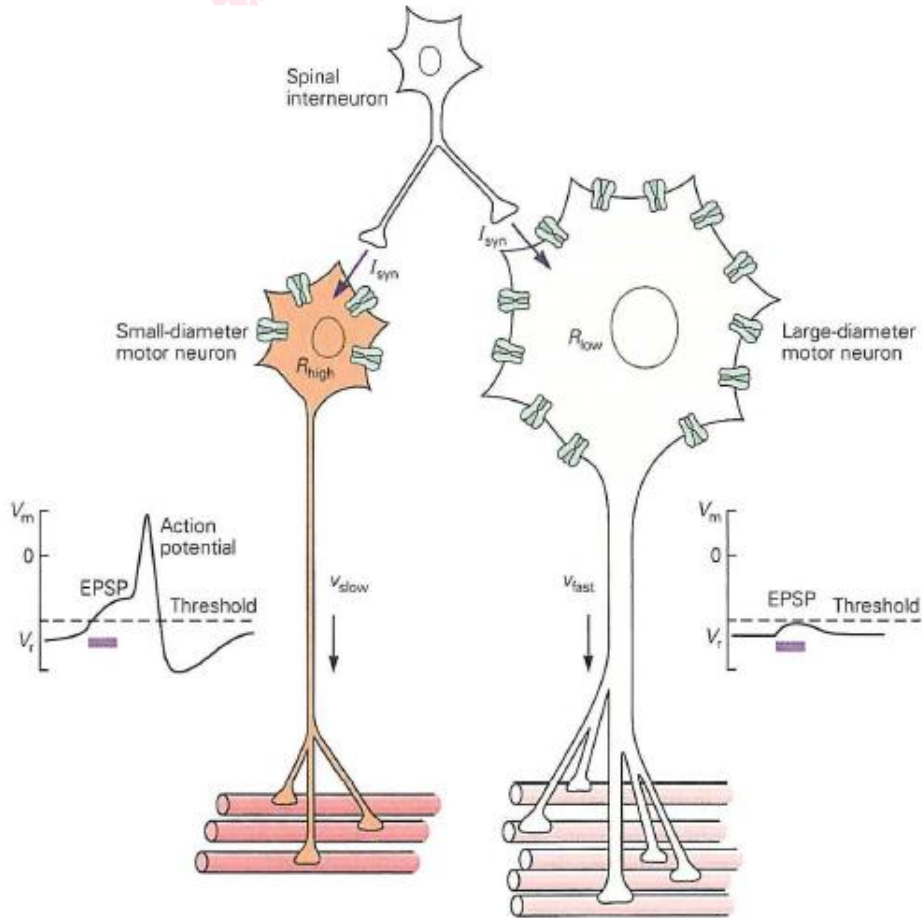
A. Action potentials in two motor units were recorded concurrently with a single intramuscular electrode while the subject gradually increased muscle force. Motor unit 1 began discharging action potentials near the beginning of the voluntary contraction, and its discharge rate increased during the contraction. Motor unit 2 began discharging action potentials near the end of the contraction.

اثر اندازه‌ی نرون حرکتی بر پاسخ حاصل از ورودی سیناپسی

۶۰

Figure 34-5 The response of a motor neuron to synaptic input depends on its size.

Two motor neurons of different sizes have the same resting membrane potential (V_r) and receive the same excitatory synaptic current (I_{syn}) from a spinal interneuron. Because the small motor neuron has a smaller surface area, it has fewer parallel ion channels and therefore a higher resistance (R_{high}). According to Ohm's law ($V = IR$), I_{syn} in the small neuron produces a large **excitatory postsynaptic potential (EPSP)** that reaches **threshold**, resulting in the discharge of an action potential. The small motor neuron has a small-diameter axon that conducts the action potential at a **low velocity (v_{slow})** to **fewer muscle fibers**. In contrast, the large motor neuron has a larger surface area, which results in a lower transmembrane resistance (R_{low}) and a smaller EPSP that does not reach threshold in response to I_{syn} .



تنظیم نیروی عضله با تعداد واحدهای حرکتی و نرخ دشارژ

۶۱

Figure 34-6 Muscle force can be adjusted by varying the number of active motor units and their discharge rate.

A gradual increase and then a decrease in the force (blue line) exerted by the **knee extensor muscles** involved the concurrent activation of four (out of many) motor units. The muscle force was changed by varying both the **number of motor units that were active** and **the rate at which the motor neurons discharged action potentials**. Motor unit 1 was activated when muscle force reached 20% of maximum. Initially the motor neuron discharged action potentials at a rate of 9 Hz. As force increased, the discharge rate increased up to 15 Hz, when both the force and discharge rate declined, and the motor unit 2, 3, and 4 were inactivated at 14% of maximal force. Motor units 2, 3, and 4 were activated at greater forces but discharge rate was modulated similarly.

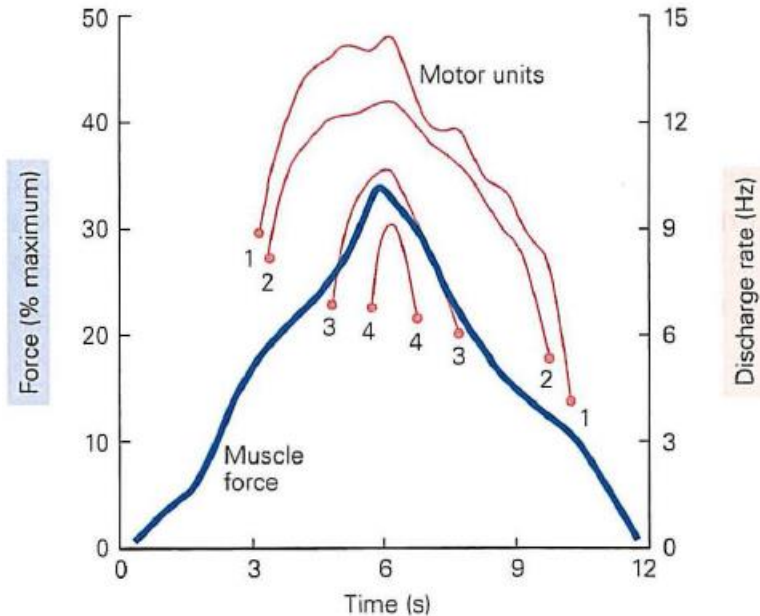


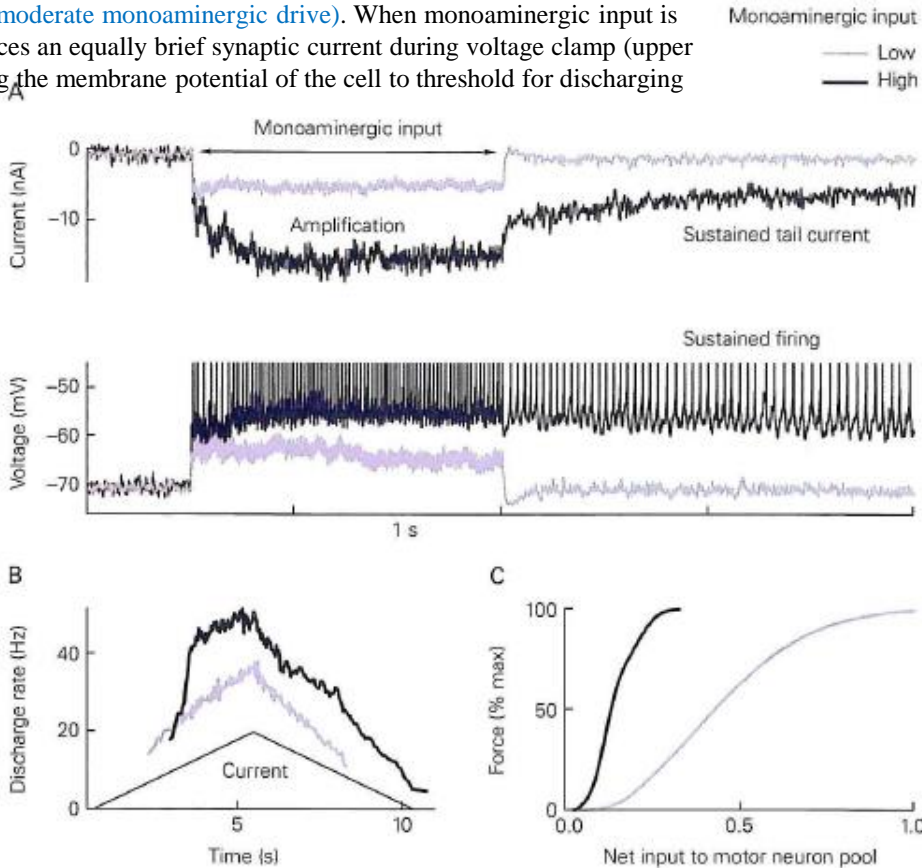
Figure 34-7 Effects of monoaminergic input on motor neurons.

A. Membrane currents and potentials in spinal motor neurons of adult cats that were either **deeply anesthetized** (low monoaminergic drive) or **decerebrate** (moderate monoaminergic drive). When monoaminergic input is absent or low, a brief excitatory input produces an equally brief synaptic current during voltage clamp (upper record). This current is not sufficient to bring the membrane potential of the cell to threshold for discharging action potentials (lower record).

During high levels of monoaminergic input the same brief excitatory input activates a persistent inward current in the dendrites, which amplifies the synaptic current and generates a long-lasting tail current (upper record). This persistent inward current causes a high discharge rate during the input and the tail current sustains the discharge after the input ceases (lower record). A brief inhibition will return the cell to the resting state.

B. With high levels of monoaminergic input the persistent inward current produces a much higher discharge rate for a given amount of current.

C. When the entire motor pool innervating a muscle is considered, the monoamine-induced increase in the rate of motor neuron discharge produces a much larger force for a given amount of input and maximal force is achieved with less input to the motor neuron pool.



سارکومر: واحد عملکردی پایه عضله

۶۳

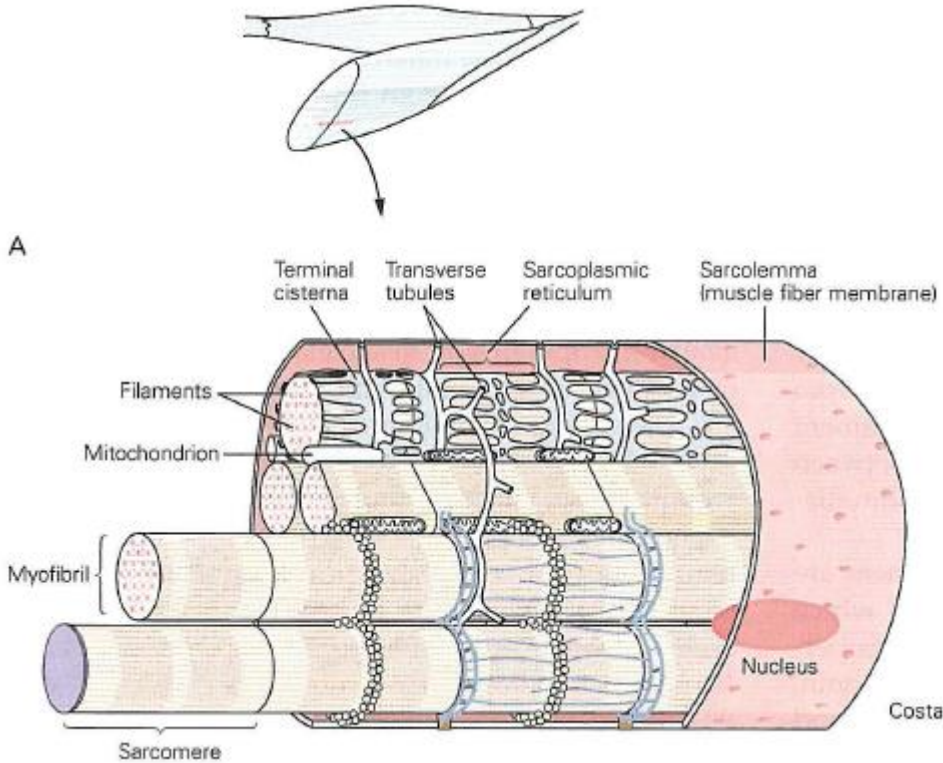
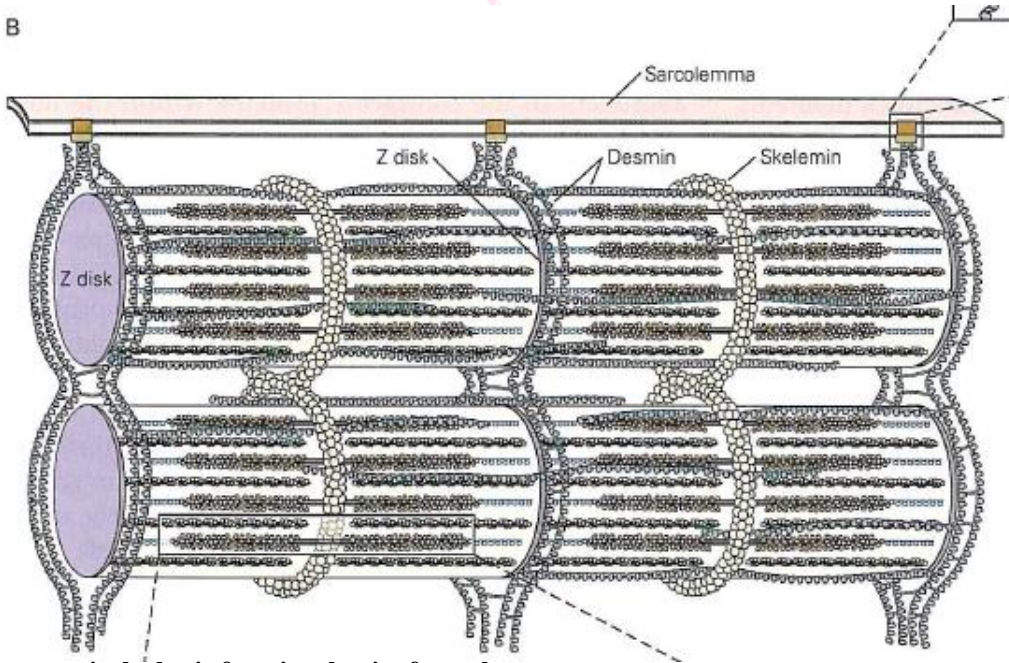


Figure 34-8 The sarcomere is the basic functional unit of muscle.

A. This section of a **muscle fiber** shows its anatomical organization. Several **myofibrils** lie side-by-side in a fiber, and each myofibril is made up of **sarcomeres** arranged end-to-end and separated by Z disks (see part B). The myofibrils are surrounded by an activation system that includes the transverse tubules, terminal cisternae, and sarcoplasmic reticulum .

سارکومر: واحد عملکردی پایه عضله



۶۴

Figure 34-8 The sarcomere is the basic functional unit of muscle.

B. Sarcomeres are connected to one another and to the muscle fiber membrane by the cytoskeletal lattice. The cytoskeleton influences the length of the contractile thick and thin filaments, maintains the alignment of these filaments within a sarcomere, connects adjacent myofibrils, and transmits force to the extracellular matrix of connective tissue through costameres. One consequence of this organization is that the force exerted by the contractile elements in a sarcomere can be transmitted along and across sarcomeres (through desmin and skelemin), within and between sarcomeres (through nebulin and titin). And to the costameres. The Z disk is a focal point for many of these connections.

سارکومر: واحد عملکردی پایه عضله

۶۵

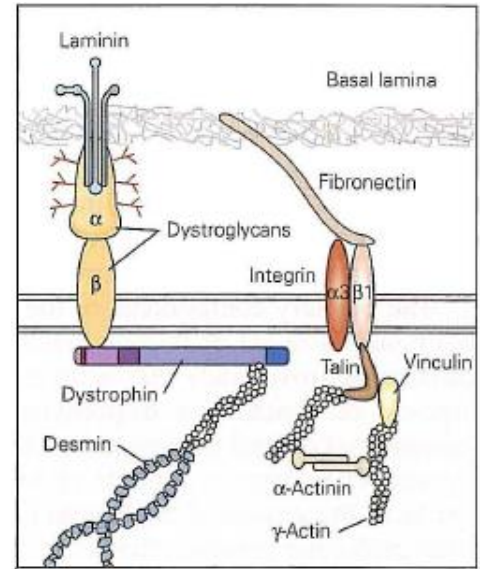
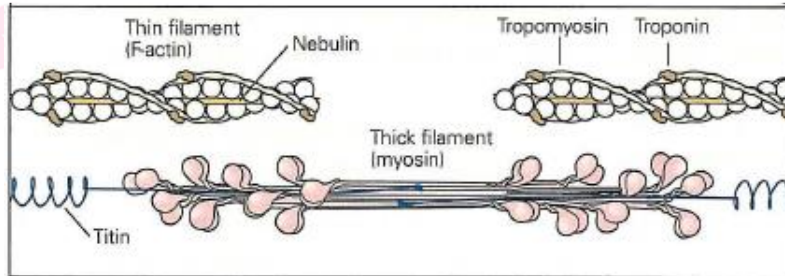


Figure 34-8 The sarcomere is the basic functional unit of muscle.

C. The thick and thin filaments consist of various contractile proteins. The thin filament includes polymerized actin along with the regulatory proteins tropomyosin and troponin. The thick filament is an array of myosin molecules; each molecule includes a stem that terminates in a double globular head, which extends away from the filament..

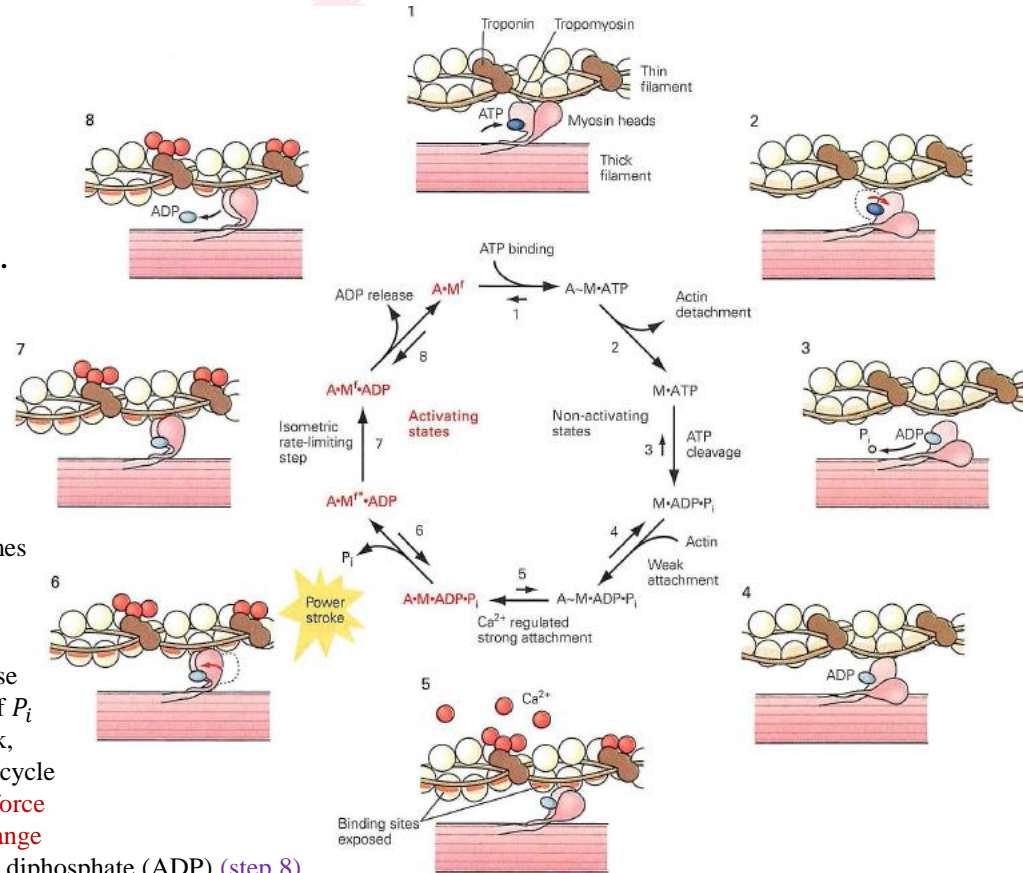


Figure 34-9 The cross bridge cycle.

Several nonactivating states are followed by several activating states triggered by Ca^{2+} . The cycle begins at the top (step 1) with the binding of **adenosine triphosphate (ATP)** to the myosin head. The myosin head detaches from actin (step 2), ATP is hydrolyzed to phosphate (P_i and ADP (step 3), and the myosin becomes weakly bound to actin (step 4). The binding of Ca^{2+} to troponin causes tropomyosin to slide over actin and enables the two myosin heads to close (step 5). This results in the release of P_i and the extension of the myosin neck, the power stroke of the cross bridge cycle (step 6). Each cross bridge exerts a force of about 2 pN during a structural change (step 7) and the release of adenosine diphosphate (ADP) (step 8).

(\bullet , strong binding; \sim , weak binding; M^f , cross bridge force of myosin; and M^{f*} , force-bearing state of myosin).

رابطه‌ی نیرو-طول (سارکومر - عضله)

۶۷

A Change in length

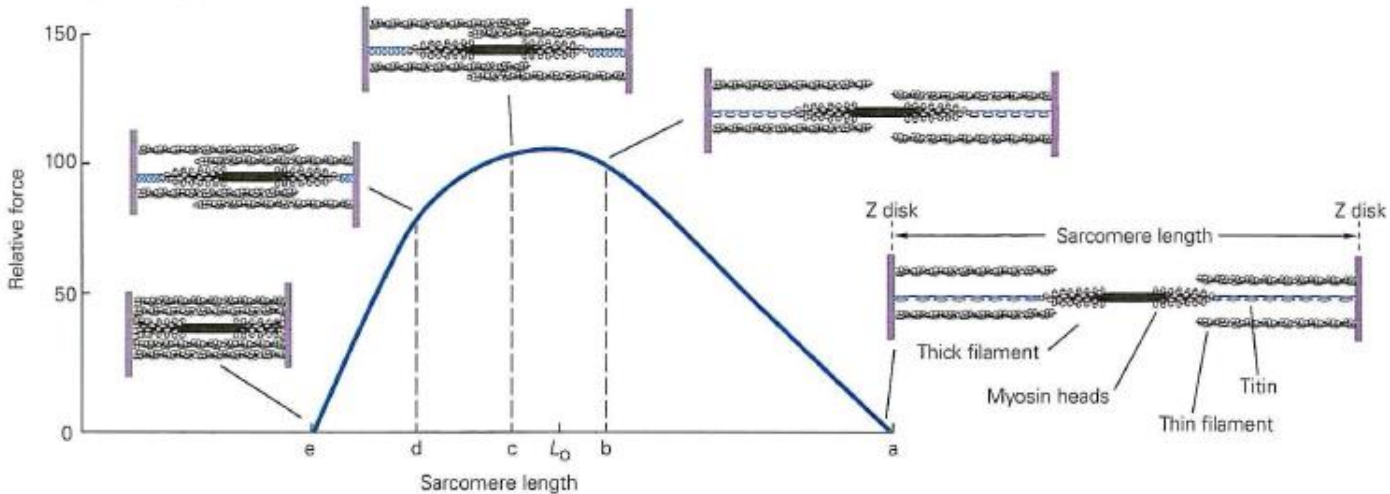


Figure 34-10 Contractile force varies with the change in sarcomere length and velocity.

A. Change in length. At an intermediate sarcomere length, L_0 , the amount of overlap between actin and myosin is optimal and the relative force is maximal. When the sarcomere is stretched beyond the length at which the thick and thin filaments overlap (length a), cross bridges cannot form and no force is exerted. As sarcomere length decreases and the overlap of the thick and thin filaments increases (between lengths a and b), the force increases because the number of cross bridges increases. With further reductions in length (between lengths c and e) the extreme overlap of the thin filaments with each other occludes potential attachment sites and the force decreases.

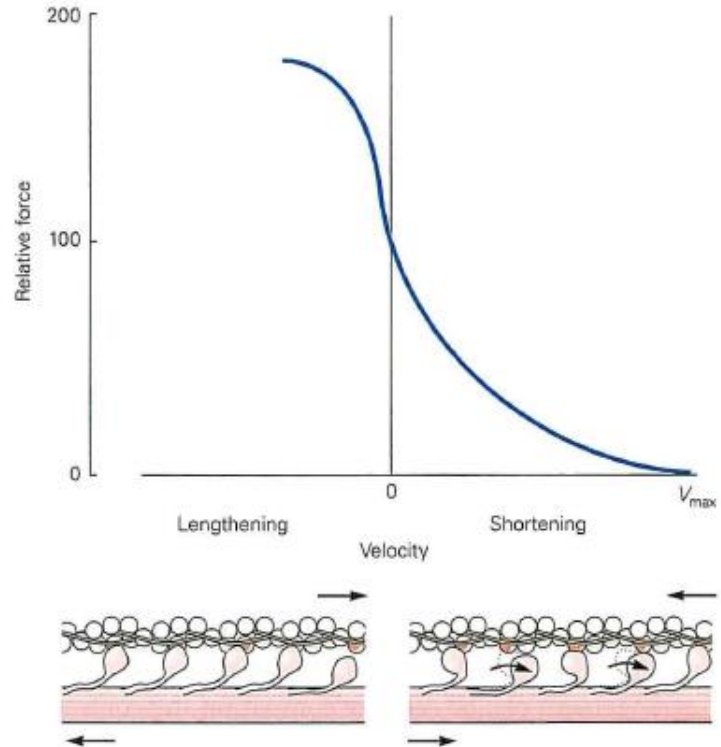
رابطه‌ی نیرو-سرعت (سارکومر - عضله)

۶۸

Figure 34-10 Contractile force varies with the change in sarcomere length and velocity.

B. Rate of change. Contractile force varies with the rate of change in sarcomere length. Relative to the force that a sarcomere can exert during an **isometric contraction (zero velocity)**, the peak force declines as the rate of shortening increases. At the maximal shortening velocity (V_{max}) muscle force reaches a minimum. In contrast, when the sarcomere is lengthened while being activated, the peak force increases to values greater than those during an isometric contraction. Shortening causes the myosin heads to spend more time near the end of their power stroke, where they produce less contractile force, and more time detaching, recocking, and reattaching, during which they produce no force. When the muscle is actively lengthened the myosin heads spend more time stretched beyond their angle of attachment and little time unattached because they do not need to be recocked after being pulled away from the actin in this manner.

B Rate of change



چیدمان‌های متداول تاندون و عضله

۶۹

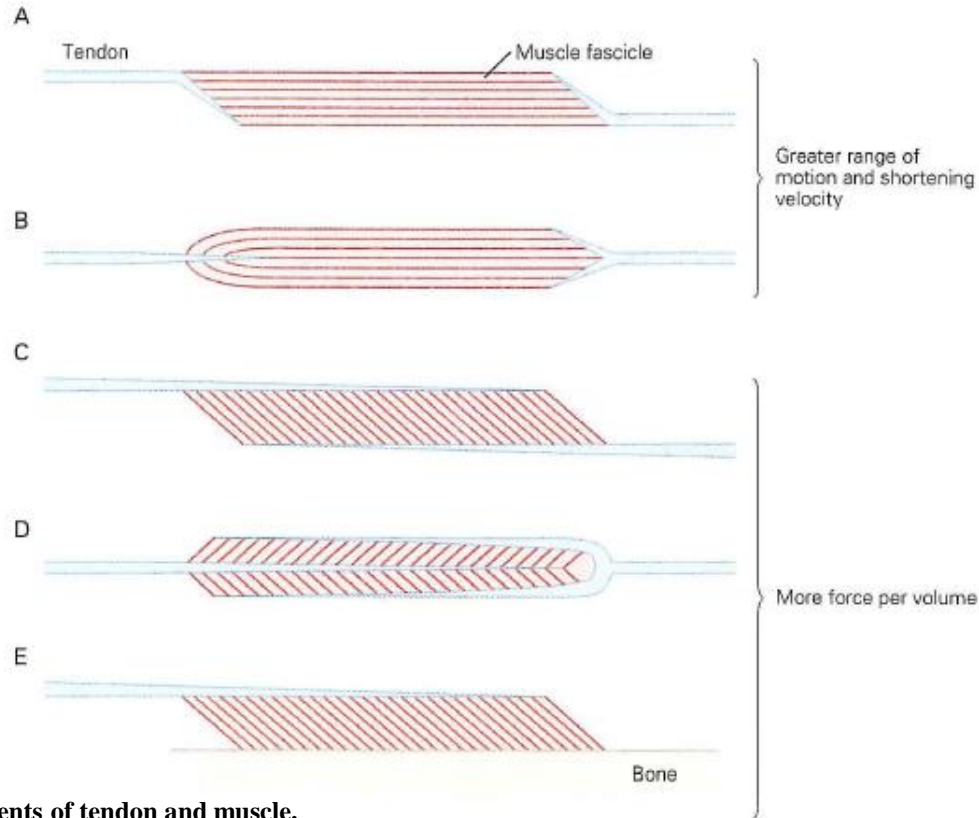


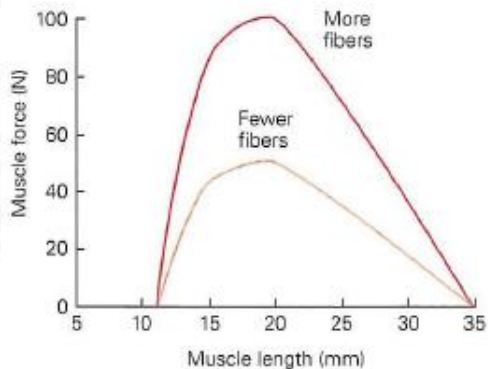
Figure 34-11 Five common arrangements of tendon and muscle.

اثر ابعاد عضله بر بیشینه نیرو و بیشینه سرعت انقباض

۷۰

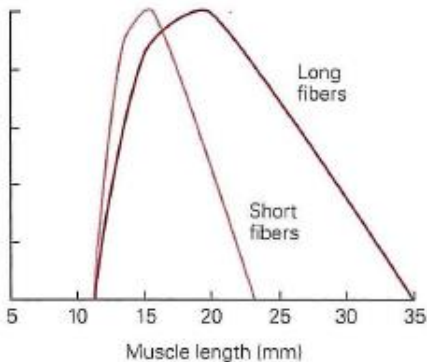
A Different number of fibers

Force versus muscle length



B Different fiber lengths

Force versus muscle length



Force versus muscle velocity

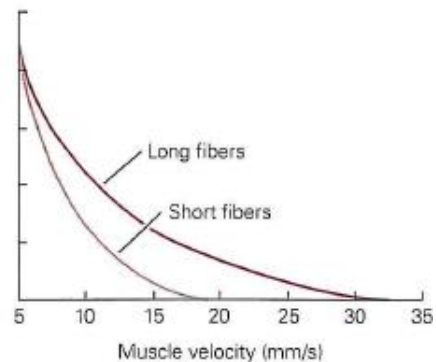


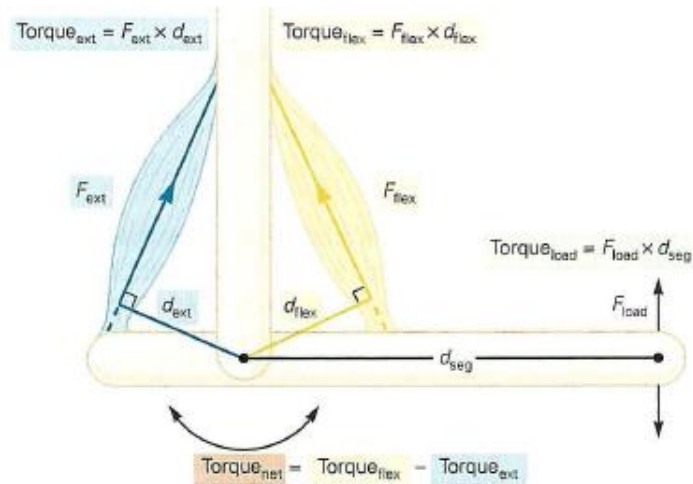
Figure 34-12 Muscle dimensions influence the peak force and maximal shortening velocity.

A. Muscle force at various muscle lengths for two muscles with similar fiber lengths but different numbers of muscle fibers (different cross-sectional area). The muscle with twice as many fibers exerts greater force.

B. Muscle force at various muscle lengths for two muscles with the same cross-sectional area but different fiber lengths. The muscle with longer fibers (about twice as long as those of the other muscle) has an increased range of motion (left plot). It also has a greater maximal shortening velocity and exerts greater force at a given absolute velocity (right plot).

Figure 34-13 Muscle torque varies over a joint's range of motion.

A muscle exerts a torque about a joint that is the product of its contractile force (F) and its moment arm at the joint (d). The moment arm is the shortest perpendicular distance from the line of pull of the muscle to the joint's center of rotation. Because the moment arm changes when the joint rotates, muscle torque varies with angular displacement about the joint. The net torque about a joint, which determines the mechanical action, is the difference in the torques exerted by opposing muscles, such as extensors (ext) and flexors (flex). Similarly, a force applied to the limb (F_{load}) will exert a torque about the joint that depends on F_{load} and its distance from the joint (d_{seg}).



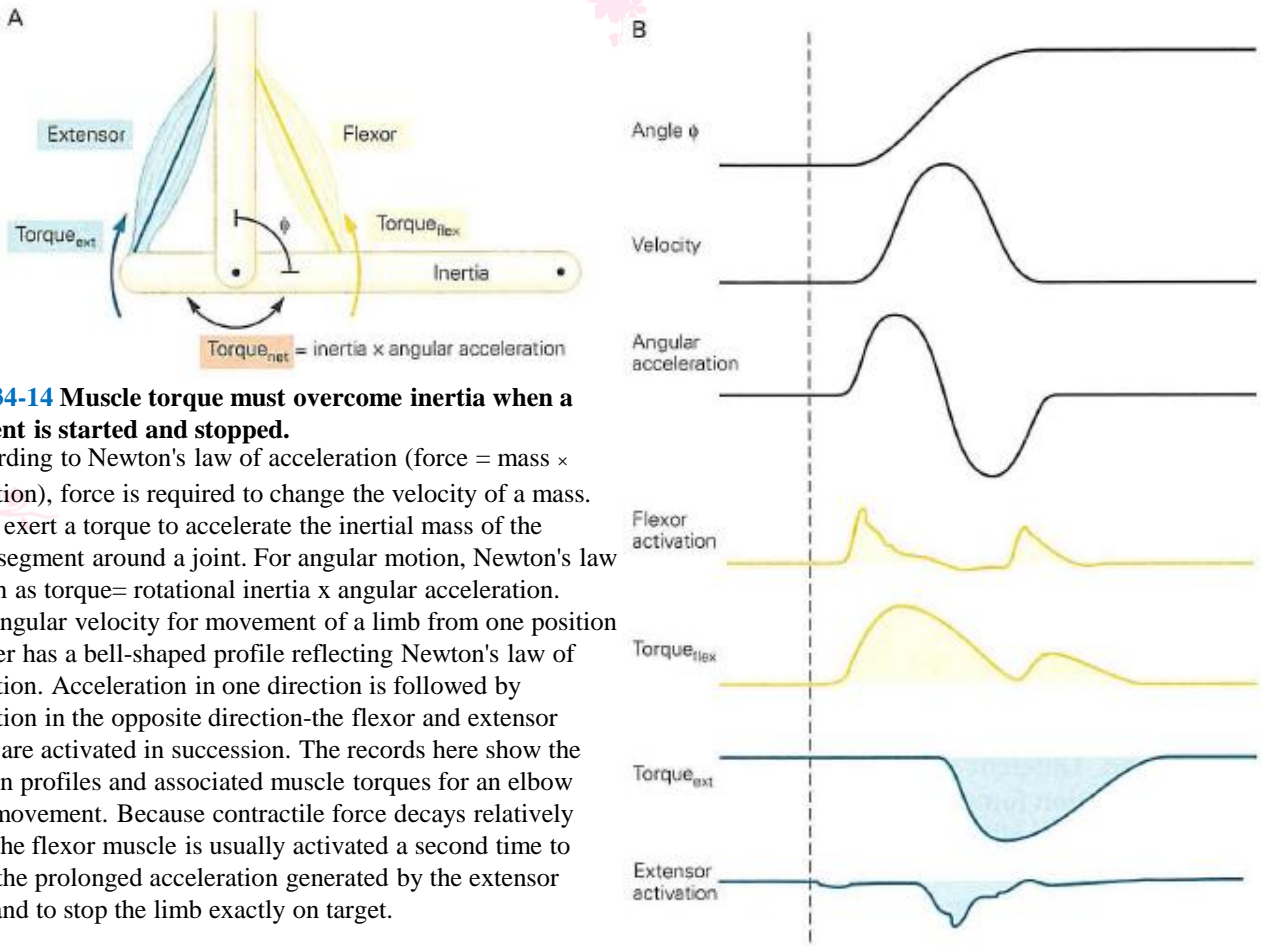


Figure 34-14 Muscle torque must overcome inertia when a movement is started and stopped.

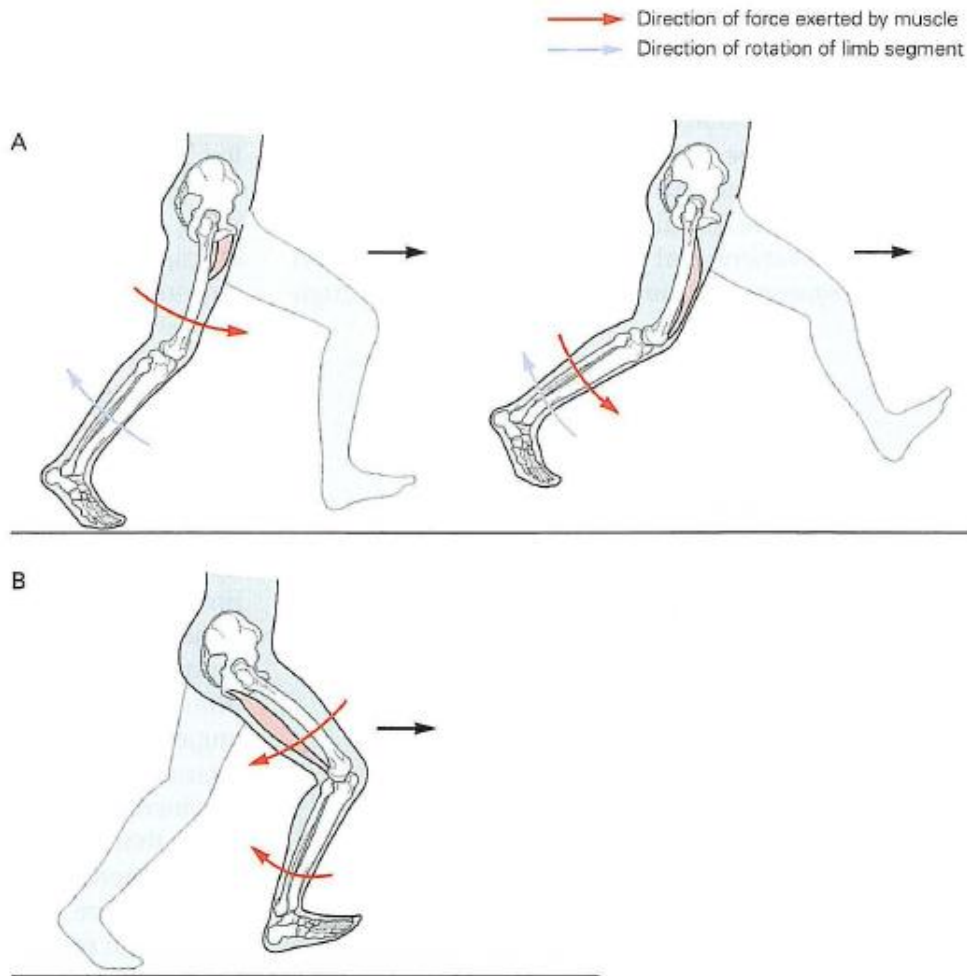
A. According to Newton's law of acceleration (force = mass × acceleration), force is required to change the velocity of a mass. Muscles exert a torque to accelerate the inertial mass of the skeletal segment around a joint. For angular motion, Newton's law is written as torque= rotational inertia x angular acceleration.

B. The angular velocity for movement of a limb from one position to another has a bell-shaped profile reflecting Newton's law of acceleration. Acceleration in one direction is followed by acceleration in the opposite direction—the flexor and extensor muscles are activated in succession. The records here show the activation profiles and associated muscle torques for an elbow flexion movement. Because contractile force decays relatively slowly, the flexor muscle is usually activated a second time to counter the prolonged acceleration generated by the extensor muscle and to stop the limb exactly on target.

Figure 34-15 A single muscle can influence the motion about many joints.

A. Muscles that cross one joint can accelerate an adjacent body segment. For example, at the beginning of the swing phase while running, the hip flexor muscles are activated to accelerate the thigh forward (red arrow). This action causes the lower leg to rotate backward (blue arrow) and the knee joint to flex. To control the knee joint flexion during the first part of the swing phase, the knee extensor muscles are activated and undergo a lengthening contraction to accelerate the lower leg forward (red arrow) while it continues to rotate backward (blue arrow).

B. Many muscles cross more than one joint to exert an effect on more than one body segment. For example, the hamstring muscles of the leg accelerate the hip in the direction of extension and the knee in the direction of flexion (red arrows). At the end of the swing phase during running, the hamstring muscles are activated and undergo lengthening contractions to control the forward rotation of the leg (hip flexion and knee extension). This strategy is more economical than activating individual muscles at the hip and knee joints to control the forward rotation of the leg.



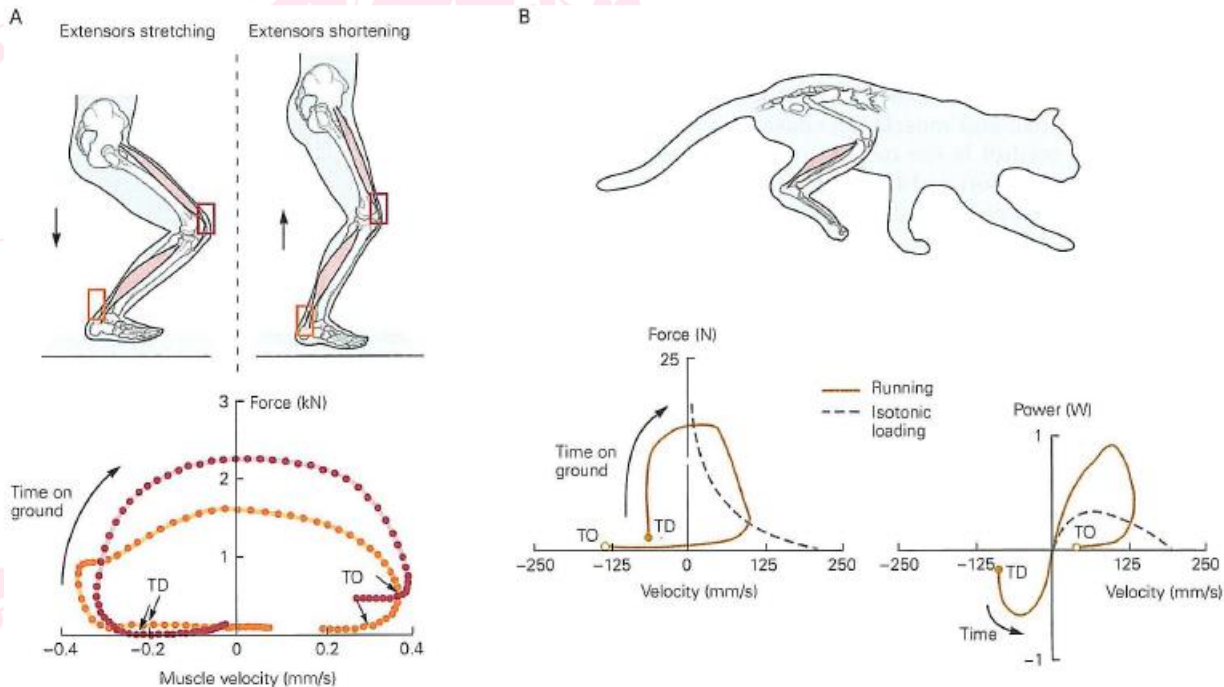


Figure 34-16 An initial phase of negative work enhances subsequent positive work performed by the muscle. (Reproduced, with permission, from Finni, Komi, and Lepola 2000 and from Gregor et al. 1988.)

A. The force in the Achilles tendon and patellar tendon vary during the ground-contact phase of two-legged hopping. The feet contact the ground at touchdown (TD) and leave the ground at toe-off (TO). For approximately the first half of the movement the quadriceps and triceps surae muscles lengthen, performing negative work (negative velocity). The muscles perform positive work when they shorten (positive velocity).

B. The force exerted by the soleus muscle of a cat running at moderate speed varies from the instant the paw touches the

ground (TD) until it leaves the ground (TO). The force exerted by the muscle during the shortening contraction is greater than the peak forces measured when the muscle contracts maximally against various constant loads (isotonic loading). Negative velocity reflects a lengthening contraction in the soleus muscle. The power produced by the soleus muscle of the cat during running is greater than that produced in an isolated-muscle experiment (dashed line). The phase of negative power corresponds to the lengthening contraction just after the paw is placed on the ground (TD), when the muscle performs negative work.

فهرست مطالب:

- ✓ مقدمه
- ✓ معماری عضله
- ✓ فیزیولوژی عضله و مکانیزم انقباض
- ✓ واحد حرکتی
- ✓ نحوه‌ی تولید نیرو در عضله: اصل اندازه
- ✓ روابط نیرو-طول و نیرو-سرعت عضله
- ✓ انواع انقباض عضلانی
- دوک عضلانی 
- اندام تاندون گلژی (GTO)
- مدل‌های عضله



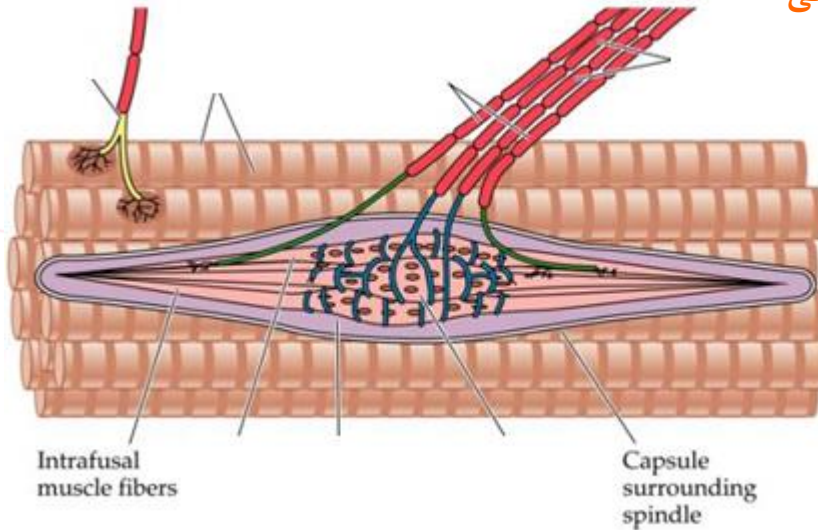
معرفی دوک عضلانی و نقش آن

دوک عضلانی کپسولی از بافت همبند در درون عضله است که نقش حسگر را ایفا می‌کند.

۷۶

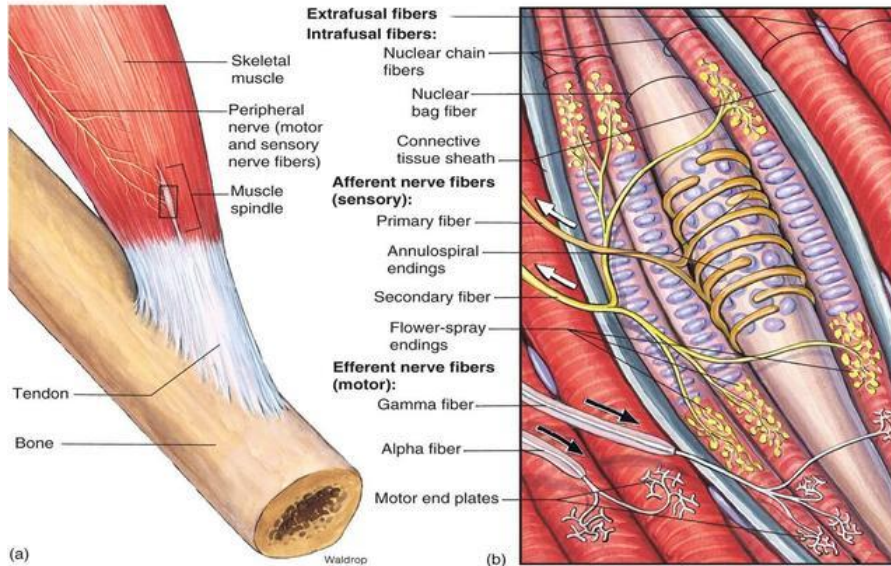
اجزای دوک عضلانی:

- غلافی دوکی شکل از بافت همبند
- تارهای عضلانی درون دوکی
- ارتباطات عصبی



طول دوک عضلانی حدود یک سانتیمتر یا کمتر است.

بخش انتهایی غلاف دوک عضلانی باریک شده و به اپی‌میزیوم عضله متصل می‌گردد.



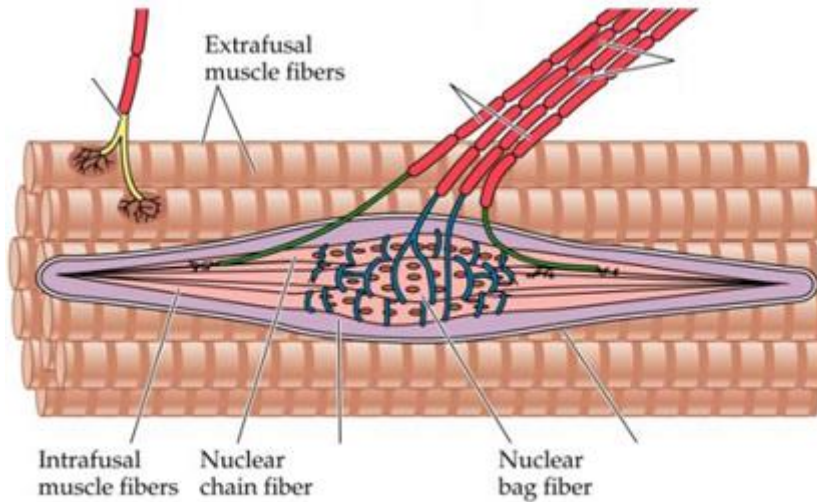
انواع تارهای عضلانی در عضله

تارهای عضلانی بیرون دوکی (extrafusal muscle fibers)

تارهای عضلانی درون دوکی (intrafusal muscle fibers)

تارهای هسته کیسه‌ای (nuclear bag fibers)

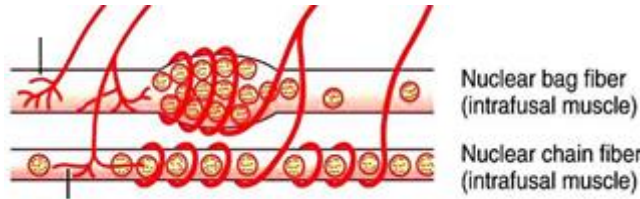
تارهای هسته زنجیری (nuclear chain fibers)



در دوک عضلانی حدود دو تا ده تار عضلانی درون دوکی وجود دارد.

علت نامگذاری هسته کیسه‌ای و هسته زنجیری

۷۹

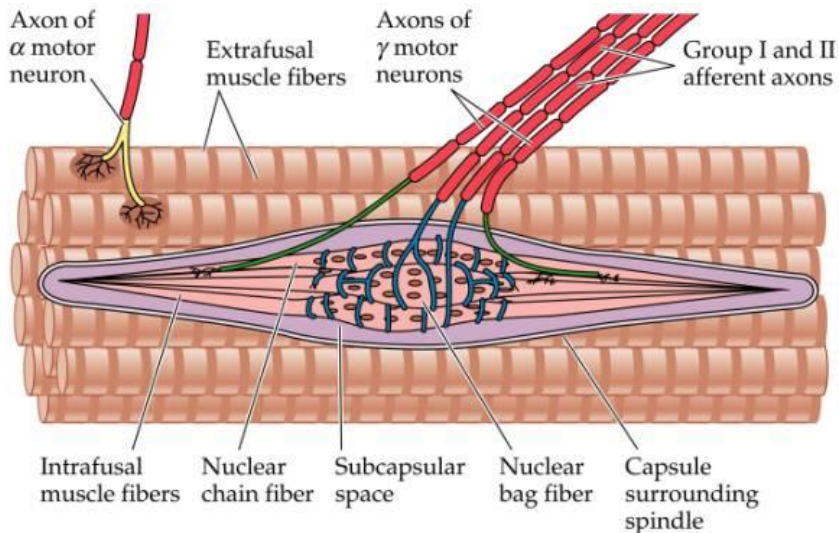


هسته‌های تارهای هسته زنجیری، زنجیروار در سراسر ناحیه گیرنده توزیع شده‌اند.
هسته‌های تارهای هسته کیسه‌ای، در کیسه‌های متسع در بخش مرکزی ناحیه گیرنده جمع شده‌اند.

بخش انقباضی

بخش حسی

اجزای تارهای عضلانی درون دوکی



بخش‌های انتهایی تارهای عضلانی درون دوکی دارای فیلامان‌های اکتین و میوزین بوده و می‌تواند منقبض گردد.

بخش میانی تارهای عضلانی درون دوکی فاقد فیلامان‌های اکتین و میوزین (یا اندک) است و گیرنده‌های حسی به آن اتصال دارند.

ارتباطات عصبی دوک عضلانی

تارهای عصبی آوران (afferent) ○ —>

تارهای اولیه Ia (primary fibers)

○ —>

تارهای ثانویه II (secondary fibers)

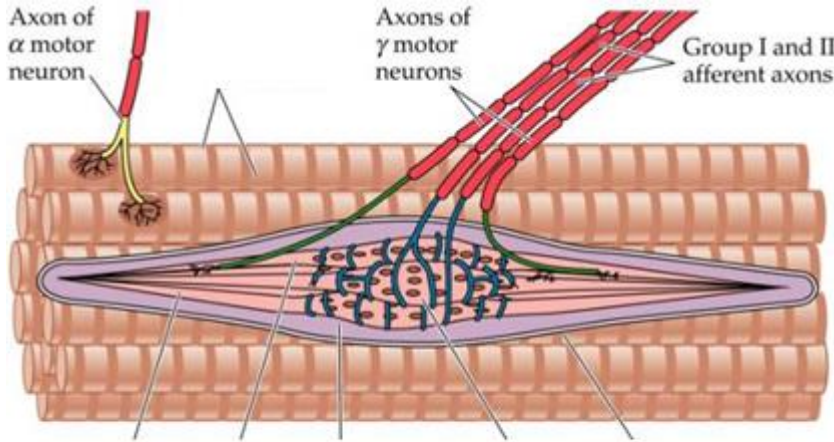
○ —>

سلول‌های عصبی حرکتی گاما (gamma motor neuron)

○ —>

استاتیک ○ —>

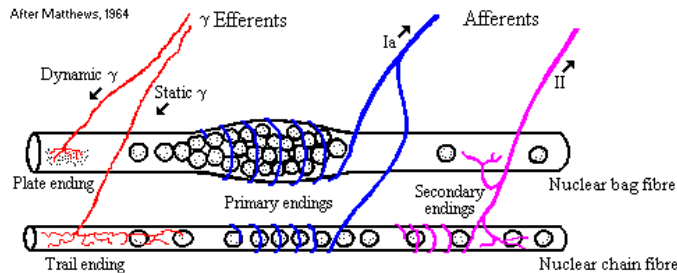
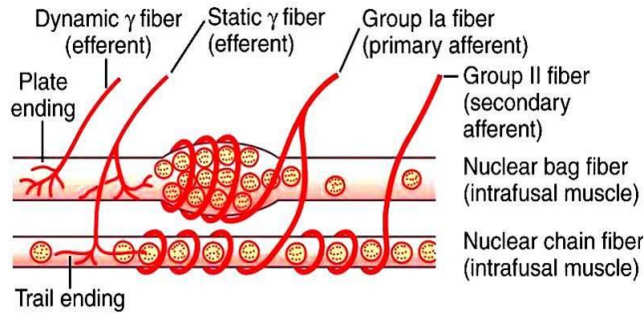
دینامیک ○ —>



سلول عصبی حرکتی گاما که تارهای عضلانی درون دوکی را عصبدهی می‌کنند متناظر با سلول عصبی حرکتی آلفا که تارهای عضلانی بیرون دوکی را عصبدهی می‌کنند هستند.

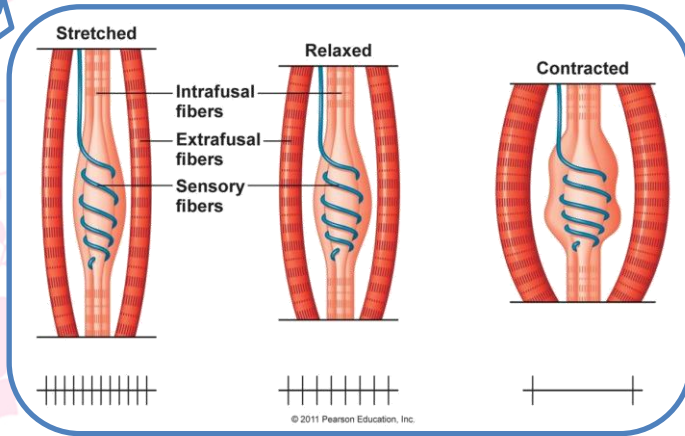
ویژگی‌های اتصالات عصبی

۸۲



شرایط تحریک گیرنده‌های دوک عضلانی

- ۸۳ ✓ کشیده شدن کل عضله و در نتیجه کشیده شدن بخش میانی تارهای درون دوکی که موجب تحریک گیرنده‌ها می‌شود.
- ✓ انقباض بخش‌های انتهایی تارهای درون دوکی (بدون تغییر طول عضله) و در نتیجه کشیده شدن بخش میانی تارهای درون دوکی که موجب تحریک گیرنده‌ها می‌شود.



http://arouab.faculty.mjc.edu/Course%20Materials/Physiology%20Notes/Fall%20202011/chapter_12%20Fall%20202011.htm









کشیده شدن عضله

افزایش نرخ ایمپالس‌های عصبی



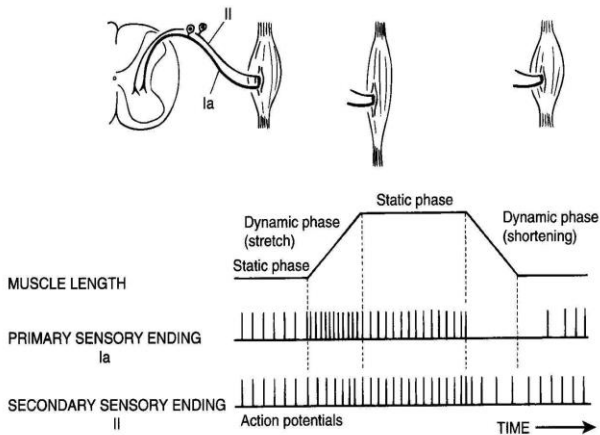
فشرده شدن عضله

کاهش نرخ ایمپالس‌های عصبی

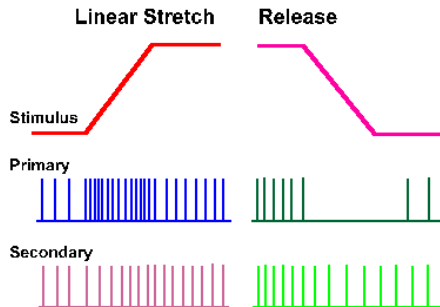
Sensory Region	Action Potential in Sensory Neuron	Effect on Extrafusal Fibers
 <p data-bbox="475 459 561 503">Resting length</p>		<p data-bbox="865 309 946 380">Normal muscle tone</p>
 <p data-bbox="475 800 589 822">Stretched</p>		<p data-bbox="865 609 961 680">Muscle tone increases</p>
 <p data-bbox="461 1046 604 1067">Compressed</p>		<p data-bbox="865 915 961 986">Muscle tone decreases</p>

پاسخ دینامیک در قیاس با پاسخ استاتیک

۸۵



www.mohsenparviz.ir/lesson/LS-%20Sensory%20Receptors.ppt

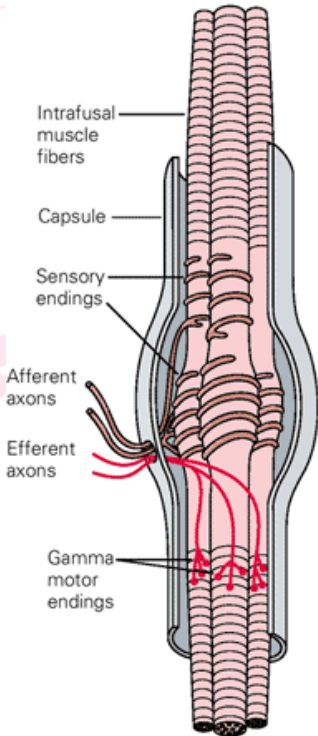


<http://www.d.umn.edu/~jfitzake/Lectures/DMED/MuscleReceptors/SpindlePhysiology.html>

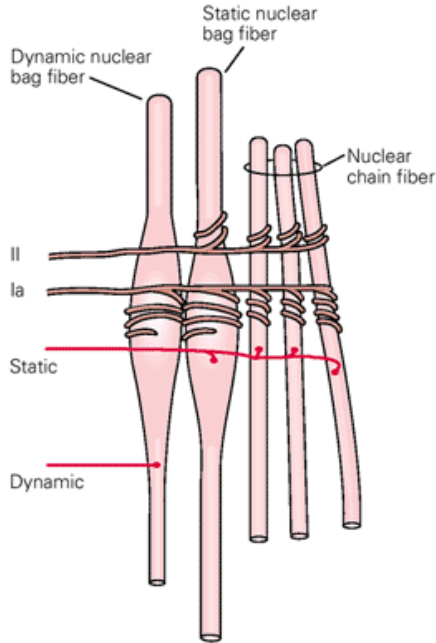
تنظیم حساسیت پاسخ‌های استاتیک و دینامیک

۸۶

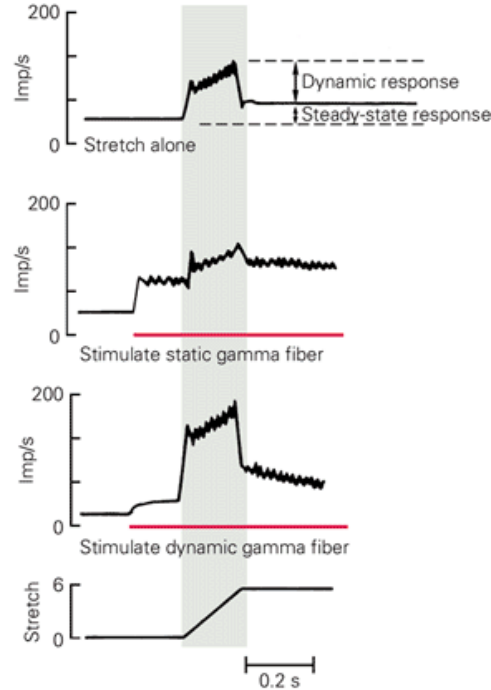
A Muscle spindle



B Intrafusal fibers of the muscle spindle



C Response of Ia sensory fiber to selective activation of motor neurons





دوک عضلانی

✓ پایانه اولیه:

در مرکز ناحیه گیرنده، یک فیبر عصبی حسی بزرگ، بخش مرکزی هر فیبر داخل دوکی را احاطه می‌کند، که به آن پایانه‌ی اولیه یا پایانه‌ی حلقوی مارپیچی می‌گویند.

• یک پایانه اولیه در قسمت میانی هر دو نوع فیبر دوک عضلانی (فیبرهای با هسته‌های کیسه‌ای و زنجیری) دیده می‌شود و چون به شکل حلقوی مارپیچی هستند به این نام خوانده می‌شوند.

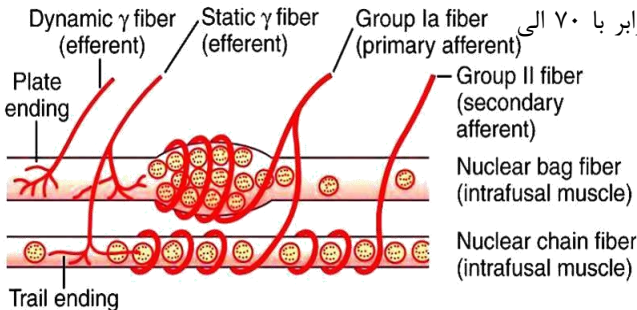
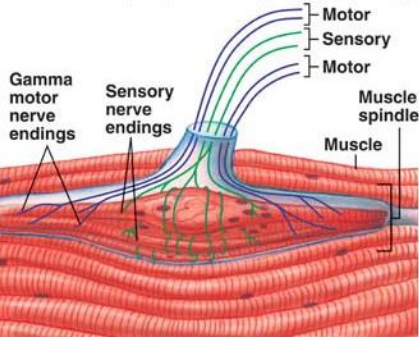
• این پایانه‌ها دارای فیبر عصبی قطور **Ia** بوده که سرعت جریان عصبی آن برابر با ۷۰ الی

۱۲۰ متر در ثانیه است.

• قطر این فیبرها به طور متوسط ۱۷ میکرون است.

• پایانه عصبی حسی اولیه توسط هم فیبرهای داخل دوکی کیسه هسته‌ای

و هم فیبرهای زنجیره هسته‌ای تحریک می‌شود.





دوک عضلانی



✓ پایانه ثانویه:

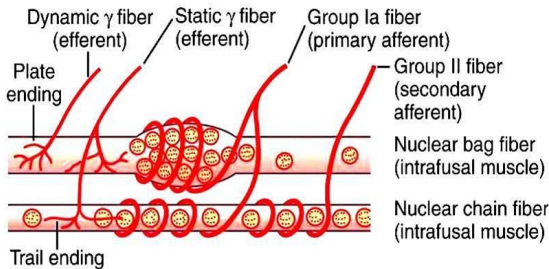
معمولا یک اما گاهی اوقات دو فیبر عصبی حسی ناحیه‌ی گیرنده را در یک طرف یا هر دو طرف پایانه‌ی اولیه عصبدهی می‌کنند. این پایانه‌ی حسی را پایانه‌ی ثانویه می‌گویند.

• فیبر عصبی این گروه، نوع II بوده که نسبت به نوع Ia دارای قطر و سرعت کمتری هستند.

• فیبر عصبی این گروه قطر متوسطی معادل ۸ میکرون دارند.

• پایانه‌های ثانویه همانند نوع اولیه به دور فیبر داخل دوکی می‌پیچند ولی گاهی به شکل شاخه پخش می‌شوند.

• پایانه عصبی حسی ثانویه معمولا توسط فیبرهای زنجیره هسته‌ای و فیبرهای کیسه هسته‌ای استاتیک تحریک می‌شود.





دوک عضلانی



اعصاب حرکتی گاما

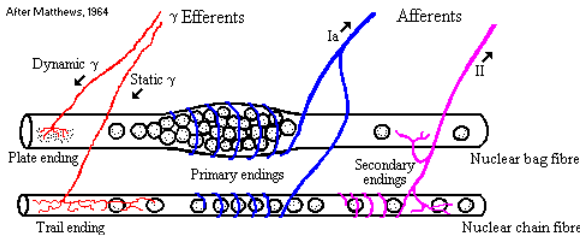
اعصاب حرکتی گاما که به دوک عضلانی می‌روند بر دو نوعند:

• نورون حرکتی گامای دینامیک **Dynamic gamma motor neuron** :

فیبرهای داخل دوکی نوع کیسه هسته‌ای دینامیک، توسط این نورون ها عصب دهی می شوند. در نتیجه منجر به تحریک پایانه های اولیه دارای فیبرهای حسی Ia می‌گردند.

• نورون حرکتی گامای استاتیک **Static gamma motor neuron** :

فیبرهای داخل دوکی نوع زنجیره هسته‌ای و فیبرهای داخل دوکی نوع کیسه هسته‌ای استاتیک را تحریک می‌کنند. که تحریک پایانه‌های ثانویه دوک عضلانی را به همراه دارد و در نتیجه فیبرهای حسی گروه II تحریک می‌شوند.



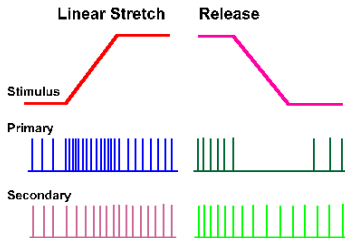
<http://neuromuscular.wustl.edu/nother/axon.htm>



دوک عضلانی



دوک‌های عضلانی به طور مداوم، ایمپالس‌های عصبی حسی را صادر می‌کنند. کشیدگی دوک‌های عضلانی، سرعت تخلیه را افزایش می‌دهد، در حالی که کوتاه شدن دوک‌های عضلانی، سرعت تخلیه را کاهش می‌دهد. بدین ترتیب، دوک عضلانی می‌توانند یا پیام‌های مثبت یعنی، افزایش تعداد ایمپالس‌ها را جهت نشان دادن کشیدگی عضله یا پیام‌های منفی یعنی، کاهش تعداد ایمپالس‌ها به کمتر از میزان طبیعی را جهت نشان دادن رفع کشیدگی عضله، ارسال نمایند.





دوک عضلانی



پاسخ گیرنده‌های دوک عضلانی به دو صورت انجام می‌شود :

- پاسخ پویا
- پاسخ ثابت یا ایستا



دوک عضلانی



پاسخ ایستا:

هنگامی که بخش گیرنده‌ی دوک عضلانی به آرامی کشیده می‌شود، تعداد ایمپالس‌هایی که از هم پایانه‌های اولیه و هم پایانه‌های ثانویه ارسال می‌گردد تقریباً متناسب با میزان کشیدگی افزایش می‌یابد و پایانه به مدت چند دقیقه به ارسال ایمپالس‌های خود ادامه می‌دهد. به این اثر پاسخ ایستای گیرنده‌ی دوک عضلانی می‌گویند که به طور ساده به این معنی است که هم پایانه‌های اولیه و هم پایانه‌های ثانویه در صورتی که خود دوک عضلانی در حالت کشیده باقی بمانند، به ارسال پیام‌های خود برای حداقل چند دقیقه ادامه می‌دهند.



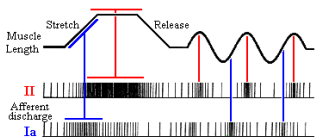
دوک عضلانی



پاسخ پویا

اگر طول گیرنده‌ی دوک عضلانی به ناگهان افزایش یابد، پایانه‌ی اولیه بشدت تحریک می‌گردد. به تحریک بیش از حد پایانه اولیه، پاسخ پویا می‌گویند. به عبارت دیگر، پایانه اولیه به صورت فوق العاده فعال به سرعت به تغییر طول دوک عضلانی پاسخ می‌دهد. حتی در صورتی که طول گیرنده دوک عضلانی تنها در کسری از یک میکرون افزایش یابد، اگر این افزایش در کسری از یک ثانیه روی بدهد، گیرنده اولیه تعداد بسیار زیادی ایمپالس اضافی ارسال می‌کند.

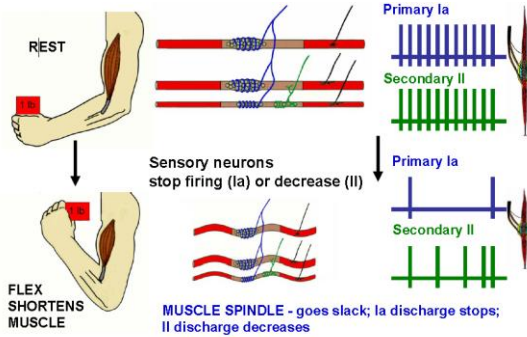
اگر گیرنده دوک عضلانی کوتاه گردد، دقیقا عکس پیام‌های حسی فوق روی می‌دهد. بدین ترتیب، پایانه اولیه، پیام‌های فوق العاده قوی یا مثبت یا منفی را به طناب نخاعی می‌فرستد تا طناب نخاعی را از هرگونه تغییر در طول گیرنده‌ی دوک عضلانی آگاه سازد.



<http://grants.hhp.coe.uh.edu/clayne/6397/unit4a.htm>



دوک عضلانی



http://www.google.com/url?sa=D&uq=8&ec=4&cad=rja&ved=0CCYQJAD&url=http://www.mhha.com/hall/diagram%20of%20muscle%20spindles.pdf&usq=4&ei=UemDg44Pj1Cw8&usq=4FQjCNEFVVFVxk5g8835y&usq=4&usq=889V68275rdbn1P27u2m&usq=4&usq=45828540_d.png



دوک عضلانی



کنترل شدت پاسخ‌های ایستا و پویا توسط اعصاب حرکتی گاما

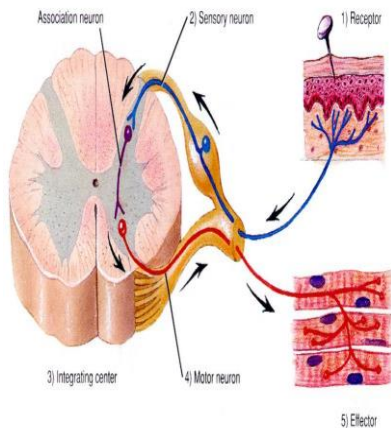
هنگامی که فیبرهای گامای دینامیک فیبرهای کیسه هسته‌ای را تحریک می‌کنند، پاسخ پویای دوک عضلانی به شدت افزایش می‌یابد، در حالی که پاسخ ایستا به ندرت، تحت تاثیر قرار می‌گیرد. یعنی پاسخ دینامیکی پایانه حسی اولیه افزایش می‌یابد اما این فرایند هیچ تاثیری روی پایانه حسی ثانویه ندارد. برعکس، تحریک فیبرهای گامای استاتیک، که فیبرهای زنجیره‌ای هسته‌ای را تحریک می‌کنند، پاسخ ایستا را افزایش می‌دهد، در حالیکه تاثیر اندکی بر پاسخ پویا می‌گذارد. به طور ساده به این معنی است که هم پایانه‌های اولیه و هم پایانه‌های ثانویه به ارسال پیام‌های خود برای حداقل چند دقیقه ادامه می‌دهند.



دوک عضلانی

رفلکس

عکس العمل‌هایی که به طور ناخودآگاه و بدون دخالت مراکز بالاتر مغز نسبت به تحریک ایجاد می‌شود، رفلکس نام دارد. این عکس‌العمل به وسیله تحریک نورون حسی در بخش محیطی بدن که اطلاعات را از راه شاخه خلفی به نخاع انتقال می‌دهد انجام می‌شود، آنگاه تحریک از طریق یک نورون رابط به نورون حرکتی در شاخ قدامی منتقل شده و به اندام عمل‌کننده که معمولا عضله است برمی‌گردد.



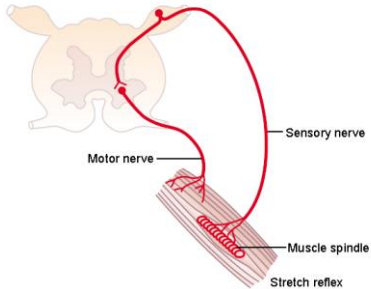


دوک عضلانی



رفلکس کششی عضله

ساده‌ترین تظاهر عملکرد دوک عضلانی، رفلکس کششی عضله است. هرگاه عضله به صورت ناگهانی کشیده شود، تحریک دوک‌های عضلانی باعث انقباض رفلکسی فیبرهای بزرگ عضله اسکلتی در عضله کشیده نشده و نیز عضلات موافق مرتبط با آن می‌شود.





دوک عضلانی



رفلکس کششی را می‌توان به دو جز تقسیم کرد:

- رفلکس کششی پویا

رفلکس کششی پویا، که در آن کشیدگی ناگهانی یا رفع کشیدگی ناگهانی عضله با تحریک پایانه‌های دوک عضلانی سبب ارسال پیام‌های قدرتمند و پویا از پایانه‌های مذکور می‌گردد که باعث انقباض رفلکسی قوی و فوری یا کاهش انقباض همان عضله که پیام‌ها از آن ارسال شده‌اند می‌شود. یعنی رفلکس در جهت مخالف تغییرات ناگهانی طول عضله عمل می‌کند.

- رفلکس کششی ایستا

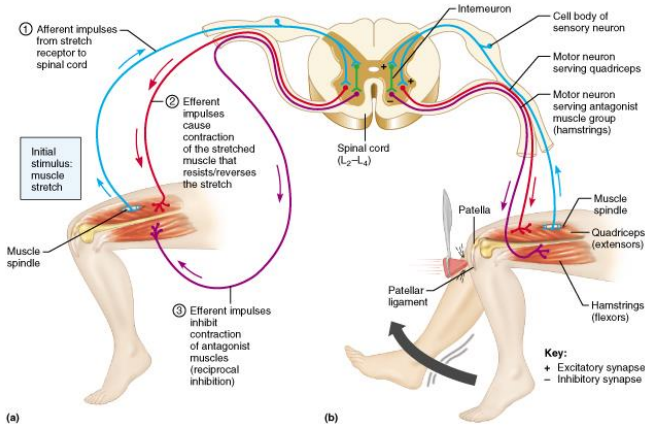
رفلکس کششی پویا در ظرف کسری از ثانیه پس از کشیدگی یا رفع کشیدگی از بین می‌رود، در ادامه یک رفلکس کششی ایستا و ضعیف‌تر برای مدتی طولانی ادامه می‌یابد. این رفلکس توسط پیام‌های مداوم گیرنده ایستا که هم از پایانه‌های اولیه و هم از پایانه‌های ثانویه ارسال می‌گردند، برانگیخته می‌شود. و باعث می‌شود درجه انقباض عضله در حد معقول ثابت باقی بماند.



دوک عضلانی

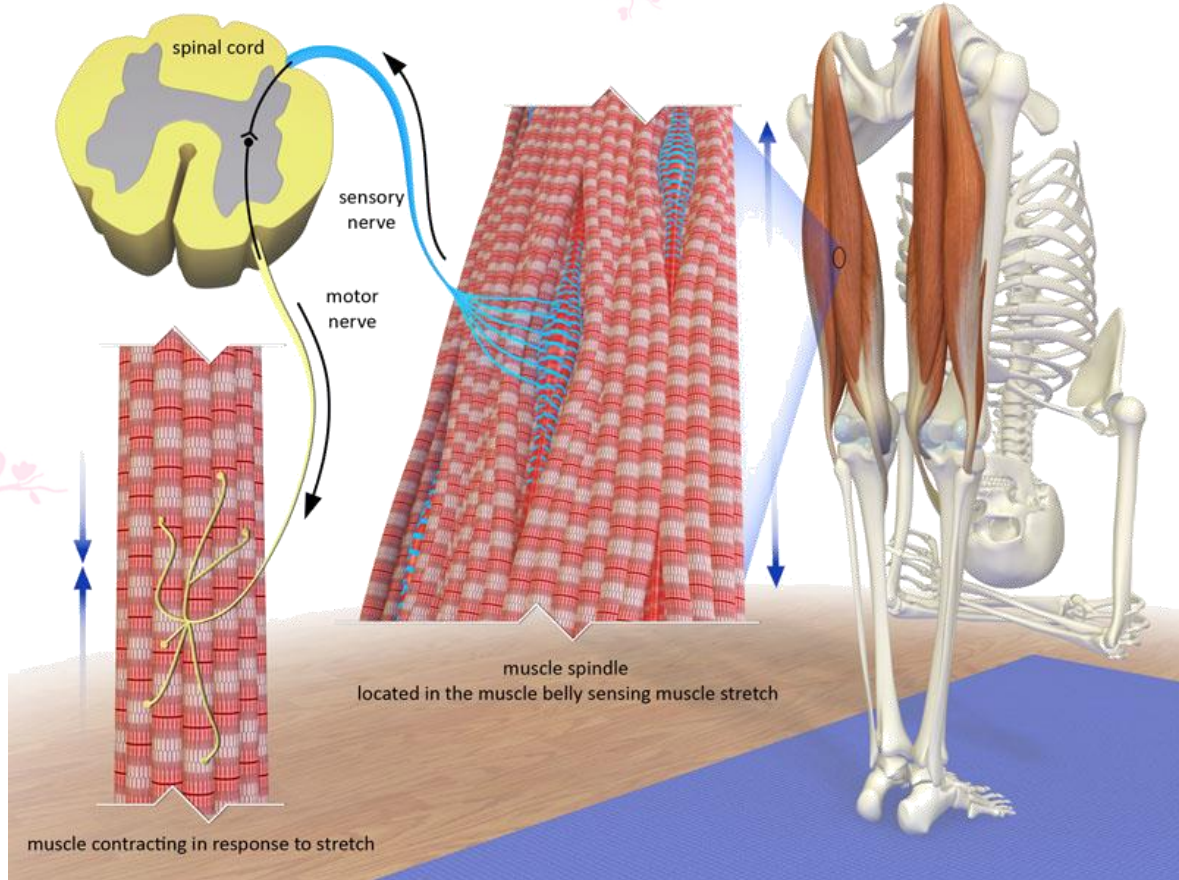
رفلکس کششی پرش زانو

پرش زانو با ضربه زدن به تاندون کشکک زانو توسط چکش رفلکس انجام می‌شود، که موجب کشیدگی عضله چهار سر زانو شده و رفلکس کششی پویایی را تحریک می‌کند که سبب حرکت پرشی رو به جلو ساق پا می‌گردد.



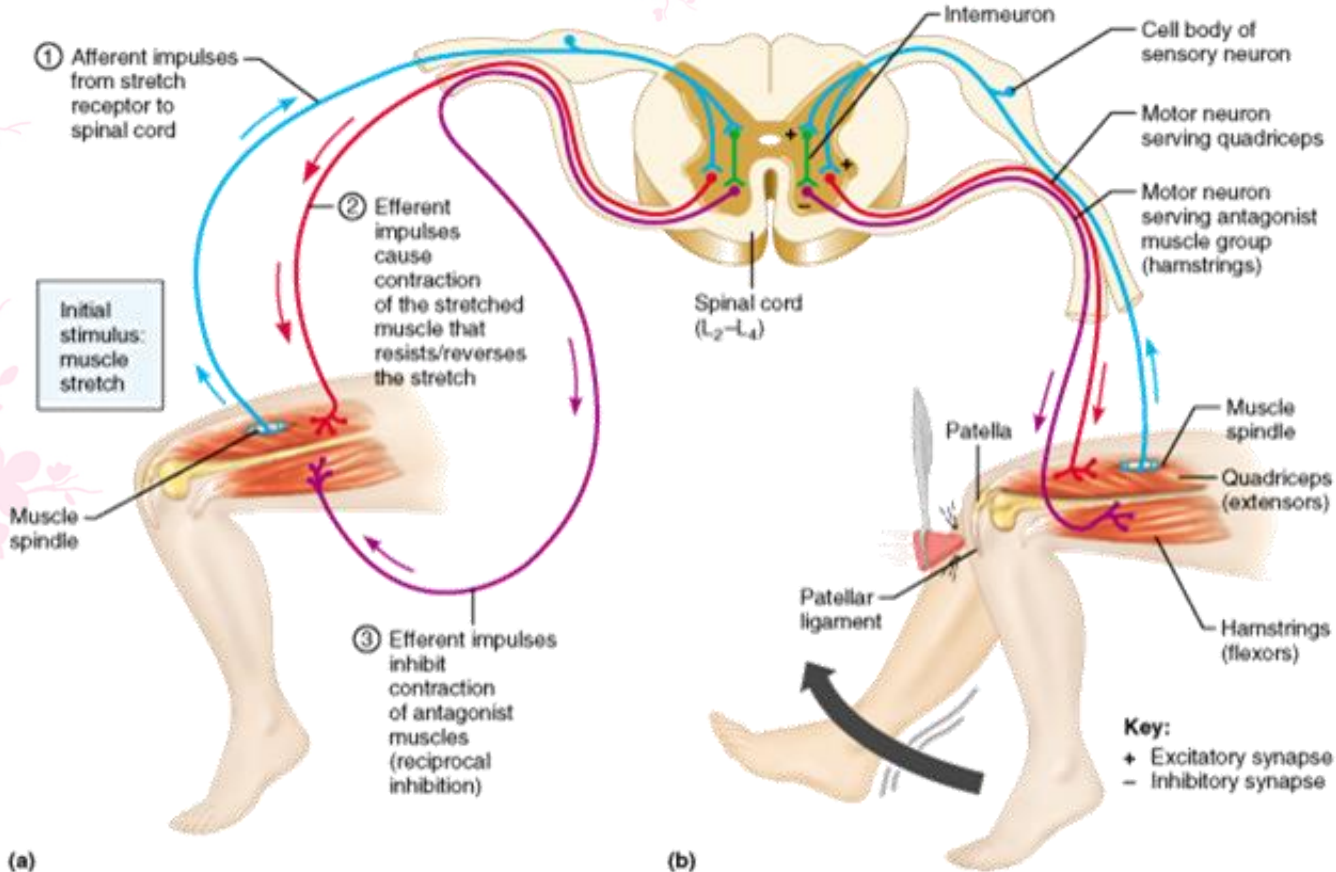
بیشتر بدانیم! دوک عضلانی در حلقه ریفلیکس

۱۰۰



بیشتر بدانیم! دوک عضلانی در حلقه ریفلکس

۱۰۱

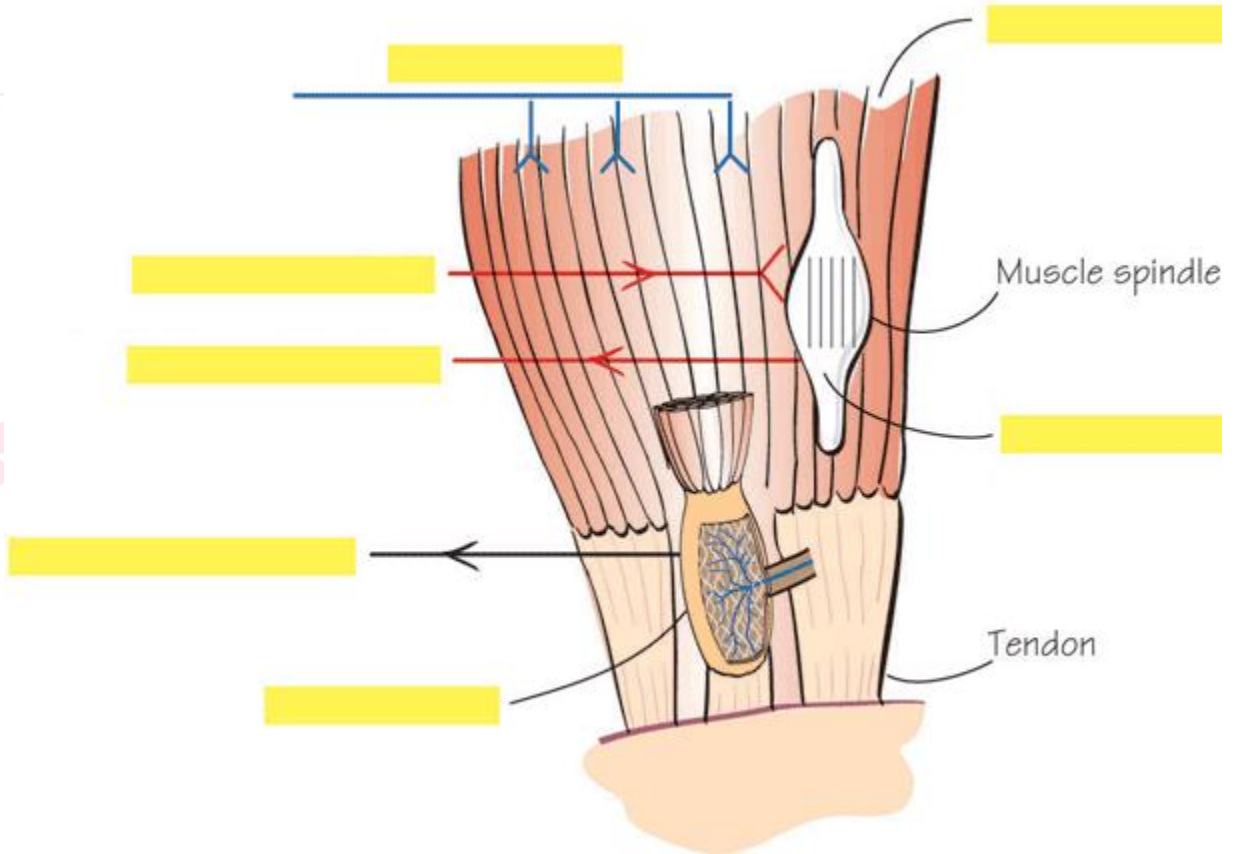


(a)

(b)

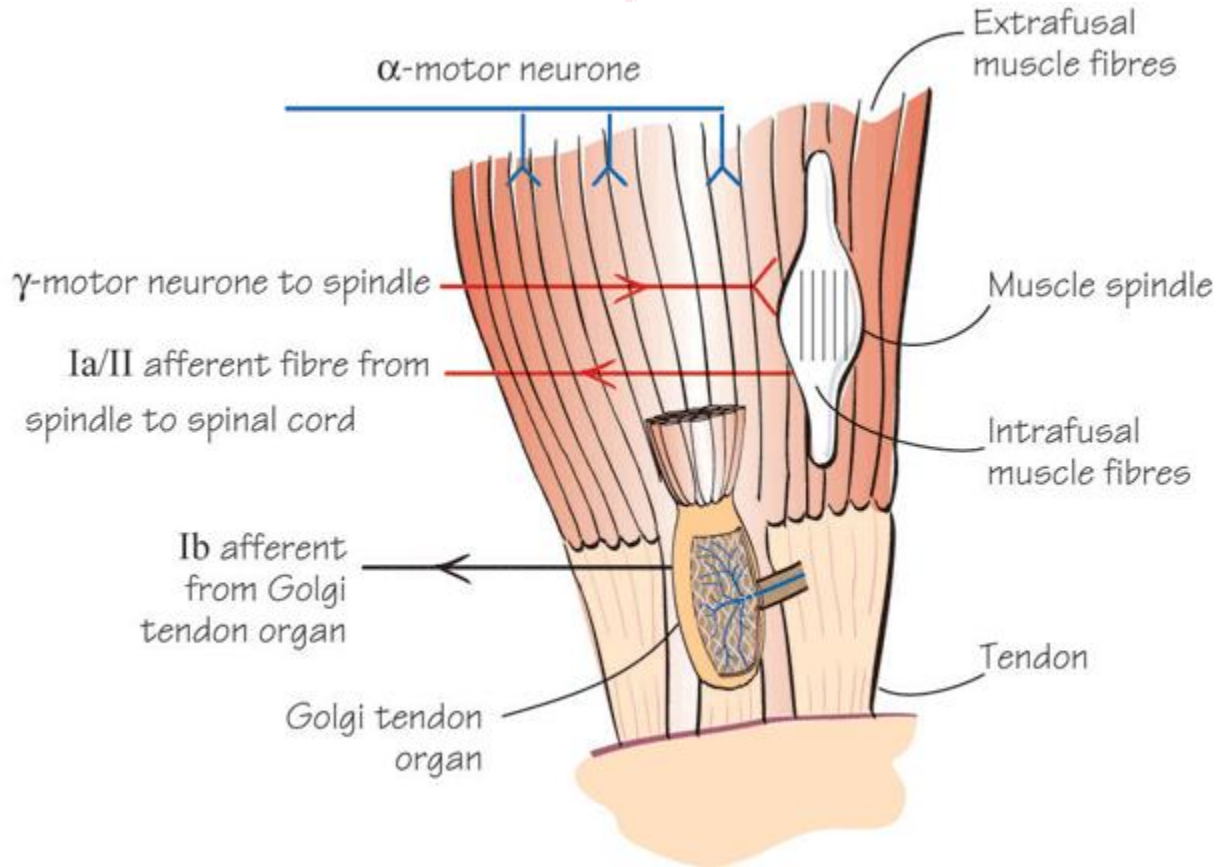
فلش کارت! دوک عضلانی و نرون حرکتی پایینی

۱۰۲



فلش کارت! دوک عضلانی و نرون حرکتی پایینی

۱۰۳



فهرست مطالب:

مقدمه ✓

معماری عضله ✓

فیزیولوژی عضله و مکانیزم انقباض ✓

واحد حرکتی ✓

نحوه‌ی تولید نیرو در عضله: اصل اندازه ✓

روابط نیرو-طول و نیرو-سرعت عضله ✓

انواع انقباض عضلانی ✓

دوک عضلانی ✓

اندام تاندون گلژی (GTO) ◯ ←

مدل‌های عضله ◯



تفاوت عملکردی دوک عضلانی و اندام تاندون گلژی

۱۰۵



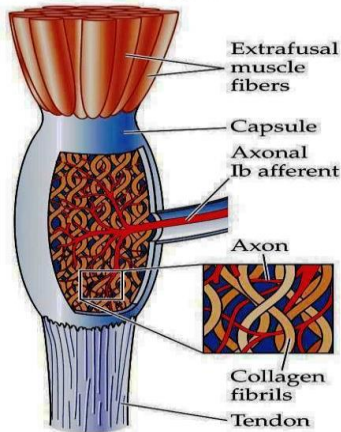
اندام وتري گلژی (GTO)



تعريف:

اندام وتري گلژی Golgi Tendon Organ گیرنده‌هایی حسی هستند که حاوی کپسول بوده (محصور شده‌اند) و در وتر (تاندون) عضلات وجود دارند. اندام‌های وتري گلژی همانند گیرنده‌های دوک عضلانی به عنوان گیرنده‌های کششی عضلات محسوب می‌شوند. به‌طور متوسط ۱۰ تا ۱۵ فیبر عضلانی معمولاً به‌طور سری به هر اندام وتري گلژی متصل شده‌اند.

Golgi tendon organ



grants.hhp.coe.uh.edu

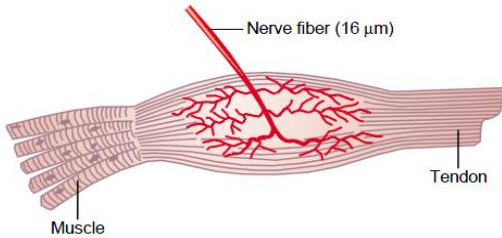


اندام وتري گلژی (GTO)



ویژگی های فیزیکی

اندام های وتري گلژی ساختار محصور شده بلند و باریکی با حدود ۱ میلی متر طول و ۰/۱ میلی متر قطر هستند که در محل اتصال فیبرهای عضله اسکلتی و تاندون قرار دارند.



Textbook of medical physiology, guyton, chp54

هراندام وتري با یک آکسون منفرد Ib عصب دهی می شود؛ این فیبر عصبی قطور بوده ولی نسبت به Ia (فیبر عصبی پایانه اولیه دوک عضلانی) اندکی کوچک تر است. این فیبر عصبی در داخل کپسول به انتهاهای بسیار ریزی شاخه شاخه می شود.



اندام وتري گلژی (GTO)



نقش اندام وتري گلژی:

اندام وتري گلژی در کنترل کشش ماهیچه کمک می کند و اطلاعات مربوط به کشیدگی تاندون یا سرعت تغییر کشش را منتقل می کند. وقتی عضله دچار انقباض یا کشش می شود، دسته های کوچک فیبرهای ماهیچه ای هم کشیده می شوند و این ارگان تحریک می شود.

تحریک اندام های وتري گلژی در پی افزایش تانسین عضله، باعث تحریک فیبرهای حسی گروه Ib می گردند. اندام وتري مانند گیرنده اولیه دوک عضلانی در مقابل تنش های متفاوت به دو صورت پاسخ می دهد:

• پاسخ استاتیک

• پاسخ دینامیک



اندام وتري گلژی (GTO)



نقش اندام وتري گلژی:

- پاسخ دینامیک: زمانی که تنش عضلانی به طور ناگهانی افزایش یابد، این ارگان به شدت پاسخ می دهد.
 - پاسخ استاتیک: تبدیل شدن در کسری از ثانیه به یک سطح پایین تر از حالت پایدار شلیک که تقریباً به طور مستقیم با تنش عضلانی متناسب است.
- ✓ در نتیجه اندام وتري گلژی سیستم عصبی را با اطلاعات لحظه ای در مورد درجه کشش در هر قسمت کوچکی از ماهیچه آماده می کند.



اندام وتري گلژی (GTO)

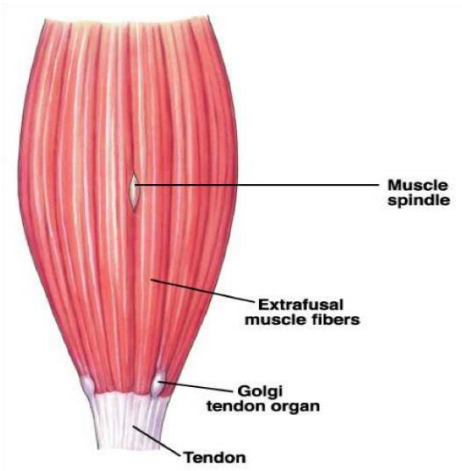


رابطه انقباض و کشش عضلانی با تحریک اندام وتري گلژی:

- **انقباض عضله:** هنگامی که انقباض عضلانی به کاهش طول می‌انجامد، بخش وتري یا تاندونی عضله کشیده می‌شود که باعث تحریک بیشتر اندام‌های وتري گلژی شده و متناسب با کشش ایجاد شده، پیام‌های زیادی از طریق فیبرهای حسی Ib به نخاع ارسال می‌گردد. نتیجه ارسال این پیام‌ها به دستگاه عصبی به خصوص در زمان‌هایی که تانسین عضله به میزان زیادی افزایش می‌یابد، مهار عضله مربوطه جهت جلوگیری از آسیب خواهد بود.
- **کشش عضله:** اگر کشش عضلانی به صورت آرام و ننگه داشته شده اعمال گردد، حساسیت اندام وتري گلژی نسبت به گیرنده‌های دوک عضلانی بیشتر بوده و با تحریک زیاد Ib، عضله تحت کشش مهار می‌گردد. بدین ترتیب، عضله مربوطه می‌تواند تحت کشش بیشتری نیز قرار گیرد.



اندام وتري گلژی (GTO)



www.studyblue.com

تفاوت اندام وتري گلژی با دوک عضلانی:

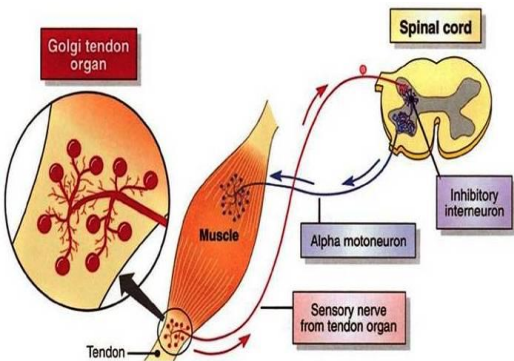
- دوک های عضلانی به تغییرات طول ماهیچه واکنش نشان می دهند.
- اندام های وتري به تغییرات کشش ماهیچه واکنش نشان می دهند.



اندام وتري گلژی (GTO)



انتقال ایмпالس ها از تاندون به دستگاه عصبی مرکزی:



<https://www.msu.edu>

وقتی عضله‌ای منقبض می‌شود تاندون عضله کشیده شده و این کشش در مراحل انتهایی انقباض به بیشترین میزان خود می‌رسد و در نتیجه از طریق GTO، فیبرهای Ib با فرکانس بالایی تحریک می‌شوند و پیام‌های حاصله به شاخ خلفی نخاع می‌روند و روی اینترنورون‌های شاخ خلفی پایان می‌یابند. آکسون‌های اینترنورون‌ها روی نورون‌های حرکتی آلفای عضله مربوطه سیناپس داده و آن را مهار می‌کنند. این مکانیسم مهم است زیرا از تانیسون بیش از حد عضله و تاندون آن جلوگیری می‌کند. اطلاعات حاصل از این گیرنده‌ها بیشتر به نخاع، مخچه و قشر مغز جهت کنترل بیشتر و دقیق‌تر اعمال حرکتی انتقال می‌یابد.



اندام وتري گلژی (GTO)



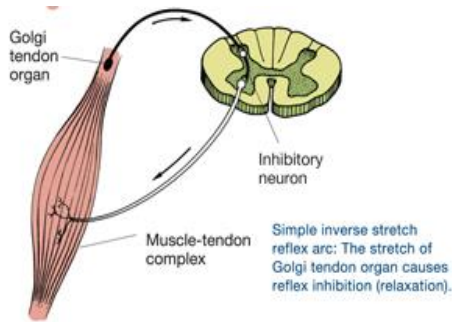
رفلكس كششى معكوس يا مهار اتوزنيك و اهميت آن:

۱- تحريك GTO توسط افزايش ككش در ماهيچه

۲- انتقال سيگنالها به نخاع توسط فيبره‌هاى عصبى Ib

۳- مهار نوروهاى حركتى آن عضله و تحريك نوروهاى حركتى عضلات مقابل توسط نوروهاى واسطه‌اى در نخاع (مكانيسم فيدبك منفى براى جلوگيرى از افزايش

كشيدگى ماهيچه)



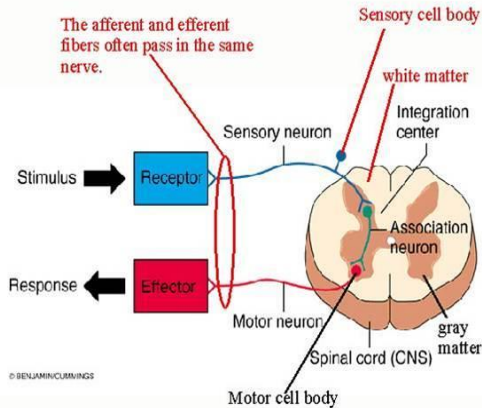
<http://www.acefitness.org/blog/2868>



اندام وتري گلزي (GTO)



A Reflex Arc Shows How Neuron Types Work Together.



otah2o.wikispaces.com

رفلکس کششی معکوس یا مهار اتوژنیک و اهمیت آن:

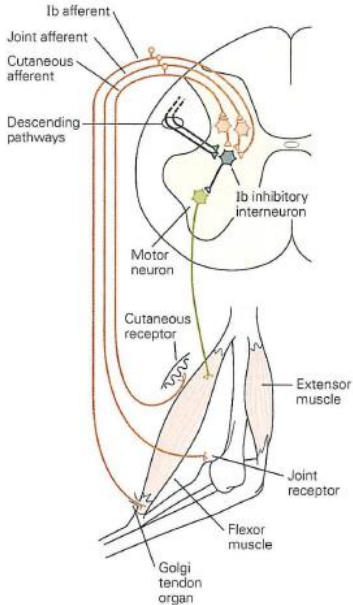
وقتی کشش ماهیچه و در نتیجه تاندون شدید شود، باعث عکس العمل ناگهانی در نخاع می شود و باعث استراحت لحظه ای کل ماهیچه می گردد.

این مکانیسم محافظتی برای جلوگیری از پاره شدن ماهیچه و کنده شدن تاندون از اتصالاتش به استخوان است.

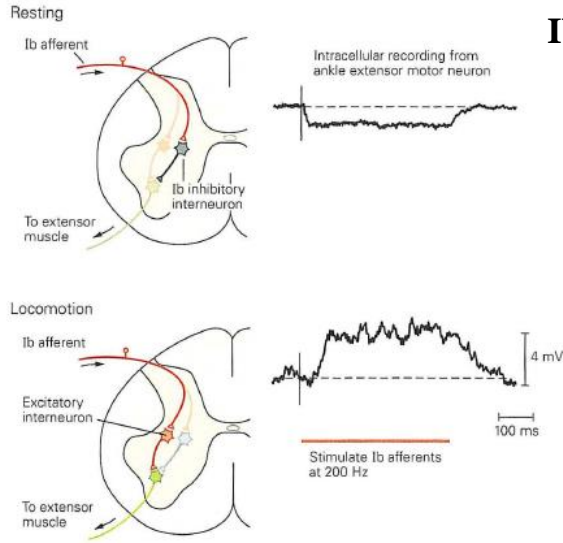


اندام وتري گلژی (GTO)

A Convergence onto Ib interneurons



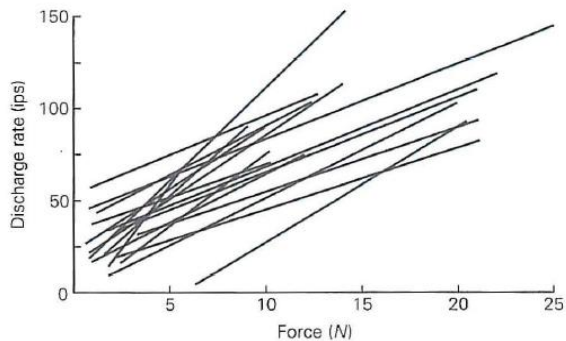
B Reversal of action of Ib afferents



فعالیت فیبرهای حسی Ib



اندام وتري گلژی (GTO)



کاربرد GTO :

مطالعات انجام شده روی حیوانات در حالت بی‌هوشی نشان داده که سطح متوسط فعالیت در اندام وتري گلژی شاخص خوبی برای نیروی کل ماهیچه منقبض شده است. بنابراین می‌توان نتیجه گرفت که ارگان تاندون به‌طور پیوسته نیروی ماهیچه منقبض شده را اندازه می‌گیرد.

Figure 35-6B The discharge rate of a population of Golgi tendon organs signals the force in a muscle. Linear regression lines show the relationship between discharge rate and force for Golgi tendon organs of the soleus muscle of the cat. (Adapted, with permission, from Crago et al. 1982.) Principles of neural science, kandel, chp35

فهرست مطالب:

- ✓ مقدمه
- ✓ معماری عضله
- ✓ فیزیولوژی عضله و مکانیزم انقباض
- ✓ واحد حرکتی
- ✓ نحوه‌ی تولید نیرو در عضله: اصل اندازه
- ✓ روابط نیرو-طول و نیرو-سرعت عضله
- ✓ انواع انقباض عضلانی
- ✓ دوک عضلانی
- ✓ اندام تاندون گلژی (GTO)
- مدل‌های عضله ←



سه دسته اصلی مدل‌های عضله:

- مدل‌های ورودی - خروجی
- مدل‌های مکانیکی با پارامترهای منسجم
- مدل‌های پل‌های عرضی (کراس‌بریج)

مدل‌های ورودی - خروجی:

مدل‌های ورودی - خروجی «جعبه سیاه» ساده‌ترین نوع مدل‌ها هستند که به منظور بازنمایی رفتاری خاص در محدوده‌ی عملکردی کوچکی ایجاد می‌شوند. در این مدل‌ها، اغلب از تابع تبدیل خطی برای توصیف ارتباط تحریک عصبی و نیرو استفاده می‌گردد.

مدل‌های مکانیکی با پارامترهای منسجم:

مدل‌های مکانیکی با پارامترهای منسجم در پله‌ی بعدی پیچیدگی قرار دارند. در این مدل‌ها برای ایجاد رفتاری مشابه رفتار ویسکوالاستیک عضله، از ترکیبی از عناصر مکانیکی خطی نظیر فنر و دمپر استفاده می‌گردد. ارتباطات غیرخطی مربوط به رفتار هایپربولیک نیرو-سرعت و ویژگی‌های تاندون را نیز می‌توان وارد نمود. مبنای این مدل‌ها، نتایج پژوهش‌هایی است که هیل در سال ۱۹۳۸ منتشر نمود از این رو از این مدل‌ها تحت عنوان «مدل‌های مبتنی بر مدل هیل» نیز نام برده می‌شود.

مدل‌های پل‌های عرضی (کراس‌بریج):

مدل‌های پل‌های عرضی (کراس‌بریج) پیچیده‌ترین نوع مدل‌ها هستند که در آنها، دینامیک فرآیندهای مولکولی که وظیفه‌ی تولید نیرو در عضله را بر عهده دارند مدلسازی می‌گردد. استفاده از این مدل‌ها مستلزم پردازش سنگینی است. مدل ارائه شده توسط هاکسلی نمونه‌ای از این نوع مدل می‌باشد.

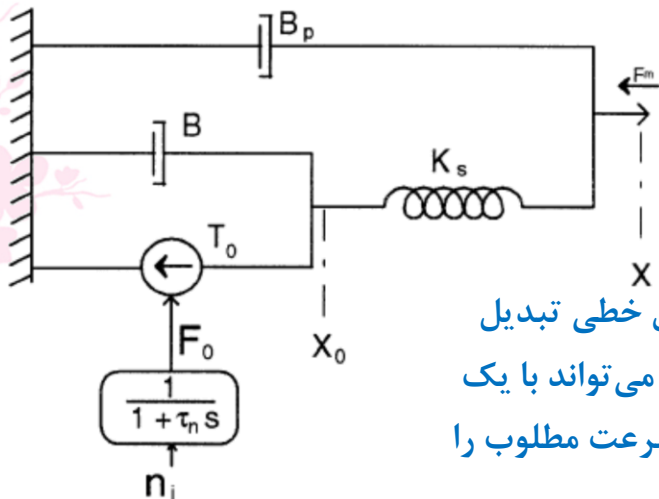
نمونه‌ای از مدل مکانیکی غیرخطی از نوع هیل:

۱۲۲

n_i ورودی عصبی عضله است که در محدوده‌ی صفر تا یک نرمالیزه شده است. این ورودی عصبی با یک فیلتر مرتبه اول هموار می‌شود تا کوپلینگ فعال‌سازی-انقباض در مدل بازنمایی گردد. خروجی فیلتر، نیروی نرمالیزه شده‌ی F_0 است که به همراه حداکثر نیروی عضله (F_{max}) و بازوی گشتاور متوسط آن (m) جهت تعیین گشتاور (T_0) مورد استفاده قرار می‌گیرد. عنصر ویسکوزیته‌ی B نشانگر ارتباط بین نیرو و سرعت در مدل است:

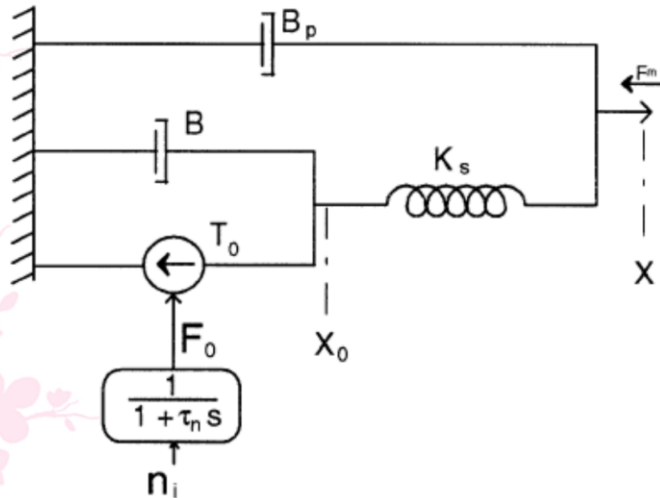
$$B = \begin{cases} (aT_0)/(b+v) & v \geq 0 \\ a'T_0 & v < 0 \end{cases}$$

$$a = 1.25 \quad a' = 3 \quad b = 1 \quad v = -\dot{x}_0/m$$



اگر مقدار ثابتی برای B فرض شود مدل به یک مدل خطی تبدیل خواهد شد. نشان داده شده است که مدل غیرخطی می‌تواند با یک سیگنال کنترلی ساده، حرکات همواری با پروفایل سرعت مطلوب را ایجاد نماید ولی مدل خطی چنین قابلیتی ندارد.

دیگر عناصر مکانیکی مدل نشانگر خصوصیات بافت‌های پیوندی اطراف مفصل و عضلات می‌باشند.



معادلات توصیف کننده مدل:

$$\dot{F}_0 = \frac{1}{\tau_n} \cdot (n_i - F_0)$$

$$T_0 = F_0 \cdot F_{\max} \cdot m$$

$$\dot{X}_0 = \frac{(K_s \cdot (X - X_0) - T_0)}{B}$$

$$F_m = B_p \cdot \dot{X} + K_s \cdot (X - X_0)$$

پارامترهای مدل:

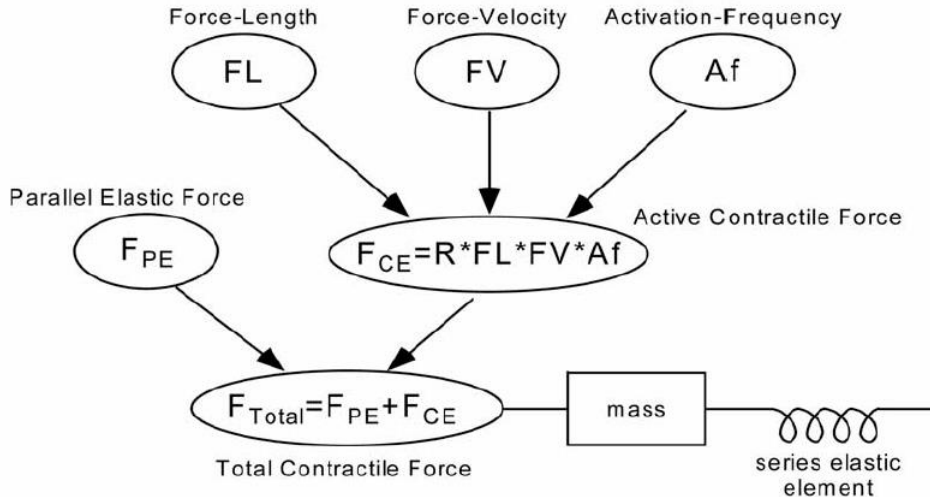
$$B_p = 0.2[N \cdot s / rad], \quad K_s = 30[N / rad], \quad \tau_n = 0.04[s], \quad m = 0.03[m],$$

$$F_{\max}(\text{shoulder}) = 800[N], \quad F_{\max}(\text{elbow}) = 700[N], \quad F_{\max}(\text{double joint}) = 1000[N]$$

مدل عضله مجازی:

۱۲۴

پژوهشگران دانشگاه کالیفرنیا جنوبی مدل کاملی از عضله ایجاد کرده‌اند و نام «عضله‌ی مجازی» را برای آن انتخاب نموده‌اند. عضله‌ی مجازی مبتنی بر ساختار مدل هیل و داده‌های تجربی جامعی می‌باشد که از عضلات گربه‌سان ثبت و جمع‌آوری شده است. این مدل نسبت به دیگر مدل‌های موجود، توصیف بسیار دقیق‌تری از تولید نیروی عضله ارائه می‌کند زیرا اثرات تعاملی طول، سرعت و فعالیت (به‌کارگیری و فرکانس) روی محدوده‌های فیزیولوژیکی هر کدام لحاظ شده است.

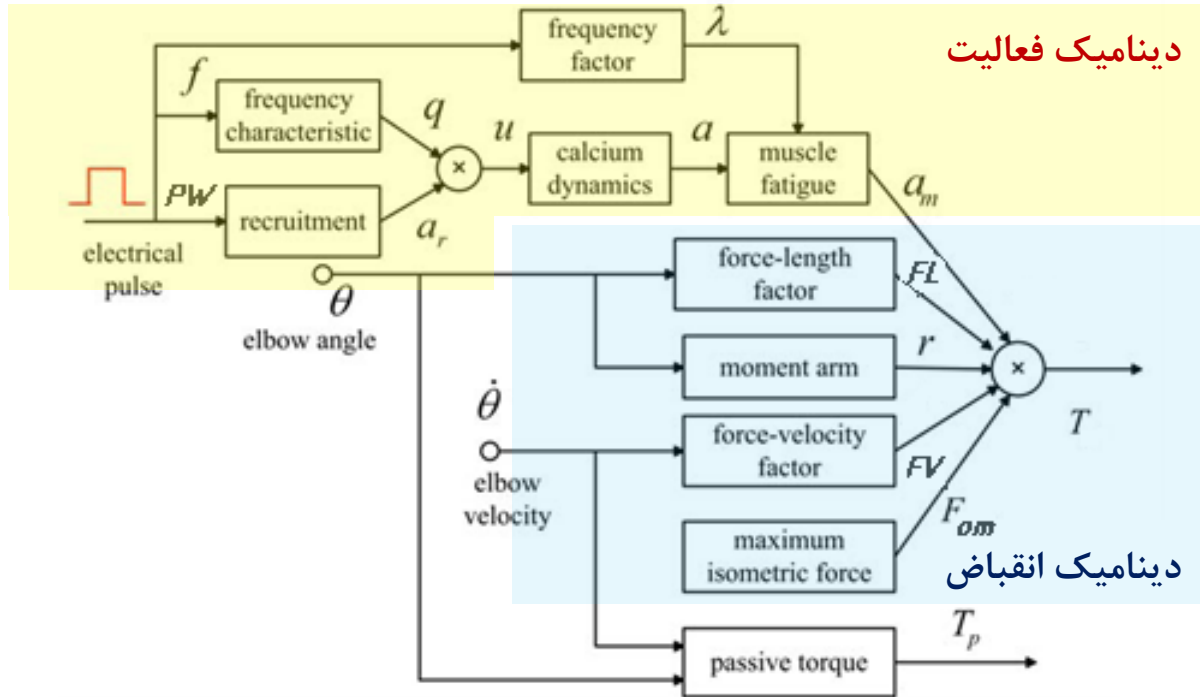


مدل عضله-تاندون زاجاک (Zajac)

۱۲۵

این مدل ویژگی‌های استاتیک و دینامیک عضله و تاندون را با هم توجیه می‌کند.

در این مدل پاسخ عضله به سیگنال تحریک به دو قسمت تقسیم می‌شود:
 دینامیک فعالیت
 دینامیک انقباض



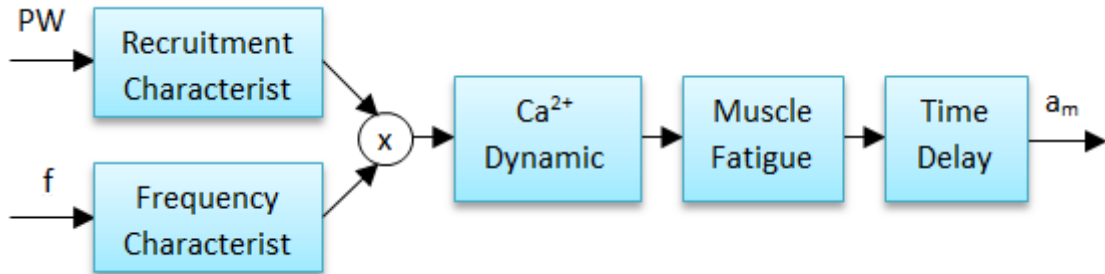
دینامیک فعالیت

دینامیک انقباض

دینامیک فعالیت

۱۲۶

دینامیک فعالیت، نحوه‌ی ایجاد پتانسیل عمل و واکنش‌های شیمیایی سلولی را در راستای بکارگیری واحدهای حرکتی و تولید نیرو در عضله توجیه می‌کند. برای توصیف دینامیک فعالیت عضله‌ی تحریک‌شده، نیاز به مدلی داریم که ورودی تحریک الکتریکی را به فعالیت عضله ارتباط دهد.



فعالیت عضله (a_m) با در نظر گرفتن اثر جمع‌بندی فضایی و زمانی، توسط منحنی غیرخطی بکارگیری عضله، رابطه‌ی غیرخطی فعالیت - فرکانس و رابطه‌ی دینامیک کلسیم محاسبه می‌شود. در ادامه، یک مدل خستگی/بهبود و همچنین یک بلوک تاخیر زمانی ثابت در نظر گرفته شده است.

بلوک تاخیر زمانی ثابت، محدودیت سرعت هدایت در سیستم غشایی و تاخیرهای ناشی از واکنش‌های شیمیایی را مدل می‌کند.

سیگنال تحریک الکتریکی

سیگنال تحریک الکتریکی، مجموعه ای از قطار پالس مربعی فرض شده است که با سه ویژگی زیر مشخص می‌شوند.

مدولاسیون بکارگیری

• دامنه‌ی پالس

• پهنا‌ی پالس

مدولاسیون نرخ

• فرکانس

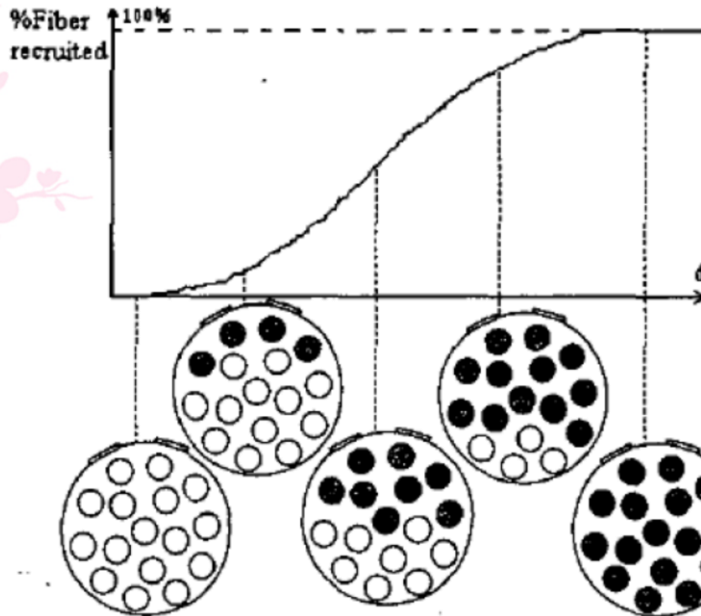
نیروی عضله، با تنظیم این ویژگی‌ها قابل کنترل است.

منحنی به کارگیری (recruitment curve)

۱۲۸

مشخصه‌ی به کارگیری، بیان‌گر میزان واحدهای حرکتی به کار گرفته شده به ازای شدت تحریک اعمالی است. به کارگیری، به دامنه و پهنای پالس تحریک وابسته است.

در شرایطی که شدت تحریک زیر حد آستانه باشد، هیچ واحد حرکتی به کار گرفته نمی‌شوند.



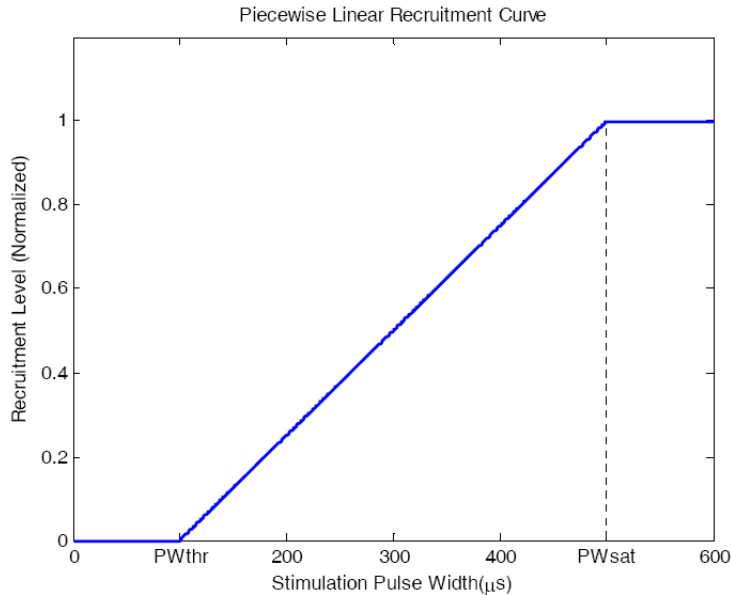
با گذر از حد آستانه، هر چه شدت تحریک افزایش یابد، واحدهای حرکتی بیشتری به کار گرفته می‌شوند تا جایی که تمامی آنها در انقباض عضله نقش خود را ایفا می‌کنند و بیشترین نیرو در عضله تولید می‌شود.

پس از این مرحله، وضعیت اشباع رخ می‌دهد و افزایش شدت تحریک نقشی در افزایش نیرو نخواهد داشت.

منحنی به کارگیری - تکه‌ای خطی

۱۲۹

$$a_r = \begin{cases} 0 & PW \leq PW_{thr} \\ \frac{1}{PW_{sat} - PW_{thr}} (PW - PW_{thr}) & PW_{thr} \leq PW \leq PW_{sat} \\ 1 & PW \geq PW_{sat} \end{cases}$$

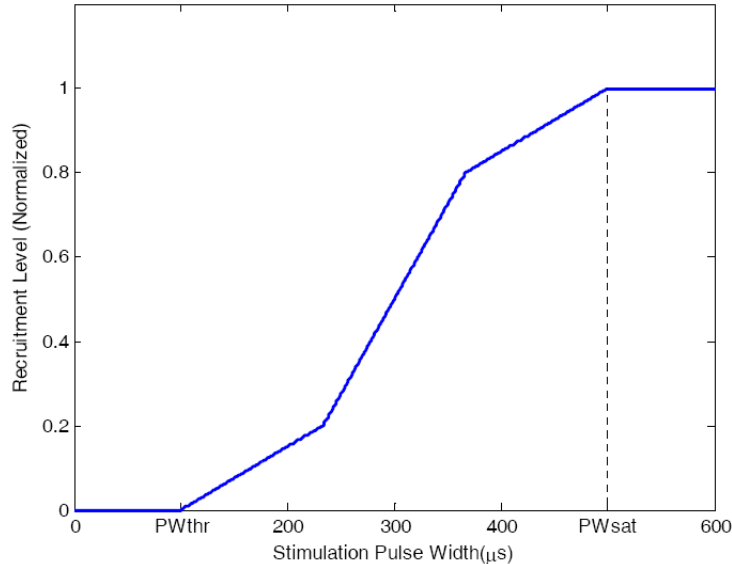


منحنی به کارگیری - تکه‌ای خطی دقیق‌تر

۱۳۰

$$a_r = \begin{cases} 0 & PW \leq PW_{thr} \\ \frac{0.6}{PW_{sat} - PW_{thr}} (PW - PW_{thr}) & PW_{thr} \leq PW \leq PW_{thr} + \frac{(PW_{sat} - PW_{thr})}{3} \\ 1.8 \left(PW - \frac{2PW_{thr}}{3} - \frac{PW_{sat}}{3} \right) \frac{1}{PW_{sat} - PW_{thr}} + 0.2 & PW_{thr} + \frac{(PW_{sat} - PW_{thr})}{3} \leq PW \leq PW_{thr} + \frac{2(PW_{sat} - PW_{thr})}{3} \\ \frac{0.6 \left(PW - \frac{PW_{thr}}{3} - \frac{2PW_{sat}}{3} \right)}{PW_{sat} - PW_{thr}} + 0.8 & PW_{thr} + \frac{2(PW_{sat} - PW_{thr})}{3} \leq PW \leq PW_{sat} \\ 1 & PW \geq PW_{sat} \end{cases}$$

Recruitment Curve (Piecewise Linear Approximation)



منحنی به کارگیری - غیر خطی

مقدار نرمالیزه شده واحد حرکتی به کار گرفته شده:

$$a_r = C_1 \{ (PW - PW_{thr}) \tan^{-1} [k_{thr} (PW - PW_{thr})] - (PW - PW_{sat}) \tan^{-1} [k_{sat} (PW - PW_{sat})] \} + C_2$$

PW_{thr} و PW_{sat} به ترتیب مقادیر پهنای پالس متناظر با آستانه و اشباع به کارگیری عضله است. خمیدگی منحنی به کارگیری در نواحی آستانه و اشباع، به ترتیب با تغییر k_{thr} و k_{sat} تنظیم می شود.

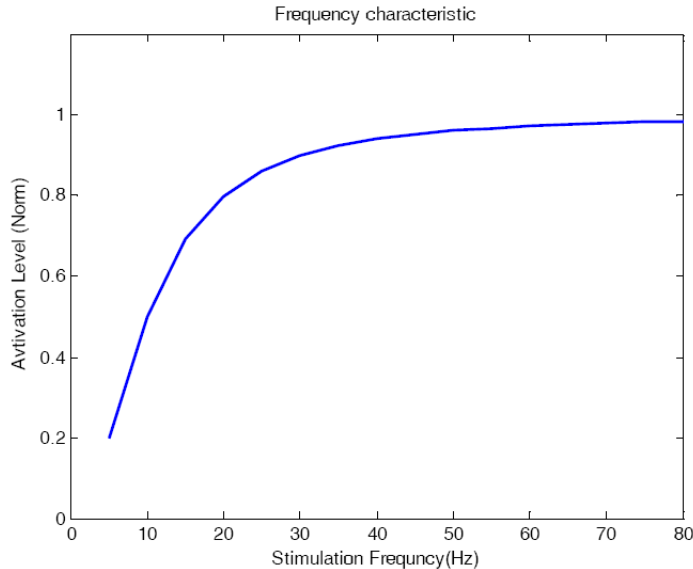
ثابت های C_1 و C_2 تامین کننده شرایط مرزی $a_r(0) = 0$ و $a_r(\infty) = 1$ است.



رابطه فعالیت فرکانس

مقدار نرمالیزه شده‌ی فعال سازی، در یک واحد حرکتی منفرد، به صورت تابعی از فرکانس تحریک ۱۳۲ بیان می‌شود:

$$a_f(f) = \frac{(\alpha f)^2}{1+(\alpha f)^2} \quad 0 \leq a_f \leq 1$$

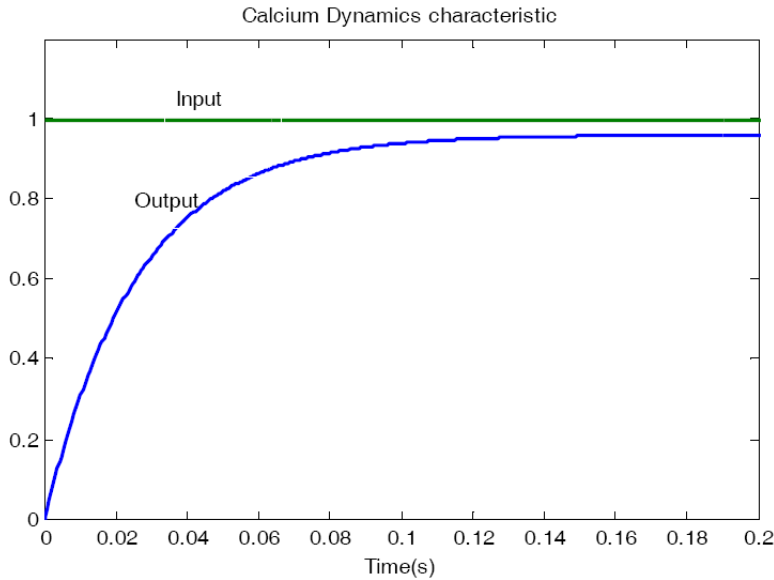


دینامیک کلسیم

۱۳۳

به علت نحوه‌ی عملکرد یون کلسیم در امر انقباض فیبرهای عضلانی، فعالیت و عدم فعالیت (بازگشت به حالت استراحت) عضله آنی انجام نمی‌گیرد و با یک دینامیک همراه است. این دینامیک که از آن به عنوان دینامیک کلسیم نام برده می‌شود به صورت یک معادله دیفرانسیل مرتبه اول مدل می‌شود:

$$\dot{a} = \frac{1}{\tau_{ac}} (u^2 - ua) + \frac{1}{\tau_{ad}} (u - a)$$



مدل خستگی-بازیابی

برای توصیف اثر خستگی عضله، از یک تابع برازندگی استفاده شده است که با معادله مرتبه

اول زیر بیان می شود:

$$\frac{dfit}{dt} = \frac{(fit_{min} - fit)a\lambda(f)}{\tau_{fat}} + \frac{(1 - fit)(1 - a\lambda(f))}{\tau_{rec}}$$

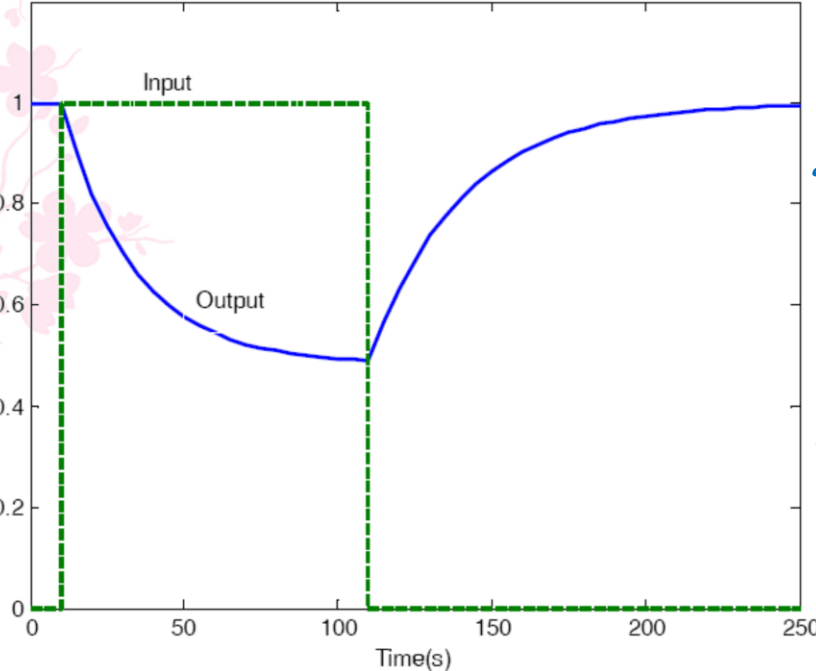
$$\lambda(f) = 1 - \beta + \beta \left(\frac{f}{100} \right)^2$$

Fitness function

در این معادلات fit_{min} ، τ_{fat} ، τ_{rec} به ترتیب کمینه‌ی برازندگی، ثابت زمانی خستگی و ثابت زمانی بهبود می باشند. عبارت $\lambda(f)$ تابعی از فرکانس تحریک است و بیان کننده وابستگی خستگی به فرکانس تحریک می باشد. β نیز ضریب شکل دهی است. این معادله تغییرات برازندگی را بر اساس تاثیرات هر دو عامل خستگی و بهبود در نظر می گیرد. در نهایت فعالیت عضله خستگی پذیر با رابطه زیر بیان می شود:

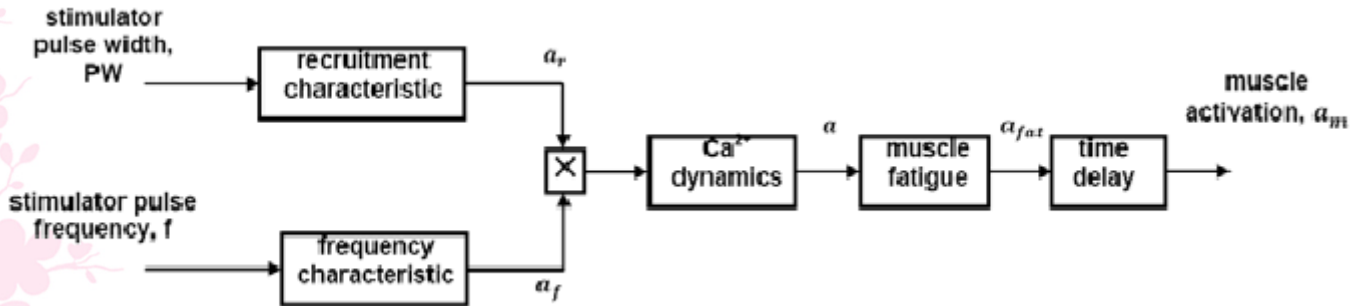
$$a_{fat}(t) = a(t)fit(t)$$

۱۳۴



تاخیر عضله

بلوک تاخیر زمانی ثابت، محدودیت سرعت هدایت در سیستم غشایی و تاخیرهای ناشی از واکنش‌های شیمیایی را مدل می‌کند.



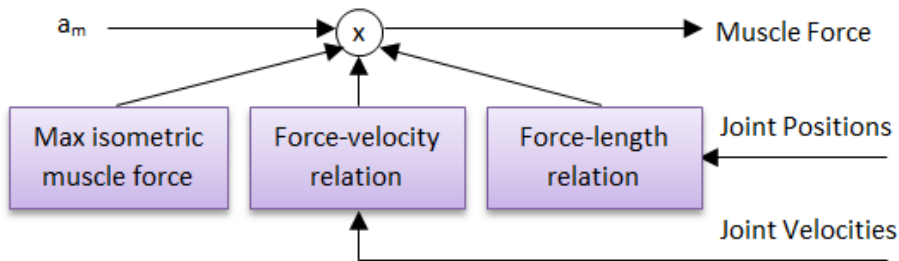
دینامیک انقباض

دینامیک انقباض، انقباض مایوفیبریل‌های عضلانی را در پاسخ به میزان فعالیت نشان می‌دهد. ۱۳۷

در دینامیک انقباض، میزان فعالیت عضله در بیشینه‌ی نیروی ایزومتریک عضله، فاکتور نیرو-طول و فاکتور نیرو-سرعت ضرب می‌شود تا مقدار مطلق نیروی عضله به دست آید.

$$F_m(t) = F_{om} \bar{F}L(t) \bar{F}V(t) a_m(t)$$

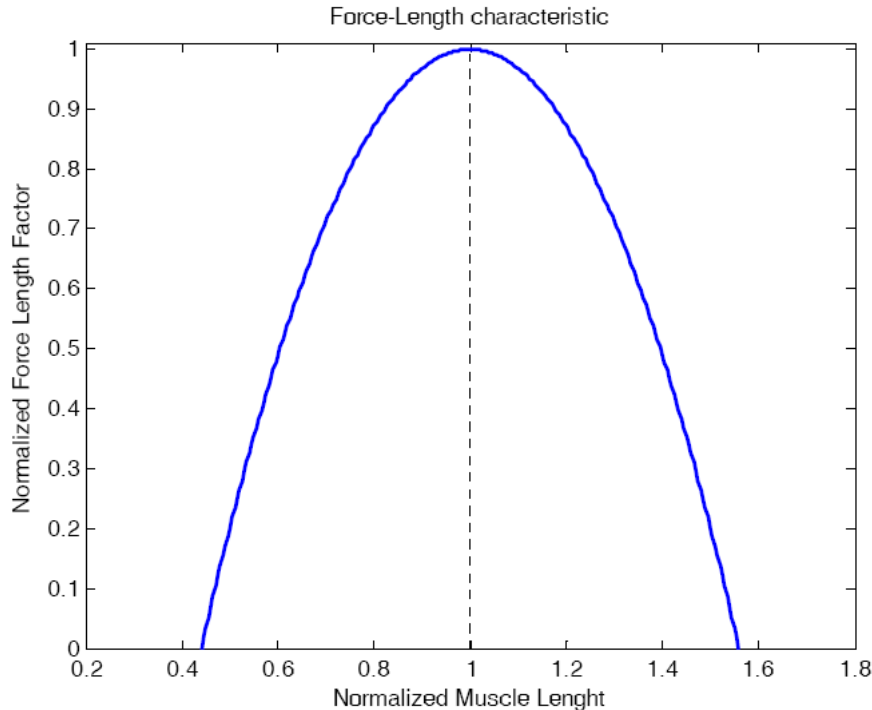
در این معادله $a_m(t)$ نشان‌گر میزان فعالیت عضله، $\bar{F}L(t)$ نشان‌گر فاکتور نیرو-طول، $\bar{F}V(t)$ نشان‌گر فاکتور نیرو-سرعت و F_{om} حداکثر نیروی عضله است.



رابطه نیرو-طول

- بیشترین نیرو زمانی در عضله ایجاد می شود که عضله در طول بهینه‌ی خود قرار داشته باشد و چنانچه در وضعیت جمع شده یا کشیده شده باشد، نیرو کاهش خواهد یافت.

$$\widetilde{FL} = k\widetilde{L}_m^2 - 2k\widetilde{L}_m + k + 1 = k(\widetilde{L}_m - 1)^2 + 1$$

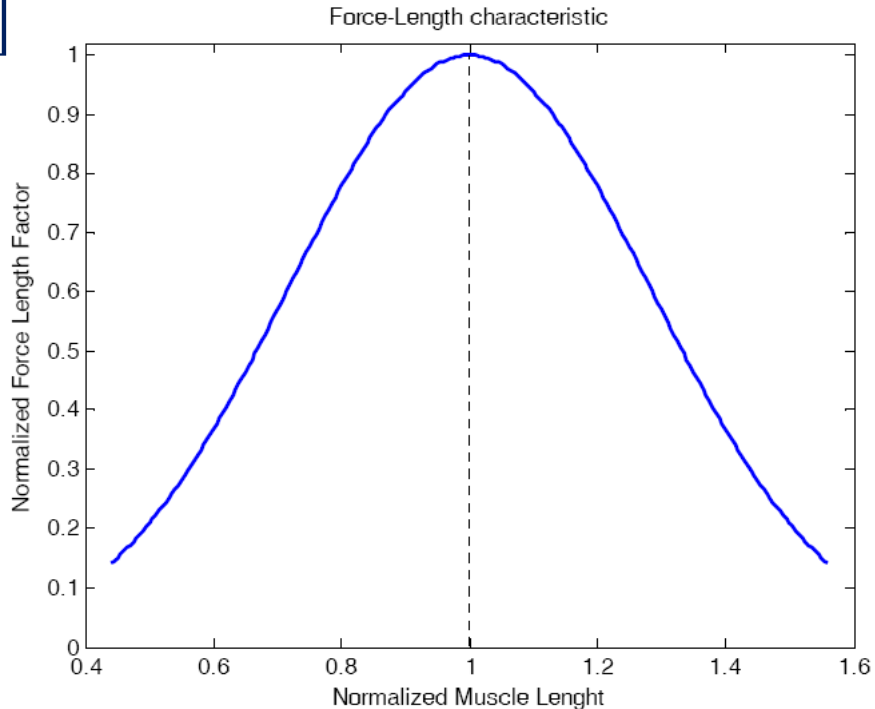


رابطه نیرو-طول

رابطه نیرو-طول با تابع گوسی زیر مدل می‌شود:

$$\bar{F}L = \exp \left[- \left(\frac{(\tilde{L}_m - 1)}{\varepsilon} \right)^2 \right]$$

در این رابطه \tilde{L}_m طول نرمالیزه عضله نسبت به طول بهینه‌ی آن (L_{om}) و ε ضریب شکل‌دهی است.



با توجه به اینکه اندازه‌گیری مستقیم طول عضله در هنگام آزمایش مشکل است، از دید ماکروسکوپی، طول عضله را می‌توان با رابطه‌ی زیر تقریب زد:

$$l = r(\theta - \theta_r) + L_{om}$$

در این رابطه، θ زاویه، θ_r زاویه استراحت مفصل بر حسب رادیان و r بازوی گشتاور عضله بر حسب متر است.

رابطه نیرو-سرعت

۱۴۱ در مقایسه با انقباض ایزومتریک، انقباض کانسنتریک نیروی کمتر و انقباض اکسنتریک نیروی بیشتری در عضله ایجاد می‌کند. رابطه‌ی نیرو-سرعت این‌گونه توصیف می‌شود:

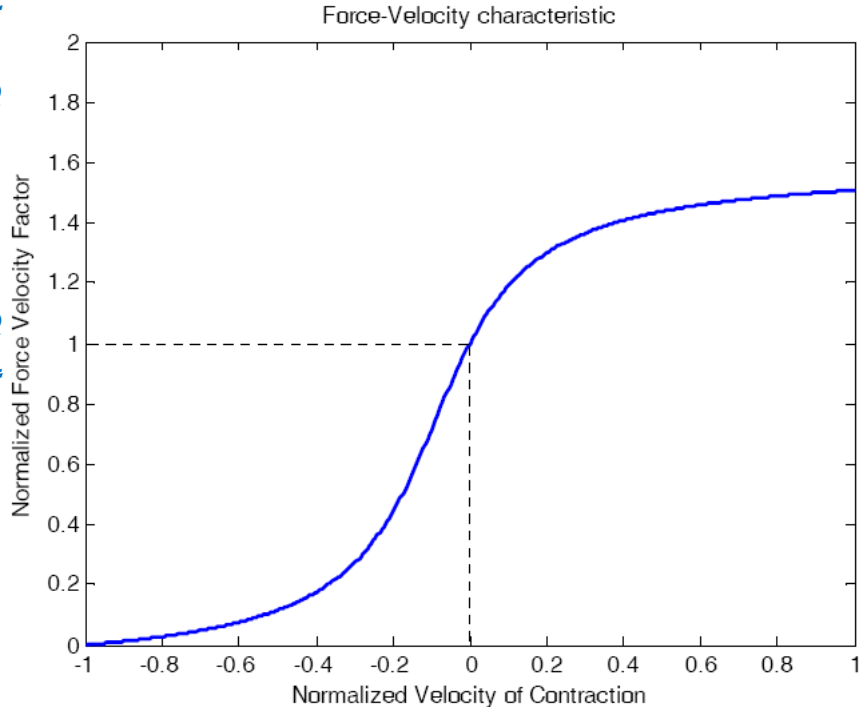
$$\tilde{FV}(t) = 0.54 \tan^{-1}(5.69\tilde{V}_m + 0.51) + 0.745$$

که \tilde{V}_m سرعت نرمالیزه شده نسبت به بیشترین سرعت انقباض ماهیچه V_{om} ماهیچه است.

$$\tilde{V}_m = \frac{v}{V_{om}}, \quad v = \frac{dl}{dt}$$

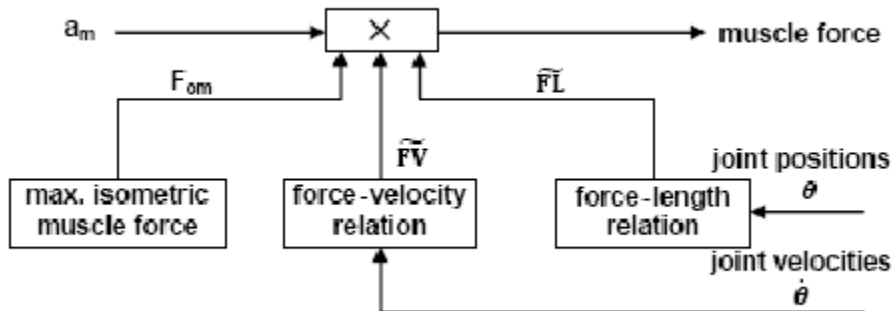
برای انقباض ماهیچه $v \leq 0$ در نظر گرفته می‌شود.

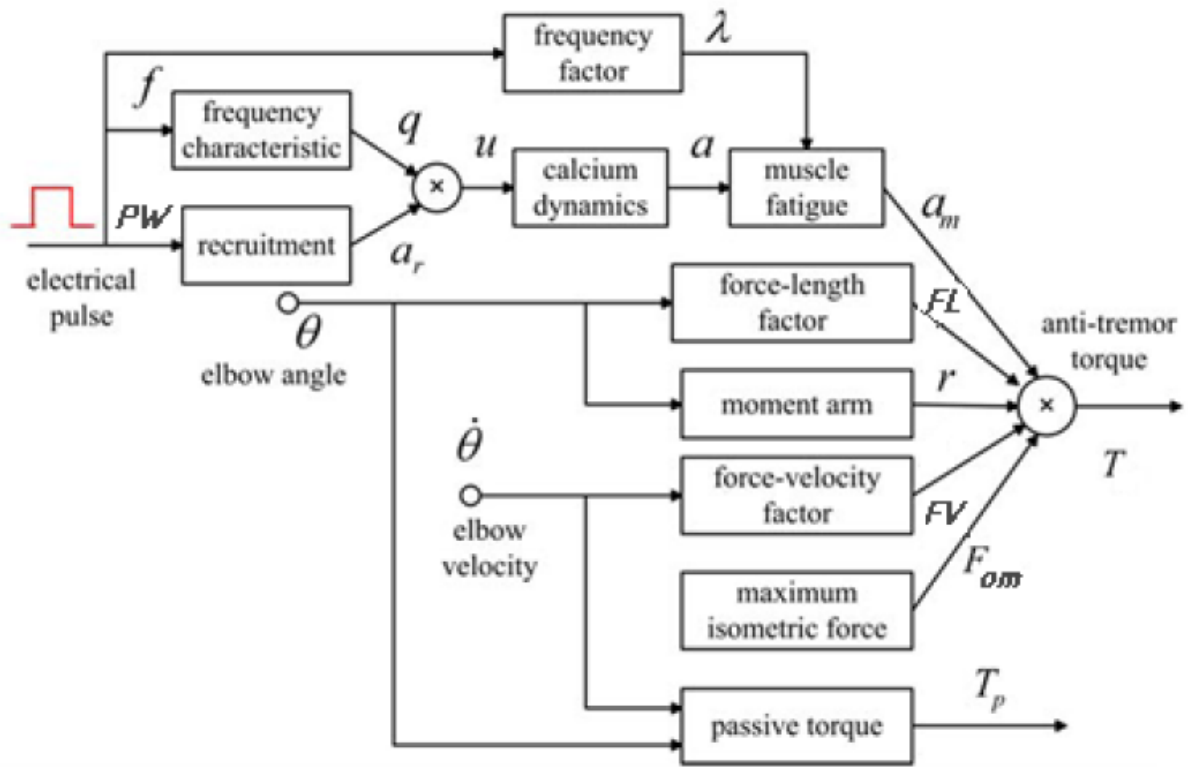
$$\tilde{FV} = \frac{a}{1 + e^{b(\tilde{V}_m - c)}}$$



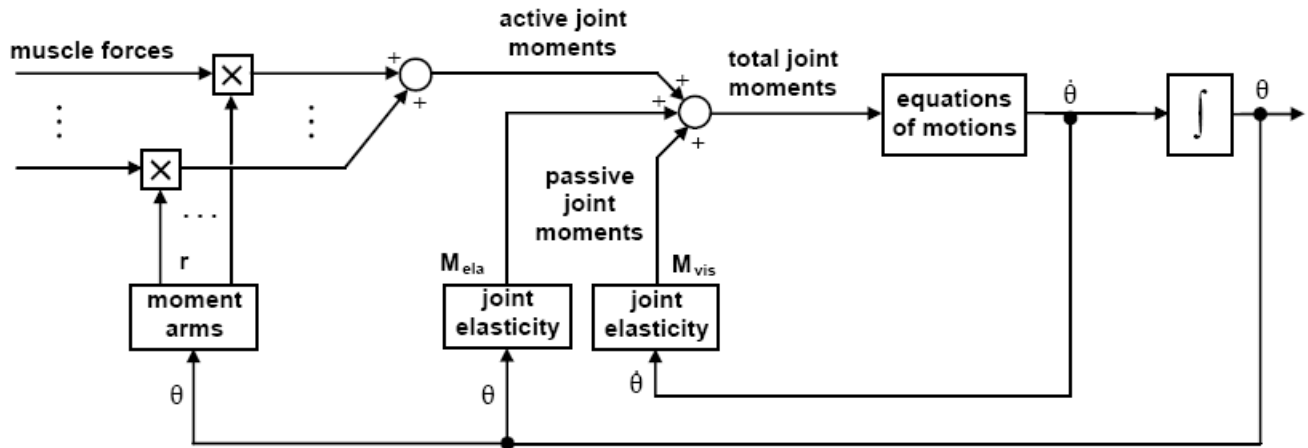
با توجه به اینکه اندازه‌گیری مستقیم سرعت عضله در هنگام آزمایش مشکل است، از دید ماکروسکوپی، این پارامتر به صورت $v = r\dot{\theta}$ محاسبه می‌شود که در آن $\dot{\theta}$ سرعت زاویه‌ای مفصل است.

$$F_m(t) = F_{om} \widetilde{F}L(t) \widetilde{F}V(t) a_m(t)$$

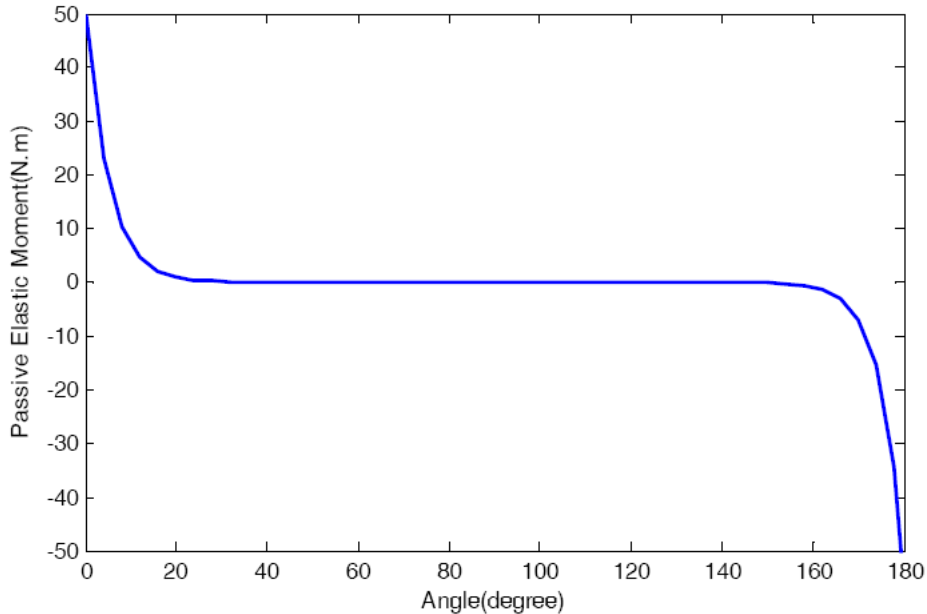




شکل ۱-۴- بلوک دیاگرام مدل سازی عضله به شیوهی Zajac (برگرفته از مرجع [۱۴])



$$T_p = -0.2\dot{\theta} - 7.8 \operatorname{sgn}\left(\theta - \frac{\pi}{2}\right) \left[\exp\left(\frac{36\left|\theta - \frac{\pi}{2}\right|}{\pi}\right) - 1 \right] \times 10^{-7}$$



فهرست مطالب:

- ✓ مقدمه
- ✓ معماری عضله
- ✓ فیزیولوژی عضله و مکانیزم انقباض
- ✓ واحد حرکتی
- ✓ نحوه‌ی تولید نیرو در عضله: اصل اندازه
- ✓ روابط نیرو-طول و نیرو-سرعت عضله
- ✓ انواع انقباض عضلانی
- ✓ دوک عضلانی
- ✓ اندام تاندون گلژی (GTO)
- ✓ مدل‌های عضله



الهی!

من نه آنم که ز فیض نکمت چشم پوشم،

تو نه آنی که کدرا نوازی به مگای؛

در اگر باز نکرده، نروم باز به جایی؛

پشت دیوار نشینم، چو کدابر سر راهی؛

کس به غمیر تو نخواهم، چه نخواهی چه نخواهی؛

باز کن در، که جز این خانه مرا نیست پناهی.

مباحث درس

۱۴۹

- ✓ سازمان دهی و طرح ریزی حرکت
- ✓ واحد حرکتی، عملکرد ماهیچه و مدل های آن
- نخاع و ریفلکس های نخاعی
- جابجایی و مولد الگوی مرکزی (CPG)
- حرکت های ارادی
- کنترل حرکت چشم و مدل های آن
- سیستم دهلیزی
- حفظ وضعیت بدن
- مخچه و مدل های آن
- عقده های قاعده ای
- تحریک الکتریکی عملکردی (FES)