برد شونفلد

علم هایپرتروفی عضلانی

آشنایی کامل با جزئیات فرآیند پیچیدهٔ افزایش تودهٔ عضلانی

دکتر فرهاد دریانوش
دانشیار دانشگاه شیراز

سید مسلم اسدپور
دانشجوی دکتری فیزیولوژی ورزشی دانشگاه شیراز

زینب هوشمندی
عضو هیئت علمی دانشگاه پیام‌نور

روزبه امیریان

مهشید مهذب
دانشجوی دکتری فیزیولوژی ورزشی دانشگاه آزاد واحد تهران مرکز

دکتر ناصر امیری
دکتری فیزیولوژی ورزشی و عضوهیئت علمی دانشگاه آزاد اسلامی واحد اراک

ناشر نمونه کشور در سال ۹۳

|علم هایپرتروفی عضلانی آشنایی کامل با جزئیات فرانید پیچیده افزایش توده عضلانی|

تألیف: برند شونفلد

ترجمه: دکتر فرهاد دریانوش، سید مسلم اسدپور، زینب هوشمندی، روزبه امیریان، مهشید مهذب، دکتر ناصر امیری

| سرپرست واحد گرافیک/ المیرا میرموسوی

| مدیر هنری و طراح جلد/ محمودرضا لطیفی

| ناظر چاپ/ مهدی تکلو

| نوبت چاپ/ اول ۱۳۹۷ / دوم ۱۳۹۸ / **سوم ۱۳۹۹**

| شمارگان/ ۵۰۰ نسخه

سرشناسه: شونفلد، برند
عنوان و نام پدیدآور: علم هایپرتروفی عضلانی آشنایی کامل با جزئیات فرانید پیچیده افزایش توده عضلانی/ نویسنده برند شونفلد ؛ مترجم دکتر فرهاد دریانوش و همکاران.
مشخصات نشر: تهران: شرکت تضامنی انتشاراتی حتمی و شرکا، ۱۳۹۷.
مشخصات ظاهری: ۲۰۶ ص.: مصور،جدول ،نمودار .
شابک: ۹۷۸-۶۰۰-۳۵۵-۲۱۰-۴
وضعیت فهرست نویسی: فیپا
یادداشت: عنوان اصلی: .Science AND Development OF Muscle Hypertrophy
موضوع: عضلانی-- سبب‌شناسی
موضوع: بدنسازی
موضوع: آمادگی جسمانی -- جنبه‌های فیزیولوژیکی
موضوع: Physical fitness -- Physiological aspects
شناسه افزوده: دریانوش، فرهاد، ۱۳۵۳ -، مترجم، ناظر
رده بندی کنگره: ۱۳۹۷ RB۱۵۶/آ۴ر۴
رده بندی دیویی: ۶۱۶/۰۴۴
شماره کتابشناسی ملی: ۵۱۷۲۸۳۹

مرکز پخش: تهران، خیابان انقلاب، بین خیابان ۱۲ فروردین و اردیبهشت، جنب بانک صادرات، ساختمان ۱۳۶۰، طبقه پنجم، واحد ۲۳
۶۶۴۰۳۱۷۰ | ۶۶۴۰۳۱۶۲ | hatmipg.com

مجموعه‌ی فیزیولوژی ورزشی

توجـــــه:
به موجب ماده ۵ قانون حمایت، از حقوق مؤلفان، مصنفان و هنرمندان مصوب ۱۳۴۸/۱۰/۱۱ کلیه حقوق این کتاب برای انتشارات حتمی محفوظ می‌باشد و هیچ شخص حقیقی یا حقوقی حق استفاده از آن را ندارد و متخلفین به موجب این قانون تحت پیگرد قانونی قرار می‌گیرند.

فهرست

مقدمه مؤلف	۸
مقدمه مترجم	۱۰
فصل اول :پاسخ‌های مرتبط با هایپرتروفی و سازگاری به فعالیت ورزشی	**۱۲**
سیستم عصبی-عضلانی	۱۲
ساختار و عملکرد	۱۲
واحد حرکتی	۱۴
تئوری لغزش فیلامنت	۱٤
انواع تارهای عضلانی	۱۵
پاسخ‌ها و سازگاری‌ها	۱۸
محرک عصبی	۱۸
فعال‌سازی عضلات	۱۹
هماهنگی واحدهای حرکتی	۲۰
انقباض هم‌زمان عضلات مخالف	۲۰
تحریک دوگانه (هم‌زمان)	۲۱
تعادل پروتئین	۲۱
هایپرتروفی	۲۳
هایپرتروفی موازی و سری (متوالی)	۲۳
هایپرتروفی سارکوپلاسمی	۲۵
سلول‌های ماهواره‌ای	۲۷
هایپرپلازی	۳۰
دستگاه‌های اندوکراین، پاراکراین و اتوکراین	۳۲
واکنش و سازگاری در هورمون‌ها	۳۲
عامل رشد شبه انسولین-۱	۳۳
هورمون رشد	۳۴
تستوسترون	۳۵
انسولین	۳۷
واکنش‌های هورمونی کوتاه مدت در برابر بلند مدت	۳۷
واکنش و سازگاری در میوکاین‌ها	۴۱
عامل رشد مکانیکی	۴۲
اینترلوکین‌ها	۴۳

مایواستاتین ۴۵
میوکاین‌های دیگر ۴۷
خلاصه نکات ۴۸
فصل دوم:مکانیزم‌های هایپرتروفی ۵۰
تنش مکانیکی ۵۰
مسیرهای پیام‌رسانی ۵۴
مسیر PI3K/Akt ۵۴
مسیرهای MAPK ۵۵
مسیرهای وابسته به کلسیم ۵۶
مسیر فسفاتیدیک اسید ۵۷
مسیر AMPK ۵۸
فشار متابولیکی ۵۹
محدود شدن جریان خون ۶۱
فراخوانی تارهای عضلانی ۶۲
تولید میوکاین ۶۳
تورم سلولی ۶۴
تولید هورمون سیستمیک ۶۵
بحث و نتیجه‌گیری در ارتباط با نقش فشار متابولیکی در هایپرتروفی ۶۶
آسیب عضلانی ۶۷
چالش‌های پیش‌روی نظریه EIMD ۶۸
فرآیندهای التهابی ۷۱
فعالیت سلول‌های ماهواره‌ای ۷۳
تأثیرات NSAIDها بر هایپرتروفی عضلات ۷۴
تولید IGF-1 ۷۵
تورم سلولی ۷۶
بحث و نتیجه‌گیری در خصوص نقش آسیب عضلانی در هایپرتروفی ۷۷
خلاصه نکات ۷۷
فصل سوم:نقش متغیرهای تمرین مقاومتی در هایپرتروفی ۷۸
حجم ۷۸
حجم ۸۴
کاربردهای عملی ۸۴
تواتر تمرین ۸۵
تواتر ۹۰

کاربردهای عملی ۹۰
بار تمرین ۹۰
بار ۹۸
کاربردهای عملی ۹۸
انتخاب فعالیت ورزشی ۹۸
انتخاب فعالیت ورزشی ۱۰۲
کاربردهای عملی ۱۰۲
نوع فعالیت عضلانی ۱۰۲
نوع فعالیت عضلانی ۱۰۸
کاربردهای عملی ۱۰۸
طول فواصل استراحت ۱۱۱
کاربردهای عملی ۱۱۱
مدت تکرارها ۱۱۲
مدت تکرارها ۱۱۸
کاربردهای عملی ۱۱۸
ترتیب فعالیت‌های ورزشی ۱۱۸
ترتیب فعالیت‌های ورزشی ۱۲۰
کاربردهای عملی ۱۲۰
دامنه حرکت ۱۲۱
دامنه حرکتی ۱۲۲
کاربردهای عملی ۱۲۲
شدت تلاش ۱۲۳
شدت تلاش ۱۲۶
کاربردهای عملی ۱۲۶
خلاصه نکات ۱۲۶
فصل چهارم:نقش تمرین هوازی در هایپرتروفی **۱۲۸**
تأثیرات هایپرتروفی ناشی از تمرین هوازی به تنهایی ۱۲۹
شدت ۱۳۰
حجم و وهله‌های تمرین ۱۳۱
شیوه تمرین ۱۳۱
شدت، وهله‌ها، حجم و نوع تمرین هوازی ۱۳۳
کاربردهای عملی ۱۳۳
سایر فاکتورها ۱۳۴

تمرین ترکیبی ۱۳۵
شدت ۱۳۷
حجم و وهله‌ها ۱۳۸
نوع فعالیت ورزشی ۱۳۸
برنامه‌ریزی ۱۳۹
تمرین ترکیبی ۱۴۰
نتایج تحقیقات ۱۴۰
خلاصه نکات ۱۴۱
فصل پنجم:عوامل مؤثر در پیشرفت هایپرتروفی بیشینه ۱۴۲
سن ۱۴۵
جنسیت ۱۴۸
شرایط تمرینی ۱۴۹
بیومکانیک ۱۵۳
رابطه طول- تنش ۱۵۳
فصل ششم:طراحی تمرین برای هایپرتروفی بیشینه ۱۵۳
زاویه فعالیت ۱۵۴
سطوح حرکتی ۱۵۵
فاصله دست‌ها و پاها ۱۵۶
نوع تمرین ۱۵۶
کانون توجه و هایپرتروفی عضلانی ۱۵۷
کاربردهای عملی ۱۵۷
راهبرد انتخاب نوع تمرین ۱۵۹
پشت ۱۵۹
سینه ۱۶۰
شانه ۱۶۲
بخش فوقانی دست ۱۶۲
لگن ۱۶۳
قسمت قدامی ران ۱۶۴
قسمت خلفی ران ۱۶۵
قسمت پایینی پا ۱۶۵
زمانبندی ۱۶۵
روش‌های زمانبندی ۱۶۶
زمانبندی خطی سنتی ۱۶۷
زمانبندی غیر خطی(موجی) ۱۶۹

زمانبندی معکوس ۱۷۲
دوره‌های کاهش بار تمرین ۱۷۳
زمانبندی شدت بار ۱۷۴
حجم و تکرار زمانبندی شده ۱۸۳
خلاصه نکات ۱۸۳
فصل هفتم:تغذیه برای هایپرتروفی ۱۸۴
تعادل انرژی ۱۸۴
مصرف درشت مغذی ۱۸۶
پروتئین ۱۸۶
اثر بر عملکرد ۱۸۷
الزامات ۱۸۸
کیفیت ۱۹۰
روش‌های ارزیابی کیفیت پروتئین ۱۹۱
کاربردهای عملی ۱۹۱
کربوهیدرات‌ها ۱۹۲
تأثیر بر عملکرد ۱۹۳
الزامات ۱۹۵
چربی رژیم غذایی ۱۹۵
تأثیر بر عملکرد ۱۹۶
الزامات ۱۹۷
تکرار وعده‌های غذایی ۱۹۸
تکرار وعده‌های غذایی برای هایپرتروفی ۱۹۹
کاربردهای عملی ۱۹۹
زمانبندی تغذیه ۲۰۰
پنجره فرصت آنابولیک ۲۰۰
تأثیر پروتئین پس از تمرین بر هایپرتروفی ۲۰۱
تأثیر کربوهیدرات پس از تمرین بر هایپرتروفی ۲۰۲
دستورالعمل‌های زمان‌بندی تغذیه ۲۰۴
کاربردهای عملی ۲۰۴
خلاصه نکات ۲۰۴

● مقدمه مؤلف

تلاش برای ایجاد و توسعه یک بدن عضلانی، قدمتی طولانی دارد. در قرن ۱۱، برای اولین بار بومیان هندوستان از وزنه‌های دمبل مانندی که از سنگ ساخته شده بودند برای افزایش اندازه عضلات استفاده کردند و از این زمان باشگاه‌های ورزشی در کشور راه‌اندازی شدند و در قرن ١٦ در هندوستان، وزنه برداری به سرگرمی ملی مردم این کشور تبدیل شد. با این‌حال، تا اواخر دهه ۱۸۰۰ میلادی، ساندوف – پیشوای یهودیان– به عنوان پدر بدن‌سازی شناخته می‌شد و بدن‌سازی را به عموم مردم معرفی می‌کرد. ساندوف به نقاط مختلف جهان سفر کرد و عضلات خوش‌فُرم خود را در معرض دید تماشاگران زیادی قرار داد. همچنین ساندوف اولین تجهیزات تمرینات مقاومتی را (مانند دمبل، قرقره و کش‌های نیرو)، که باعث افزایش توده عضلانی می‌شد را اختراع کرد.

امروزه میلیون‌ها نفر در سراسر جهان با هدف افزایش توده عضلانی تمرین می‌کنند. برخی با هدف زیبایی و دیگران، برای افزایش عملکرد ورزشی تمرین می‌کنند. اخیراً تمرکز روی مزایای سلامتی ناشی از افزایش هایپرتروفی معطوف شده است. سارکوپنیا – از دست دادن توده عضلانی ناشی از سن– که بیش از نیمی از جمعیت بالای ۸۰ سال را تحت تأثیر قرار می‌دهد، در اختلال عملکرد و همچنین شروع بسیاری از بیماری‌های مزمن نقش دارد.

سالیان زیادی رویکردهای تمرینی و تغذیه‌ای برای افزایش رشد عضلات، به‌صورت باشگاهی و شخصی بود. کسانی که تمایل به افزایش اندازه عضلات داشتند، بدنسازان مورد علاقه خود را دنبال می‌کردند. شواهد علمی در مورد این موضوع کم بود و رهنمودهای مبتنی بر تحقیق، حاصل اطلاعات محدود موجود بود.

این موضوع در چند دهه اخیر، تغیر چشمگیر داشته است و در تعداد مطالعات مربوط به بررسی پاسخ هایپرتروفی به تمرین ورزشی انفجار رخ داده است. اخیراً جستجوی واژه هایپرتروفی عضلات اسکلتی در PubMed حاکی از انتشار ۵۰۰ نسخه، تنها در سال ٢٠١٤ بود. علاوه بر این، تکنیک‌های مورد استفاده برای ارزیابی نتایج هایپرتروفی به طور حاد و مزمن، پیشرفته کرده‌اند و به طور گسترده‌ای در دسترس می‌باشند. به همین دلیل، اکنون شواهد جامعی از درک درستی و چگونگی رشد عضلانی ناشی از تمرینات ورزشی وجود دارد.

در زیر یک مرور کلی از محتوای فصل‌ها ارائه شده است:

فصل اول به بررسی پاسخ‌های مربوط به هایپرتروفی و سازگاری به فشار ورزشی پرداخته است. در این فصل، خلاصه‌ای از ساختار و عملکرد سیستم عصبی– عضلانی و پاسخ‌ها و سازگاری‌های سیستم‌های عصبی– عضلانی، غدد درون‌ریز، پاراکرین و اتوکراین ارائه شده است.

فصل دوم، به مکانیسم‌های سلولی و مولکولی هایپرتروفی ناشی از ورزش می‌پردازد. برای توسعه راهبردهای افزایش رشد و هایپرتروفی، درک فرآیندهای مربوط به ساخت عضله، ضروری است. شما در این فصل خواهید آموخت چگونه جهت افزایش پروتئین عضله، نیروهای مکانیکی به سیگنال‌های شیمیایی تبدیل می‌شوند، چگونه انباشت متابولیت‌های ناشی از تمرین، تحریک پاسخ هایپرتروفی را افزایش می‌دهد و چگونه آسیب‌های ساختاری ناشی از تمرین در عضله، بر بازسازی بافت تأثیر می‌گذارد.

فصل سوم، نقش متغیرهای تمرین مقاومتی در هایپرتروفی را بررسی می‌کند. محققان بر این باورند که دستکاری دقیق این متغیرها، کلید پاسخ رشد است. شما در این فصل، چگونگی افزایش سازگاری‌های عضلانی از طریق حجم، تواتر، بار، انتخاب تمرین ورزشی، نوع فعالیت عضلانی، طول فواصل استراحت، مدت تکرار، ترتیب تمرین ورزشی، دامنه حرکت، و چگونگی تغییر آن‌ها برای افزایش حداکثری رشد عضلانی را خواهید آموخت.

فصل چهارم، به بررسی تأثیر تمرین هوازی در هایپرتروفی می‌پردازد. این موضوع، یک موضوع بسیار جذاب در مورد تصورات غلط نسبت به این نوع تمرین می‌باشد. شما در این فصل، چگونگی تأثیر شدت، مدت زمان، تواتر و نوع تمرین هوازی را بر پاسخ هایپرتروفی، وقتی که این تمرینات به‌تنهایی انجام شوند یا با تمرینات مقاومتی ترکیب شوند (مانند تمرینات ترکیبی) خواهید آموخت.

فصل پنجم، به ملاحظات خاص جمعیتی که بر ساخت و ساز عضلات تأثیر می‌گذارند پرداخته است. تفاوت قابل توجه در پاسخ هایپرتروفی افراد، ناشی از عوامل متعددی است. در این فصل چگونگی تأثیر ژنتیک، سن، جنس، و تجربه تمرینی بر توانایی افزایش اندازه عضلات را خواهید آموخت.

فصل ششم، اطلاعات کاربردی برای طراحی برنامه تمرین جهت افزایش حداکثری هایپرتروفی را ارائه می‌دهد. در واقع در این فصل، علم تمرین به عمل و هنر تبدیل می‌شود. شما چگونگی تغییر تمرین ورزشی را برای توسعه کامل عضلات، چگونگی روش‌های زمانبندی با توجه به پیشرفت‌های هایپرتروفی و بکارگیری یک برنامه زمانبندی برای حفظ نتایج را یاد می‌گیرید.

فصل هفتم، نقش تغذیه در هایپرتروفی را بررسی می‌کند. همان‌طور که می‌دانیم رژیم غذایی، تأثیر قابل توجهی بر ظرفیت عضله سازی دارد. شما در این فصل، تأثیر تعادل انرژی و درشت مغذی‌ها در رشد عضله، تأثیر تکرار وعده‌های غذایی در سنتز پروتئین عضله، و تأثیر زمانبندی مواد غذایی برای افزایش عضلات را خواهید آموخت.

کتاب «علم و افزایش هایپرتروفی عضلانی» یک منبع اطلاعاتی کامل در مورد هایپرتروفی عضلانی است.

در این کتاب یک بانک تصویری از آمار و ارقام، عکس‌ها، تصاویر و جداول در متن ارائه شده است و در اختیار مربیان قرار می‌گیرد. همچنین افراد می‌توانند با مراجعه به آدرس زیر کتاب را سفارش دهند.

HumanKinetics.com/ScienceAndDevelopmentOfMuscleHypertrophy

برِد سِنفِلد

● مقدمه مترجم

به‌نام خداوند نیرو و راستی

در زمینه علم هایپرتروفی عضلانی، کتاب‌های بسیاری نگاشته یا ترجمه و به چاپ رسیده است و با توجه به اهمیت و لزوم به‌روز شدن این علم برای محققین علوم ورزشی، بر آن شدیم که کتاب پیش رو را به فارسی برگردانیم.

کتاب پیش رو با عنوان اصلی Science and Development of Muscle Hypertrophy بوده و مدت زمان زیادی از چاپ آن نمی‌گذرد. نویسنده این کتاب «پروفسور برِد سِنفِلد» می‌باشد. این اولین کتابی است که پیشینه تحقیقاتی موجود در مورد فعالیت‌های عضلانی را به‌صورت یک منبع کامل و یک کتاب مرجع درآورده است. در این کتاب تمامی جنبه‌های موضوع به‌صورت جزئی، از مکانیزم‌های موجود در سطوح سلولی و مولکولی تا دستکاری متغیرها برای دستیابی به هایپرتروفی بیشینه، بررسی شده است. هرچند این کتاب کاربردی محور است، اما تمرکز اصلی آن بر بکارگیری اصول تمرین است. بنابراین، شما می‌توانید نتایج مبتنی بر شواهد را برای طراحی برنامه‌های هایپرتروفی به‌صورت فردی، استفاده کنید.

این کتاب مشتمل بر ۷ فصل است که در فصل اول به بررسی پاسخ‌های مربوط به هایپرتروفی و سازگاری به فشار ورزشی پرداخته شده است. در این فصل، خلاصه‌ای از ساختار و عملکرد سیستم عصبی- عضلانی و پاسخ‌ها و سازگاری‌های سیستم‌های عصبی- عضلانی، غدد درون‌ریز، پاراکرین و اتوکراین ارائه شده است.

فصل دوم، به مکانیسم‌های سلولی و مولکولی هایپرتروفی ناشی از ورزش می‌پردازد. برای توسعه راهبردهای افزایش رشد و هایپرتروفی، درک فرآیندهای مربوط به ساخت عضله، ضروری است. شما در این فصل خواهید آموخت چگونه جهت افزایش پروتئین عضله، نیروهای مکانیکی به سیگنال‌های شیمیایی تبدیل می‌شوند، چگونه انباشت متابولیت‌های ناشی از تمرین، تحریک پاسخ هایپرتروفی را افزایش می‌دهد و چگونه آسیب‌های ساختاری ناشی از تمرین در عضله، بر بازسازی بافت تأثیر می‌گذارد.

فصل سوم، نقش متغیرهای تمرین مقاومتی در هایپرتروفی را بررسی می‌کند. محققان بر این باورند که دستکاری دقیق این متغیرها، کلید پاسخ رشد است. شما در این فصل، چگونگی افزایش سازگاری‌های عضلانی از طریق حجم، تواتر، بار، انتخاب تمرین ورزشی، نوع فعالیت عضلانی، طول فواصل استراحت، مدت تکرار، ترتیب تمرین ورزشی، دامنه حرکت، و چگونگی تغییر آن‌ها برای افزایش حداکثری رشد عضلانی را خواهید آموخت.

فصل چهارم، به بررسی تأثیر تمرین هوازی در هایپرتروفی می‌پردازد. این موضوع، یک موضوع بسیار جذاب در مورد تصورات غلط نسبت به این نوع تمرین می‌باشد. شما در این فصل، چگونگی تأثیر شدت، مدت زمان، تواتر و نوع تمرین هوازی را بر پاسخ هایپرتروفی، وقتی که این تمرینات به‌تنهایی انجام شوند یا با تمرینات مقاومتی ترکیب شوند (مانند تمرینات ترکیبی) خواهید آموخت.

فصل پنجم، به ملاحظات خاص جمعیتی که بر ساخت و ساز عضلات تأثیر می‌گذارند پرداخته است. تفاوت قابل توجه در پاسخ هایپرتروفی افراد، ناشی از عوامل متعددی است. در این فصل چگونگی تأثیر ژنتیک، سن، جنس، و تجربه تمرینی بر توانایی افزایش اندازه عضلات را خواهید آموخت.

فصل ششم، اطلاعات کاربردی برای طراحی برنامه تمرین جهت افزایش حداکثری هایپرتروفی را ارائه می‌دهد. در واقع در این فصل، علم تمرین به عمل و هنر تبدیل می‌شود. شما چگونگی تغییر تمرین ورزشی را برای توسعه کامل عضلات، چگونگی روش‌های زمانبندی با توجه به پیشرفت‌های هایپرتروفی و بکارگیری یک برنامه زمانبندی برای حفظ نتایج را یاد می‌گیرید.

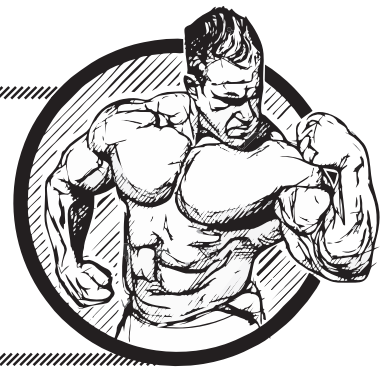
فصل هفتم، نقش تغذیه در هایپرتروفی را بررسی می‌کند. همان‌طور که می‌دانیم رژیم غذایی، تأثیر قابل توجهی بر ظرفیت عضله سازی دارد. شما در این فصل، تأثیر تعادل انرژی و درشت مغذی‌ها در رشد عضله، تأثیر تکرار وعده‌های غذایی در سنتز پروتئین عضله، و تأثیر زمانبندی مواد غذایی برای افزایش عضلات را خواهید آموخت.

کتاب «علم و افزایش هایپرتروفی عضلانی» یک منبع اطلاعاتی کامل در مورد هایپرتروفی عضلانی است و ضمن دارا بودن مطالب جدید در زمینه هایپرتروفی از جنبه سلولی و مولکولی، مرجعی کاربردی و قابل درک برای کلیه علاقمندان در این زمینه به‌ویژه دانشجویان تحصیلات تکمیلی در رشته تربیت‌بدنی و علوم ورزشی می‌باشد.

در پایان بر خود لازم می‌دانم که از آقای حتمی- مدیریت محترم انتشارات حتمی- که در چاپ و نشر کتب مرتبط با تربیت بدنی و علوم ورزشی تلاش بی شائبه‌ای مبذول نموده‌اند، قدردانی کنم.

از خداوند متعال می‌خواهم که هر چه بیشتر ما را در خدمت به دانشجویان و علاقمندان به فراگیری علم یاری و مودت فرماید؛ باشد که در زمره هدایت شدگان قرار گیریم.

دکتر فرهاد دریانوش



فصل اول: پاسخ‌های مرتبط با هایپرتروفی و سازگاری به فعالیت ورزشی

برای شناخت بسیاری از عوامل مؤثر در به حداکثر رساندن هایپرتروفی عضلات اسکلتی، مطالعه مبانی علمی در ارتباط با پاسخ و سازگاری عضلات به فعالیت ورزشی ضروری می‌باشد. این فصل، به بررسی ساختار و عملکرد سیستم‌های عصبی–عضلانی، غدد درون‌ریز، پاراکراین و اتوکراین می‌پردازد. اگرچه این سیستم‌ها به‌صورت جداگانه مورد بررسی قرار می‌گیرند، اما باید توجه داشت که با یکدیگر ارتباط دارند و اثرات متقابل آن‌ها، در نهایت باعث هایپرتروفی توده بدون چربی بدن می‌شود.

● سیستم عصبی-عضلانی

بحث در مورد جزئیات روند هایپرتروفی عضلات اسکلتی، نیازمند شناخت مبانی سیستم عصبی–عضلانی و به‌طور خاص تعامل بین اعصاب و عضلات می‌باشد که می‌تواند با تولید نیرو، باعث حرکت انسان شود. اگرچه جزئیات کامل در مورد این موضوع، از حوصله این کتاب خارج است، اما در این فصل، مفهوم کلی آن مورد بررسی قرار می‌گیرد و در فصل‌های بعدی، جزئیات با دقت بیشتری مورد مطالعه قرار می‌گیرند. به کسانی که علاقه‌مند به مطالعه بیشتر در رابطه با این موضوع هستند، پیشنهاد می‌کنیم کتب فیزیولوژی ورزشی مرتبط با این موضوع را مورد مطالعه قرار دهند.

● ساختار و عملکرد

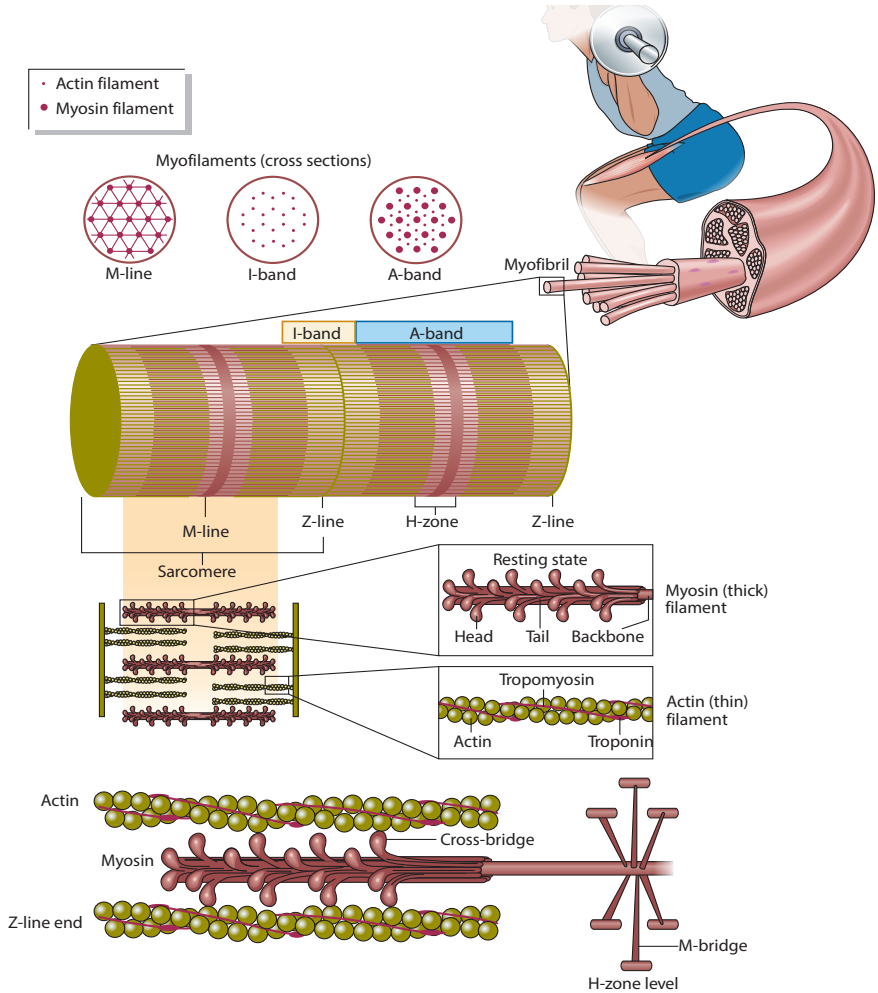
از نقطه‌نظر عملکردی، عضلات اسکلتی مختلف بدن، به‌صورت یک واحد در نظر گرفته می‌شوند. بااین‌حال، ساختار عضلانی بسیار پیچیده می‌باشد. عضله، توسط لایه‌هایی از بافت همبند احاطه شده است. لایه بیرونی که کل عضله را می‌پوشاند، اپی‌میوزیم[1] نام دارد. عضلات در دسته‌های کوچک‌تری به نام فاسیکول[2] که توسط لایه‌ای از بافت همبند به نام پری‌میوزیم[3] پوشیده شده است، قرار گرفته‌اند. در فاسیکول‌ها، سلول‌های عضلانی (تارهای عضلانی)، به‌صورت مجزا وجود دارند که توسط لایه‌ای از بافت همبند به نام اندومیوزیم[4] احاطه شده‌اند. تعداد تارهای موجود در هر فاسیکول، از چند صد تار در عضلات کوچک مانند عضله پرده گوش تا بیش از یک میلیون تار در عضلات بزرگ مانندِ عضله دوقلو است. در مقایسه با سایر سلول‌ها، سلول‌های عضلانی چند هسته‌ای[5] می‌باشند. این موضوع، این اجازه را به سلول می‌دهد تا در صورت نیاز، میزان سنتز پروتئین را افزایش دهد و در نتیجه رشد پیدا کند.

هنگامی‌که عضلات اسکلتی را در زیر میکروسکوپ مشاهده می‌کنیم، ظاهری راه‌راه یا مخطط دارند. این

---

1. Epimysium (م) یک لایه متراکم از فیبرهای کلاژن است که کل عضله اسکلتی را احاطه می‌کند
2. Fasciculi (م) مجموعه‌ای از تارهای عضلانی می‌باشند
3. Perimysium (م) لایه‌ای از بافت همبند که، فاسیکول عضلانی را دربر می‌گیرد
4. Endomysium (م) بافت همبند ظریفی است که تارهای عضلات اسکلتی منفرد از یک فاسیکول را احاطه می‌کند
5. Multinucleated

ظاهر مخطط، به‌دلیل قرارگیری سارکومرها که واحدهای عملکردی تارچه‌ها می‌باشند، به وجود می‌آید. هر تار عضلانی، شامل صدها تا هزاران تارچه است که از سارکومرهای فراوانی تشکیل شده‌اند که اتصال انتهای هر سارکومر، ابتدای سارکومر دیگر می‌باشد. تارچه‌ها از دو الیاف پروتئینی اصلی که مسئول انقباض نیز هستند، تشکیل شده‌اند که عبارتند از: اکتین (الیاف نازک) و میوزین (الیاف ضخیم). هر الیاف میوزین، توسط شش الیاف اکتین و هر الیاف اکتین، توسط سه الیاف میوزین احاطه شده است؛ با این ساختار، تعامل بین آن‌ها به ۱ حداکثر میزان خود می‌رسد. پروتئین‌های دیگری نیز برای حفظ یکپارچگی ساختار سارکومر وجود دارند که شامل **نبولین**۱، تیتین۲ و میوتایلین۳ می‌باشند. شکل ۱-۱، ماکرو و میکرو ساختار بافت عضلانی را نشان می‌دهد.

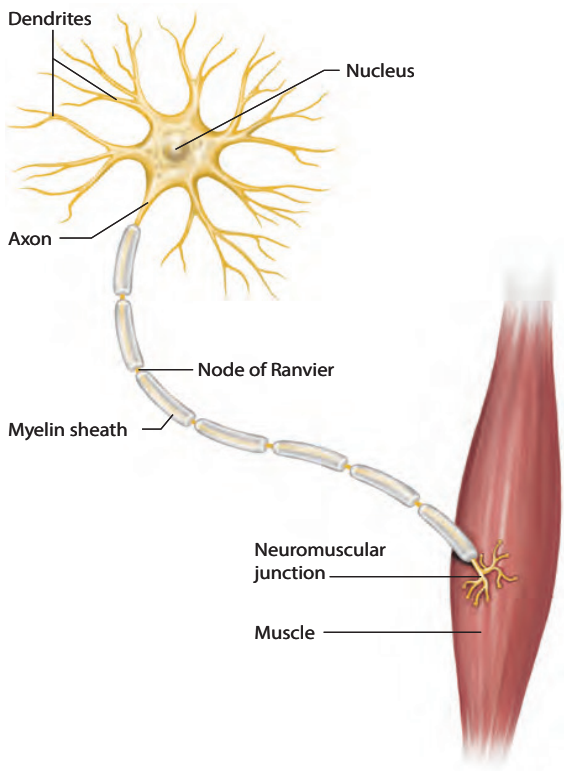


شکل ۱-۱: ماکرو و میکرو ساختار بافت عضلانی

1. Nebulin. یک پروتئین متصل به اکتین و در امتداد آن می‌باشد و به‌نظر می‌رسد یک نقش تنظیمی در تعامل بین اکتین و میوزین ایفا می‌کند (م).
2. Titin از خط میوزین تا خط اکتین امتداد می‌یابد و قسمتی از آن حالتی کشسانی دارد و انتهای این قسمت به خط اکتین متصل است و به این ترتیب در حفظِ انتظام رشته‌های عضلانی ایفاء نقش می‌کند و همچنین به همراه بافت همبند، موجب بازگشت عضله به طول معمول خود در حالتِ عادی می‌شود (م)
3. Myotilin :
قرار دارد (م)Z. یک پروتئین ۵۵/۳ کیلودالتونی است که از ٤٩٦ اسیدآمینه تشکیل شده است، به عنوان آلفاکتینین نیز تعریف شده است و روی خط

● واحد حرکتی

عضلات توسط سیستم عصبی، عصب‌دهی می‌شوند. سلول‌های ویژه عصبی مرتبط با عضلات، نورون‌های حرکتی[1] نامیده می‌شوند. هر نورون حرکتی، از سه قسمت تشکیل شده است که عبارتند از: جسم سلولی، اکسون و دندریت. هنگامی‌که فرد تصمیم به انجام حرکتی می‌گیرد، اکسون، تکانه‌های عصبی (پیام‌های عصبی) را از جسم سلولی به عضلات هدایت می‌کند که در نهایت منجر به انقباض عضلانی می‌شود. به مجموعه یک نورون حرکتی و تمامی تارهای عضلانی که توسط این نورون عصب‌رسانی شده‌اند، واحد حرکتی[2] می‌گویند (به شکل ۱-۲ مراجعه شود). هنگامی‌که یک واحد حرکتی تحریک می‌شود، تمامی تارهای عضلانی آن واحد حرکتی، به‌طور هم‌زمان فعال می‌شوند.



شکل ۲-۱: واحد حرکتی

● تئوری لغزش فیلامنت

به‌طورکلی، پذیرفته شده است که تئوری لغزش فیلامنت[3]، باعث ایجاد حرکت می‌شود. این تئوری را هاکسلی[4] در اوایل دهه پنجاه میلادی مطرح کرد [۳۲۹]. هنگامی‌که نیاز به اعمال نیرو می‌باشد، یک پتانسیل عمل به انتهای آکسون‌های

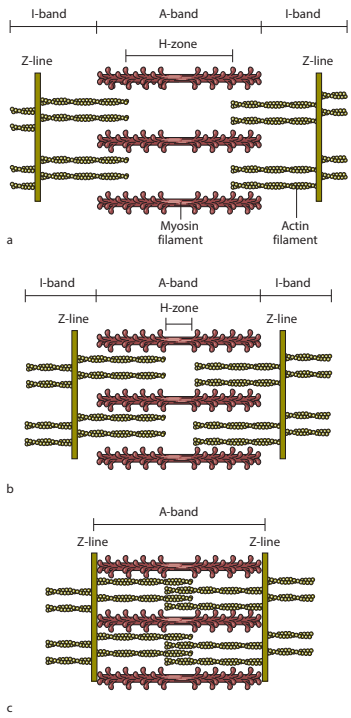
1. Motor neurons. تارهای عضلات اسکلتی را عصب‌رسانی می‌کند (م).
2. Motor unit کوچکترین واحد عملکردی عصبی-عضلانی در فرآیند انقباض عضلات اسکلتی است. هر واحد حرکتی، از یک نورون حرکتی آلفا، آکسون آن و همچنین تمامی تارهای عضله اسکلتی که توسط این نورون عصب دهی می‌شوند، تشکیل می‌گردد (م).
3. Sliding filament theory
4. Huxley

سلول عصبی یعنی محل اتصال عصب – عضله می‌رسد. این موضوع، باعث می‌شود میانجی عصبی استیل کولین، از انتهای عصب (نورون) در شکاف بین عصب و عضله آزاد شود. این محل اتصال را، سیناپس می‌نامند. در نهایت، استیل کولین به قسمت پلاسمولمای[1] تار عضلانی متصل می‌شود که باعث دپولاریزه شدن سلول عضلانی می‌گردد. این پدیده، باعث انتشار کلسیم از شبکه سارکوپلاسمی به درون سلول می‌شود. کلسیم به تروپونین متصل می‌شود و باعث جابجایی تروپومیوزین از روی نقاط اتصالی اکتین و آشکار شدن این نقاط برای اتصال به میوزین می‌گردد. این موضوع، به نوبه خود شرایط لازم جهت اتصال اکتین به میوزین را فراهم می‌کند و اگر ATP به میزان کافی وجود داشته باشد، انقباض عضلانی رخ می‌دهد. سرهای الیاف میوزین، به نقاط فعال ظاهر شده اکتین متصل می‌شوند و الیاف نازک اکتین را به سمت الیاف میوزین سوق می‌دهند (ضربه پرتوان). بعد از جدا شدن اتصال بین اکتین و میوزین، مجدداً برای شروع مجدد چرخه، سرهای الیاف میوزین به نقاط فعال بعدی الیاف اکتین متصل می‌شوند. کشیدن و آزاد شدن پیاپی اتصال بین اکتین و میوزین، چرخه پل عرضی نامیده می‌شود. در نهایت، تکرار ضربه پرتوان باعث کوتاه شدن طول سارکومر و در نتیجه عضله می‌شود (به شکل ۱-۳ مراجعه شود).

● انواع تارهای عضلانی

تارهای عضلانی دارای دو نوع اصلی، کند انقباض (نوع I) و تند انقباض (نوع II) می‌باشند. تارهای کند انقباض، در برابر خستگی مقاوم می‌باشند. همچنین، برای فعالیت‌های استقامتی مناسب هستند و در این فعالیت‌ها به کار گرفته می‌شوند. بااین‌حال، در این نوع از تارها، زمان لازم برای اوج تنش، در حدود ۱۱۰ میلی‌ثانیه می‌باشد. در نتیجه، توانایی آن‌ها برای تولید نیروی سریع و حداکثر، محدود است. تارهای نوع II که به‌عنوان تارهای تند انقباض شناخته می‌شوند، با تارهای نوع I همکاری می‌کنند. آن‌ها، در کمتر از نیمی از زمان لازم برای انقباض تارهای نوع I، به حداکثر اوج تنش خود می‌رسند؛ یعنی در حدود ۵۰ میلی‌ثانیه. در نتیجه، برای تولید حداکثر قدرت و توان مناسب می‌باشند. بااین‌حال، آن‌ها به‌سرعت خسته می‌شوند و ظرفیت آن‌ها جهت انجام فعالیت‌های استقامتی محدود می‌باشد. در زیر میکروسکوپ الکترونی، تارهای تند انقباض به‌صورت سفید مشاهده می‌شوند درحالی‌که تارهای کند انقباض، قرمز رنگ به نظر می‌رسند که می‌توان اختلاف تراکم مویرگی و میوگلوبین را عامل این تغییر رنگ دانست. میزان میوگلوبین و تراکم مویرگی بیشتر در تارهای کند انقباض در مقایسه با تارهای تند انقباض، باعث می‌شود که تارهای کند انقباض، ظرفیت اکسایشی بالاتری داشته باشند. جدول ۱-۱، ویژگی‌های انواع تارهای عضلانی را به‌صورت خلاصه ارائه می‌دهد.

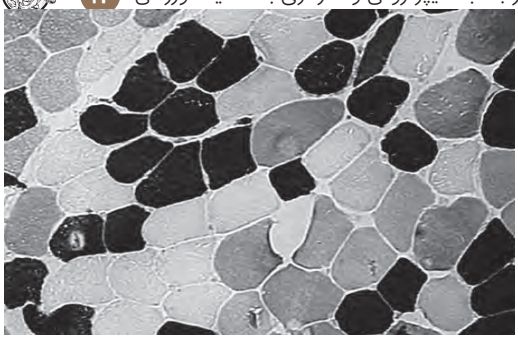
1. Plasmolemma غشای پلاسمایی تارهای عضلانی است (م).



شکل۳-۱: روند انقباض یک تارچه. (a) در عضله‌ی کشیده شده، نوار I و منطقه H عریض‌تر می‌شود. در این حالت، به علت کاهش آرایش اکتین - پل‌های عرضی، سارکومر توانایی تولید نیروی کمی دارد. (b) طی انقباض عضلانی (در اینجا-تا حدودی) نوار I و منطقه H کوتاه‌تر می‌شود. به دلیل آرایش مطلوب پل‌های عرضی اکتین، نیروی تولیدی افزایش پیدا می‌کند. (C) هنگامی‌که عضله منقبض شده است، توانایی تولید نیروی آن کاهش می‌یابد زیرا به‌طور بالقوه هم‌پوشانی اکتین برای آرایش پل‌های عرضی–اکتین کاهش می‌یابد.

جدول۴-۱: ویژگی انواع تارهای عضلانی

ویژگی‌ها	نوع I	نوع IIa	نوع IIx
اندازه نورون حرکتی	کوچک	متوسط	بزرگ
سرعت انقباض	کند	تقریباً سریع	سریع
نیروی تولیدی	کم	متوسط	زیاد
مقاومت در برابر خستگی	زیاد	متوسط	کم
تراکم میتوکندری	زیاد	متوسط	کم
ظرفیت اکسایشی	زیاد	زیاد	کم
ظرفیت گلیکولتیک	کم	زیاد	زیاد
تراکم مویرگی	زیاد	متوسط	کم
میزان میوگلوبین	زیاد	متوسط	کم
ذخیره گلیکوژن	کم	زیاد	زیاد
ذخیره تری‌گلیسرید	زیاد	متوسط	کم



شکل ۴-۱: با کمک رنگ نگاری، تارهای عضلانی نوع I (سیاه)، نوع IIa (سفید) و نوع IIx(خاکستری) نشان داده شده است.

عمدتاً تمایز انواع تارهای عضلانی، بر اساس بیان ایزوفرم زنجیره سنگین میوزین می‌باشد که به انواع I، IIa و IIx تقسیم می‌شود [۷۸٤]. چندین شکل مشابه دیگر (که به نام ایزوفرم می‌شناسیم) با روش رنگ‌آمیزی شناسایی شده‌اند که شامل Ic،IIc IIac، IIax، می‌باشند (به شکل ۱-٤ مراجعه شود). از دیدگاه علمی، ایزوفرم C، تقریباً ۵% از عضلات انسان را شامل می‌شود و در نتیجه کمترین اثر را در اندازه سطح مقطع تارهای عضلانی دارد.

به‌طور متوسط، عضلات انسان دارای مقادیر مساوی از تارهای I و II می‌باشند. بااین‌حال، به دلیل تفاوت‌های فردی، نسبت تارهای عضلانی در بین افراد مختلف، متفاوت می‌باشد. بررسی عضله چهار سر ران دوندگان سرعتی نخبه، سرعت نشان می‌دهد که میزان تارهای نوع II بیشتر از نوع I می‌باشد درحالی‌که، عضله چهارسر ران ورزشکاران نخبه استقامتی، عمدتاً از تارهای عضلانی نوع I تشکیل شده است. علاوه بر این، هر عضله دارای درصد بالاتری از یک نوع تار عضلانی می‌باشد. به‌عنوان‌مثال، عضله نعلی (استقامت محور) ورزشکاران استقامتی به‌طور متوسط شامل ۸۰٪ از تارهای نوع I می‌باشد و عضله سه سر بازویی (قدرت محور) به‌طور متوسط شامل ٦۰٪ از تارهای عضلانی نوع II می‌باشد [۱٦۷]. بسیاری از کارشناسان اعتقاد دارند که تارهای نوع II ذاتاً بزرگ‌تر از نوع I می‌باشند. بااین‌حال، شواهدی وجود دارد که نشان می‌دهد در زنان، غالباً سطح مقطع عرضی تارهای نوع I نسبت به تارهای نوع II بزرگ‌تر می‌باشد [۷۸٤]. نتایج تحقیقات نشان می‌دهد در ارتباط با اندازه عضله، ویژگی ظرفیت اکسیداتیو تارهای عضلانی مؤثرتر از نوع تار می‌باشد. به‌طور خاص، سطح مقطع تارهای گلیکولتیک عضلانی IIx به‌طور قابل‌توجهی بزرگ‌تر از تارهای اکسیداتیو نوع I می‌باشد. برخی از کارشناسان بر این باورند که اندازه کوچک‌تر تارهای عضلانی اکسیداتیو، به علت سازگاری در روند تکامل است و فرض بر این می‌باشد که این تارها هم‌زمان باید دارای محدودیت در هایپرتروفی و نیز افزایش ظرفیت اکسیداتیو باشند [۷۸٤]. این فرضیه با رقابت موجود بین میزان نوسازی پروتئین‌های ساختاری عضلات (الیاف انقباضی) و عوامل دخیل در متابولیسم (به‌عنوان‌مثال پروتئین‌های میتوکندریایی) مطابقت دارد که به نظر می‌رسد به‌واسطه فعل‌وانفعالات موجود در مسیرهای انتقال پیام‌رسانی سلولی که در هر دو شرایط تجزیه و ساخت پروتئین عضلات درگیر هستند صورت می‌پذیرد[۷۸٤].

فرضیه دیگر، بیان می‌کند تارهای نوع II در درجه اول مسئول هایپرتروفی در پاسخ به فعالیت ورزشی می‌باشند. نتایج مطالعات نشان می‌دهد اساس این هایپرتروفی، خاصیت ذاتی تارهای نوع II نسبت به تارهای نوع I در پاسخ به تمرینات مقاومتی می‌باشد [۱، ۱۱۹، ۱۳۱، ۳۸۲، ٦۷۰، ۷۲۳]. به طور کلی نتایج مطالعات نشان می‌دهد ظرفیت هایپرتروفی تارهای نوع II، در حدود ۵۰٪ بیشتر از تارهای نوع I می‌باشد [۱۲]. با این حال، در سازگاری‌های هایپرتروفیک انواع تارهای عضلانی، تفاوت‌های بین‌فردی مشاهده شده است [۳۸۲]. همچنین شواهدی وجود دارد که نشان می‌دهد میزان ساخت پروتئین عضلات در انسان، در درجه اول به سرعت انقباض عضله بستگی دارد. عضله پهن جانبی پا (۵۰٪ تا ٦۰٪ تارهای عضلانی نوع II) در مقایسه با تارهای کند انقباض عضله نعلی (۸۰٪ تارهای عضلانی نوع I) در پاسخ به فعالیت شدید مقاومتی، میزان رشد بیشتری را نشان می‌دهد [۷۷۵]. نکته بسیار مهم- هنگام تلاش برای تعمیم چنین یافته‌ای- این است که در مطالعات صورت گرفته، معمولا از

وزنه‌های سنگین استفاده شده است و این موضوع، به‌صورت بالقوه‌ای نتایج مطالعات را به نفع تارهای تند انقباض سوق می‌دهد؛ بنابراین احتمال دارد که ظرفیت فوق‌العاده هایپرتروفی تارهای عضلانی نوع II، تابعی از نوع پروتکل تمرینی باشد تا خاصیت ذاتی تار عضلانی [۵۴۸]. مفاهیم کاربردی این موضوع، در فصل‌های بعد توضیح داده شده است.

● پاسخ‌ها و سازگاری‌ها

تمرینات مقاومتی، باعث می‌شود تا ترکیبی از پاسخ‌ها و سازگاری‌های عضلانی و عصبی تحریک شود. در تحقیقی مشخص گردید که در پاسخ به یک جلسه تمرین مقاومتی، افزایش در میزان ساخت پروتئین مشاهده می‌شود اما تغییری در اندازه توده عضلانی بعد از چند هفته فعالیت ورزشی مداوم مشاهده نمی‌شود [۶۸۳]. به‌طورکلی، افزایش میزان پروتئین عضلانی و یا هایپرتروفی عضلانی (معمولاً به‌عنوان رشد توده عضلانی شناخته می‌شود) چند ماه به طول می‌انجامد تا قابل مشاهده شود [۵۰۹]. افزایش قدرت در مراحل اولیه تمرین، در درجه اول به بهبود سیستم عصبی نسبت داده می‌شود [۵۰۹، ۵۸۵، ۶۴۰]. برای اطلاعات بیشتر، به مباحث اصول یادگیری حرکتی مراجعه کنید. طی مراحل اولیه تمرین، بدن سعی در رسیدن به الگوی حرکتی مناسب (سازگاری) برای عملکرد بهینه فعالیت ورزشی دارد. برنامه تمرینی مرتبط با فعالیت ورزشی مورد نظر، باید انجام شود تا هماهنگی لازم برای اجرای بهینه حرکات ورزشی رخ دهد. در نهایت این موضوع، باعث ایجاد حرکات زنجیروار و الگوی حرکتی کارآمدتر و در نتیجه باعث تولید نیروی بیشتری در اجرای حرکات می‌شود.

نکته کلیدی

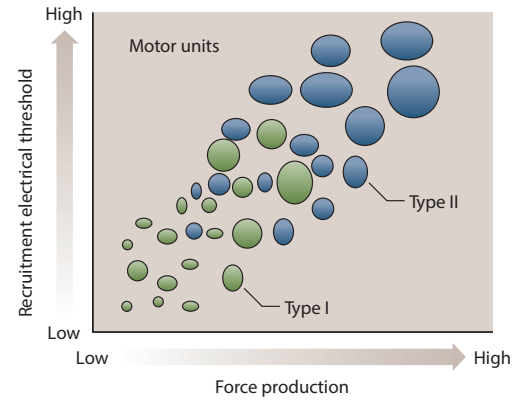
در مراحل اولیه تمرین، سازگاری به تمرینات مقاومتی در درجه اول ناشی از بهبود سیستم عصبی، فراخوانی واحدهای حرکتی بیشتر، افزایش در تعداد تواتر انقباضی و افزایش هماهنگی بین عضلات فعال می‌باشد.

● محرک عصبی

در ارتباط با افزایش قدرت، چندین سازگاری عصبی در پاسخ به تمرینات مقاومتی مطرح شده است. مهم‌ترین سازگاری ایجاد شده، مربوط به محرک عصبی می‌باشد. نتایج تحقیقات نشان می‌دهد عضلات انسان، توانایی تولید نیروی زیادی را به‌صورت ارادی دارند [۱۸۷]. گزارش‌ها بیان می‌کنند انجام تمرینات مقاومتی منظم و پیاپی، این توانایی عضلات را بهبود می‌بخشند. نتایج مطالعات مختلف نشان می‌دهد پس از یک دوره تمرینات مقاومتی منظم، دامنه الکتروکاردیومیوگراف سطحی (EMG) افزایش پیدا می‌کند. محققان، این موضوع را ناشی از افزایش محرک مرکزی عضلات تمرین کرده می‌دانند [۲، ۳، ۲۷۶، ۵۱۹]. نتایج تحقیقاتی که در آن‌ها از تکنیک انقباض درون‌گرا استفاده شده است نشان داد هنگامی که افراد انقباضات ارادی انجام می‌دادند، ارائه محرک‌های فرابیشینه جهت انقباض حداکثر به یک عضله باعث می‌شود طی یک آزمون باز شدن زانو با حداکثر قدرت، ۵٪ از عضله چهارسر ران فعال نشود (قبل از شروع دوره تمرینی). پس از ۶ هفته تمرین، ۲٪ افزایش در فعال‌سازی عضلات آزمودنی‌ها مشاهده شد [۳۷۱]. به‌طور مشابه، پوسی[1] و همکاران [۵۹۴] نیز افزایش در فعال‌سازی ارادی عضلات را از ۹۶٪ به ۹۸٪ (بعد از ۳ هفته تمرین بر روی عضلات چهارسر ران) گزارش کردند. این نتایج، همسو با نتایج تحقیقی بود که نشان داد ورزشکاران تمرین کرده می‌توانند طی فعالیت‌های ورزشی با شدت بالا، درصد بیشتری از تارهای عضلانی را فعال کنند.

1. Pucci

● فعال‌سازی عضلات



شکل۵-۱. اصل اندازه هنمن

یافته‌ها در ارتباط با افزایش فعال‌سازی عضلات در پاسخ به تمرین، غالباً به دلیل فراخوانی بیشتر (تعداد تارهای عضلانی درگیر برای انجام حرکت) و افزایش تواتر انقباضی (افزایش در تعداد تواتر واحدهای حرکتی) می‌باشد. این نظریه، کاملاً مورد تائید قرار گرفته است که فراخوانی تارهای عضلانی، از قانون اصل اندازه پیروی می‌کند [۱، ۸۲، ۱٤، ۱٦، ۱۹، ۲۳، ۳۳، ۳٤]. برای اولین بار، هنمن[1] [۳۰۱] قانون اصل اندازه حرکت را مطرح کرد. این قانون بیان می‌کند توانایی واحدهای حرکتی برای تولید نیرو، با اندازه تار عضلانی ارتباط مستقیم دارد (به شکل ۱-۵ مراجعه شود). بر این اساس واحدهای حرکتی کوچک‌تر، دارای آستانه تحریک پایین‌تری هستند و در ابتدا فعال می‌شوند و به دنبال آن، به‌تدریج واحدهای حرکتی بزرگ‌تر و با آستانه تحریکی بالاتر (برای افزایش دامنه نیروی تولیدی) فراخوانی می‌شوند. این الگوی فعال‌سازی منظم، اجازه می‌دهد تا نیروی لازم جهت اجرای فعالیت‌های مختلف به‌صورت متعادل و بهینه تولید شود.

دو عامل اصلی در میزان فراخوانی تارهای عضلانی، عبارتند از: سطح نیروی عضلانی و سرعت افزایش نیرو. تمرین با اضافه بار سنگین، نیازمند تولید نیروی قابل‌توجهی می‌باشد. به همین دلیل جهت تولید حداکثر نیرو، فراخوانی هر دو واحدهای حرکتی یعنی واحدهای حرکتی با آستانه تحریک پایین و واحدهای حرکتی با آستانه تحریک بالا نیاز می‌باشد. اگرچه هدف، بلند کردن وزنه‌های سنگین با سرعت بالا می‌باشد اما در عمل سرعت بلند کردن وزنه‌های سنگین نسبتاً کند می‌باشد. هنگامی‌که سرعت کوتاه شدن عضله تغییری پیدا نکند و شدت تمرینات مقاومتی (میزان بار وزنه) کاهش یابد، به تولید نیروی کمتری توسط عضله نیاز است. به همین دلیل، واحدهای حرکتی کمتری درگیر انقباض عضله می‌شوند. بااین‌حال، هنگامی‌که وزنه‌های سبک را با سرعت زیاد بلند می‌کنیم، احتمالاً طی یک تمرین با شدت ۳۳٪ از یک تکرار بیشینه، بسیاری از واحدهای حرکتی به کار گرفته می‌شوند [۱۹۱]. برای واحدهای حرکتی عضلات کند انقباض مانند عضله نعلی در مقایسه با عضلات تند انقباض مانند عضله جونده (یکی از عضلات اصلی درگیر در جویدن مواد غذایی)، میزان کاهش در آستانه فراخوانی طی انقباضات سریع بیشتر است [۱۹۱]. در فراخوانی واحدهای حرکتی، باید نقش خستگی عضلات نیز در نظر گرفته شود. همچنان که خستگی طی انجام انقباضات عضلانی با وزنه سبک افزایش می‌یابد، به‌تدریج فراخوانی واحدهای حرکتی با آستانه تحریک بالا حتی در سرعت‌های نسبتاً آهسته نیز کاهش می‌یابد [۳۲۱، ۸۳۸، ۸۰۱]. فرض بر این است که در شرایط خستگی، کاهش در میزان فراخوانی واحدهای حرکتی، ناشی از تلاش سیستم عصبی جهت حفظ سطح تولید نیروی لازم برای ادامه فعالیت بدنی طی انقباضات مکرر عضلانی می‌باشد [۱۰۷].

بیشترین میزان فراخوانی واحدهای حرکتی در انقباضات ایستا، در حدود ۸۵٪ یک تکرار بیشینه می‌باشد ولی در طی فعالیت‌های پویا، غالباً این میزان کمتر می‌باشد [۱۹۱]. این موضوع نشان می‌دهد که به‌احتمال‌زیاد بهبود در فراخوانی واحدهای حرکتی، نقش محدودی در سازگاری به تمرینات مرتبط با افزایش قدرت ایفا می‌کند. برای حداکثر هایپرتروفی در پاسخ به تمرینات مقاومتی، توانایی فراخوانی حداکثر تارهای عضلانی موجود در یک گروه از واحدهای حرکتی ضروری می‌باشد. پس از تمامی این موضوعات، سازگاری به روند تحریک تارهای عضلانی، اساس فراخوانی آن‌ها می‌باشد.

1. Henneman

بااین‌حال باید به این نکته توجه داشت که افزایش توده عضلانی به این سادگی نیست که فقط تابع فراخوانی حداکثر تارهای عضلانی باشد. برای مثال، با دوچرخه‌سواری با شدت ۷۵٪ حداکثر اکسیژن مصرفی، می‌توان باعث فراخوانی طیف قابل توجهی از تارهای عضلانی، ازجمله تارهای عضلانی با آستانه تحریک بالا شد [۶۳۸]. اگرچه این مشاهدات بیان می‌کند که دوچرخه‌سواری زیر بیشینه می‌تواند باعث افزایش اندازه تارهای عضلانی شود، اما نتایج برخی از تحقیقات نیز نشان می‌دهد که هایپرتروفی در پاسخ به تمرینات هوازی در درجه اول محدود به تارهای عضلانی نوع I می‌شود [۲۸۷]

افزایش در نیروهای تولیدی درزمانی که فرد بالای ۸۵٪ از حداکثر انقباض ارادی را اجرا می‌کند، می‌تواند به دلیل افزایش نرخ تخلیه واحدهای حرکتی باشد؛ بنابراین افزایش در میزان تواتر انقباض، احتمالاً نوعی سازگاری عصبی می‌باشد. پژوهش‌ها در مورد این موضوع محدود می‌باشد. اما نتایج مطالعه‌ای که توسط کامن و نایت[1] [۳۴۹] انجام شد نشان داد فعالیت ورزشی، میزان تواتر انقباض را بهبود می‌بخشد. ۱۵غیرورزشکار جوان و میان‌سال در تحقیق حداکثر انقباض ارادی در حرکت باز شدن زانو شرکت کردند؛ این تحقیق شامل ٦ هفته تمرین مقاومتی بود که در پایان این پژوهش افراد جوان، افزایش ۱۵ درصدی در نرخ تخلیه و افراد میان‌سال ٤۹٪ افزایش را نشان دادند. به‌طور مشابه ون کاستم[2] و همکاران [۷۸۲] نشان دادند که ۱۲ هفته تمرین مقاومتی دورسی فلکش (بالا آوردن پا و انگشتان به سمت بالا به کمک عضلات جلوی ساق)، تعداد تواتر به‌طور متوسط در عضله ساقی قدامی از ٦۹ به ۹٦ ضربه در ثانیه افزایش یافته است در مقابل پوچی[3] و همکاران [٥۹٤] بعد از ۳ هفته تمرین ایزومتریک عضله چهار سران، افزایش حدود ۳ درصد حداکثر انقباض ارادی را شاهد بودند ولی در میزان تخلیه واحدهای حرکتی تغییری مشاهده نکردند. این تفاوت در یافته‌ها ممکن است به روش انجام آزمون تجزیه و تحلیل آن مربوط باشد.

● هماهنگی واحدهای حرکتی

چندین عامل دیگر، در بهبود سیستم عصبی–عضلانی پس از انجام فعالیت‌های مقاومتی تأثیر دارد. یکی از مهم‌ترین عامل‌ها، فرضیه سازگاری بهبود در هماهنگ‌سازی واحدهای حرکتی می‌باشد که به واسطه آن تخلیه پتانسیل عمل دو یا چند واحد حرکتی به‌صورت هم‌زمان رخ می‌دهد. هماهنگی بیشتر بین واحدهای حرکتی، باعث انقباض قوی‌تر عضلات می‌شود. سملر و نوردستروم[4] [٦۷۹] بررسی میزان هماهنگی واحدهای حرکتی در افراد مختلف را در گروه‌های متفاوتی انجام دادند. این گروه‌ها شامل نوازندگان نخبه (بیشترین میزان هماهنگی)، وزنه‌برداران المپیکی و یک گروه شاهد (کمترین درجه از هماهنگی) بود. بااین‌حال برخی مطالعات به این نتیجه نرسیدند و افزایش در هماهنگی واحدهای حرکتی متعاقب تمرینات مقاومتی و یا در برنامه شبیه‌سازی رایانه‌ای مشاهده نکردند [۸٤٦، ۳٦۳]. هنوز برای محققان مشخص نشده است که آیا هماهنگی بین واحدهای حرکتی، نقش اصلی در سازگاری عصبی–عضلانی ناشی از فعالیت ورزشی ایفا می‌کند یا خیر. اگر چنین باشد به‌نظر می‌رسد میزان تأثیر آن کم می‌باشد.

● انقباض هم‌زمان عضلات مخالف

یکی دیگر از سازگاری‌های عصبی ناشی از فعالیت‌های ورزشی، کاهش در فعالیت انقباض هم‌زمان عضلات مخالف می‌باشد. کاهش در فعالیت عضلات مخالف باعث می‌شود که عضله موافق بتواند نیروی بیشتری را تولید کند. کارولان[5] و همکاران [۱۲٥] گزارش کردند که به‌صورت ویژه پس از یک هفته تمرینات

1. Kamen and Knight
2. Van Cutsem
3. Pucci
4. Semmler and Nordstrom
5. Carolan