

Original Article

The Effect of Combined (Resistance-Aerobic) Training on Mechanical Growth Factor and Sarcomere Growth in the Gastrocnemius and Soleus Muscles of Male Rats During Development

Mohammad Reza Khalili far¹, PhD Candidate; Mohammad Reza Fadaei Chafy^{1*}, PhD; Alireza Elmieh¹, PhD

¹Department of Physical Education and Sports Sciences, Faculty of Humanities, Rasht Branch, Islamic Azad University, Rasht, Iran

Article Information

Article History:

Received: July 31, 2024

Accepted: October 23, 2024

*Corresponding Author:

Mohammad Reza Fadaei Chafy, PhD;
Department of Physical Education
and Sports Sciences, Faculty of
Humanities, Rasht Branch, Islamic
Azad University, Rasht, Iran
Email: mfadaei2000@yahoo.com

Abstract

Introduction: The physiological structure and function of the muscle tissue during childhood are influenced by various factors, in addition to normal growth. This study aimed to investigate the effect of combined resistance-aerobic training on the Mechanical Growth Factor (MGF) and sarcomere growth in the gastrocnemius and soleus muscles of male rats during development.

Methods: In this study, 10 two-week-old male Wistar rats were randomly assigned to a control group or a training group. A combined resistance-aerobic training program was conducted for 6 weeks on alternating days. Forty-eight hours after the final training session, the rats were dissected, and the gastrocnemius and soleus muscles were excised for histological analysis. Then, the muscle tissue was stained with hematoxylin to differentiate cellular components. Sarcomere number and length were measured using light microscopy.

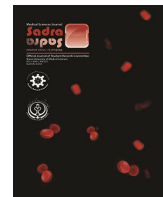
Results: Independent t-tests indicated that MGF in the soleus muscle ($P \leq 0.0028$) and gastrocnemius ($P \leq 0.0001$) were significantly higher in the training group than the control group. Furthermore, both the number and length of sarcomeres in the soleus ($P \leq 0.0016$; $P \leq 0.0010$, respectively) and gastrocnemius ($P \leq 0.0006$; $P \leq 0.0348$, respectively) muscles were significantly greater in the training group.

Conclusion: The results demonstrated that combined resistance-aerobic training induced longitudinal muscle hypertrophy in developing male rats, which was associated with increased MGF in both fast-twitch and slow-twitch muscle tissues. However, the effect of training on increasing the sarcomere length was more pronounced in slow-twitch than the fast-twitch muscle tissue.

Keywords: Resistance Training, Exercise, Hypertrophy, Muscle Protein, Muscle Fibers, Insulin-Like Growth Factor I

Please cite this article as:

Khalili far MR, Fadaei Chafy MR, Elmieh A. The Effect of Combined (Resistance-Aerobic) Training on Mechanical Growth Factor and Sarcomere Growth in the Gastrocnemius and Soleus Muscles of Male Rats During Development. Sadra Med. Sci. J. 2025; 13(4): 891-898. doi: 10.30476/smsj.2025.103554.1558.



مقاله پژوهشی

مقایسه‌ی اثر تمرین ترکیبی (مقاومتی-هوازی) بر عامل مکانیکی رشد عضلانی (MGF) و رشد سارکومرهای عضلات دوقلو و نعلی بچه‌موش‌های نر در دوران رشد

محمد رضا خلیلی فر^۱، محمد رضا فدائی چافی^{۱*}، علیرضا علمیه^۱

^۱گروه تربیت بدنی و علوم ورزشی، دانشکده علوم انسانی، واحد رشت، دانشگاه آزاد اسلامی، رشت، ایران

چکیده

اطلاعات مقاله

تاریخچه مقاله:

تاریخ دریافت: ۱۴۰۳/۰۵/۱۰

تاریخ پذیرش: ۱۴۰۳/۰۷/۱۷

نویسنده مسئول:

محمد رضا فدائی چافی،

گروه تربیت بدنی و علوم ورزشی، دانشکده علوم انسانی،

واحد رشت، دانشگاه آزاد اسلامی، رشت، ایران

پست الکترونیکی: mfadaei2000@yahoo.com

مقدمه: ساختار و عملکرد فیزیولوژیکی بافت عضلانی در دوره‌ی کودکی افزون بر رشد طبیعی، تحت تأثیر عوامل مختلف ازجمله تمرین‌های ورزشی قرار می‌گیرد. هدف از پژوهش حاضر بررسی اثر تمرین ترکیبی مقاومتی-هوازی بر عامل مکانیکی رشد عضلانی (MGF)^۱ و رشد سارکومرهای عضلات دوقلو و نعلی بچه‌موش‌های نر در دوران رشد بود.

مواد و روش‌ها: در مطالعه‌ی حاضر تعداد ده سر موش صحرایی نر ویستار دوهفته‌ای به‌طور تصادفی در دو گروه کنترل و تمرین قرار گرفتند. برنامه‌ی تمرین ترکیبی مقاومتی-هوازی به‌مدت شش هفته در روزهای مجزا انجام شد. ۴۸ ساعت بعد از آخرین جلسه‌ی تمرینی، موش‌ها تشریح شدند و عضلات دوقلو و نعلی جدا و برای انجام آزمایش‌های پاتولوژیکی استفاده شدند. سپس بافت عضلانی به‌کمک هماتوکسیلین به‌منظور متمایزکردن عناصر موجود در آن رنگ‌آمیزی شد. تعداد و طول سارکومرها توسط میکروسکوپ نوری اندازه‌گیری شد.

یافته‌ها: آزمون آماری t مستقل نشان داد که عامل رشد مکانیکی در عضله‌ی نعلی $P \leq 0.0028$ و دوقلو $P \leq 0.0001$ در گروه تمرین دارای مقادیر بالاتری نسبت به گروه کنترل بود. همچنین تعداد و طول سارکومرهای عضله‌ی نعلی به‌ترتیب $(P \leq 0.0016)$ $(P \leq 0.0001)$ و دوقلو $(P \leq 0.0006)$ $(P \leq 0.00348)$ در گروه تمرین دارای مقادیر بالاتری بود.

نتیجه‌گیری: نتایج نشان داد که هایپرتروفی طولی عضلانی در اثر تمرین ترکیبی مقاومتی-هوازی در بچه‌موش‌های نر در دوران رشد افزایش یافت که با افزایش MGF در هر دو نوع بافت عضلانی تندانقباض و کندانقباض همراه بود. با این وجود اثر تمرین بر افزایش طول سارکومرهای بافت عضلانی کندانقباض در مقایسه با تندانقباض بیشتر بود.

کلمات کلیدی: تمرین مقاومتی، تمرین هایپرتروفی، رشد عضلانی، فیبرهای عضلانی، عامل رشد شبه‌انسولینی

1. Mechanical Growth Factor (MGF)

لطفاً این مقاله را به این صورت استناد کنید:

خلیلی فر مر، فدائی چافی مر، علمیه عر. مقایسه‌ی اثر تمرین ترکیبی (مقاومتی-هوازی) بر عامل مکانیکی رشد عضلانی (MGF) و رشد سارکومرهای عضلات دوقلو و نعلی بچه‌موش‌های نر در دوران رشد. مجله علوم پزشکی صدرا. دوره ۱۳، شماره ۴، پاییز و زمستان ۱۴۰۴، ۸۹۱-۸۹۸.

اجرای تمرین هایپرتروفی فیبرهای عضلانی است که با سنتز پروتئین و رشد میوفیبریل ها در این سلول ها همراه است (۵، ۶). با این حال، شدت و حجم معینی از تمرین ها برای هایپرتروفی عضلانی لازم است تا اثر خالص آن از رشد طبیعی در دوران کودکی متمایز گردد. هایپرتروفی عضلانی که در نتیجه ی افزایش بار مکانیکی هنگام ورزش اتفاق می افتد و محققان معتقدند که محرک اصلی هایپرتروفی و متعاقب آن افزایش قدرت عضلانی، فشار مکانیکی است که باعث رهاسازی هورمون ها توسط دستگاه غدد درون ریز می شود که با کنترل تغییرات و پاسخ به آن ها باعث حفظ هومئوستاز بدن می گردد (۷). به هر حال، فعالیت های بدنی بر اساس نوع مقاومتی یا هوازی، شدت، زمان انجام آن ها، تأثیرات متفاوتی بر ترشح هورمون ها می گذارند. تحقیقات نشان داده اند که پاسخ های حاد هورمونی به ورزش و فعالیت بدنی از اهمیت به سزایی برخوردار است؛ زیرا هورمون های آنابولیک از قبیل IGF-1 و MGF سبب افزایش سنتز پروتئین می گردند. اعتقاد بر این است که IGF-1 پپتیدی است که نقش مهمی در تنظیم رشد و تمایز سلولی بازی می کند. نشان داده شد که IGF-1 هم تکثیر و هم ترکیب سلول های ماهواره ای سلول عضلانی را تحریک می کند و تعداد هسته های عضلانی و اندازه ی فیبر عضلانی در بافت را افزایش می دهد. بنابراین اگر IGF-1 پاسخ هایپرتروفی را از طریق فعال سازی سلول های ماهواره ای وساطت کند، عامل رشد مکانیکی MGF گونه ی پیرایش یافته از عامل رشد شبه انسولین (IGF-1) است (۸). عامل رشد مکانیکی MGF در موش IGF-IEB و در انسان IGF-IEC نامیده می شود و باتوجه به فشار مکانیکی بر روی سلول های عضله ی اسکلتی بیان و آزاد می شود. از آنجاکه MGF تنها در عضلات کشش داده شده و در عضله ی سالم بعد از تحریک مکانیکی تشکیل می گردد، عامل رشد مکانیکی نامیده می شود (۹). تحقیقی که توسط هنیمر و همکاران (۲۰۱۱) انجام شد نشان داد که تمرین مقاومتی بیان mRNA MGF را افزایش می دهد (۱۰). در تحقیق دیگر که توسط چارلس (۲۰۰۸) انجام گرفت MGF فقط در نتیجه ی فشار مکانیکی بیان شد که تأییدی بر این موضوع است که mRNA MGF فقط در عضله ی اسکلتی بیان می شود (۱۱). پژمان تقی زاده و همکاران (۲۰۲۰) بیان عوامل رشد در عضله ی چهارسر ران افراد جوان (۳۶-۲۵ سال) و افراد بزرگسال (۷۰-۸۲ سال) را در پاسخ به ورزش مقاومتی با مقاومت زیاد بررسی کردند که ورزش با مقاومت زیاد به افزایش

فیبرهای عضلانی قبل از تولد، از ادغام سلول های پیش ساز عضلانی تشکیل می شوند که به سلول های چند هسته ای طولانی تبدیل می شوند. در واقع آن ها حاصل ادغام شدن میوبلاست ها با یکدیگر هستند، میوبلاست نوعی سلول پیش ساز جنینی است که برای تشکیل سلول های عضلانی تمایز می یابد. در طول دوره های رشد، این سلول های بنیادی ماهیچه ای دستخوش تکثیر و همجوشی گسترده با فیبرهای عضلانی موجود قرار می گیرند و در نتیجه هسته ها را اضافه می کنند و به فیبرهای عضلانی اجازه ی رشد بیشتر را می دهند. رشد سلول های عضلانی زمانی اتفاق می افتد که سنتز پروتئین از تجزیه ی آن ها در عضلات بیشتر شود. پس از تولد، عضلات اسکلتی بیشتر پستانداران در نتیجه ی رشد طولی فیبرهای عضلانی آن ها افزایش می یابد. افزایش فیبرهای عضلانی در مرحله ی رشد پس از تولد، به رشد طولی و عرضی آن بستگی دارد که شامل افزایش طول عضله ی فیبرهای عضلانی (طول سارکومرها)، افزایش قطر فیبرهای عضلانی (هایپرتروفی) و افزایش تعداد فیبرها (هایپرپلازی) می شود (۱).

یکی از ویژگی های عضلات اسکلتی، ساختار سازمان یافته ی فیبرهای آن است که انواع قابلیت های عملکردی را برای این بافت به ارمغان می آورد. همچنین فیبرهای عضلانی قادر به تنظیم خواص فنوتیپی خود در پاسخ به نیازهای عملکردی متفاوت هستند. انواع فیبرهای عضلانی را می توان باتوجه به تفاوت در خواص ساختاری و عملکردی آن ها مشخص کرد که فیبرهای کند و تند انقباض معمول ترین دسته بندی آن ها است، فیبرهای تند انقباض به سرعت منقبض می شوند ولی زودتر دچار خستگی می شوند؛ در صورتی که فیبرهای کند انقباض به آرامی منقبض ولی دیرتر خسته می شوند. توزیع انواع فیبرهای عضلانی تند و کند انقباض در بدن متفاوت است (۲). برخی عضلات مانند عضله ی دوقلو در ناحیه ی خلفی ساق پا که بیشتر از فیبرهای تند انقباض تشکیل شده است؛ در حالی که عضله ی نعلی در بخش خلفی سطحی ساق پا، بیشتر از فیبرهای کند انقباض تشکیل شده است (۳، ۴).

بافت عضلانی در دوره ی کودکی، افزون بر رشد طبیعی، ساختار و عملکرد فیزیولوژیکی آن تحت تأثیر عوامل محیطی از جمله تمرین های ورزشی قرار می گیرد. یکی از مهم ترین سازگاری های فیزیولوژیکی به دنبال

در هر جلسه، سه نوبت و هر نوبت شامل چهار تکرار و بین هر نوبت سی ثانیه استراحت برای حیوانات در نظر گرفته شد. در هفته‌ی اول میزان وزنه‌ی بسته‌شده به دم حیوان ۳۰٪ وزن بدن آن‌ها بود و به تدریج از هفته‌ی دوم ۷۰٪، هفته‌ی سوم ۱۰۰٪، هفته‌ی چهارم ۱۲۰٪ که تا پایان هفته‌ی ششم بدون تغییر باقی ماند (۱۴).

برنامه‌ی تمرین هوازی: در ابتدا حداکثر سرعت موش‌ها از طریق دویدن تا سرحد واماندگی و اندازه‌گیری لاکتات خون به دست آمد (۱۵)، سپس برنامه‌ی تمرین هوازی شامل سه جلسه در هفته در روزهای متناوب بدون تداخل با تمرینات مقاومتی با دویدن بر روی نوار گردان با شدت ۲۵ تا ۵۰ درصد حداکثر سرعت موش به مدت شش هفته شامل سی دقیقه بود که در هفته‌ی اول ۲۵٪ و به تدریج از هفته‌ی دوم ۳۰٪، هفته‌ی سوم ۳۵٪، هفته‌ی چهارم ۴۰٪ و از هفته‌ی پنجم ۵۰٪ تا پایان هفته‌ی ششم بدون تغییر ماند (۱۴).

نمونه‌گیری و آزمایش

در هر گروه وزن در ابتدا و انتهای مطالعه بررسی شد. ۴۸ ساعت بعد از آخرین جلسه‌ی تمرین و بعد از وزن‌کشی موش‌ها با استفاده از گاز CO₂ بی‌هوش شدند و در محیط کاملاً استریل با استفاده از تیغ جراحی و ایجاد برش در عضلات پای آن‌ها، عضله‌ی دوقلو (تندانقباض) و نعلی (کندانقباض) استخراج گردید و بلافاصله در نیتروژن مایع منجمد شد و برای انجام آزمایش‌های پاتولوژیکی استفاده شدند. برای بررسی رشد عضلانی ابتدا بافت مدنظر به وسیله‌ی هماتوکسیلین به منظور متمایز کردن سلول‌ها و اجزاء آن و همچنین عناصر موجود در بافت رنگ‌آمیزی شد و سپس به وسیله‌ی میکروسکوپ نوری اندازه‌گیری شد.

پروسه‌ی بافتی و قالب‌گیری

به منظور نگهداری سلول‌ها و بافت‌ها عمل ثبوت انجام شد. پس از جدا کردن نمونه از بدن موجود زنده بلافاصله به مدت ۲۴-۷۲ ساعت در محلول فرمالین ۱۰٪ قرار گرفت. سپس آگیری با الکل اتیلیک انجام شد. از پارافین برای سخت شدن و آماده‌سازی بافت برای قالب‌گیری و برش بافتی استفاده شد. نمونه‌ها را با استفاده از دستگاه میکروتوم به ضخامت پنج میکرومتر برش زده و بر روی لام سیلان‌شده قرار دادیم.

پروتوکل رنگ‌آمیزی H&E

ابتدا لام‌ها درون فور (Vinte) در دمای نود

معناداری در MGF mRNA آزمودنی‌های جوان و نه در آزمودنی‌های بزرگ‌سال انجامید (۱۲).

اگرچه اثر ورزش بر رشد عضلانی رده‌های سنی مختلف گزارش شده است، با این حال بافت عضلانی قابلیت شگفت‌انگیزی در پاسخ به محرک‌های محیطی مانند ورزش و ایجاد سازگاری در هر دو نوع فیبر ST و FT دارد که در رابطه با تأثیر تمرینات مقاومتی-هوازی بر هایپرتروفی عضلانی به خصوص عضله‌ی نعلی و دوقلو و غلظت MGF در رده‌ی سنی کودک، اطلاعات بسیار محدود است (۶) و فقط چند مطالعه به تأثیر تمرینات مقاومتی یا هوازی در رده‌های سنی کودک بر متغیر مذکور پرداخته است (۱۳). بنابراین باتوجه به نقش عوامل رشد (MGF) در هایپرتروفی عضلانی و سنتز پروتئین، هدف از پژوهش حاضر، بررسی پاسخ عوامل رشد در عضله‌ی اسکلتی به شیوه‌ی تمرینی ترکیبی بود تا احتمالاً اثر توأمان مداخله‌ی ورزش و روند طبیعی نمو بر رشد طولی سلول‌های عضلانی و مقایسه‌ی این آثار بر دو نوع تارهای عضلانی تند و کندانقباض مشخص شود.

مواد و روش‌ها

پژوهش حاضر از نوع تجربی و با رویکرد بنیادی است.

جامعه‌ی آماری

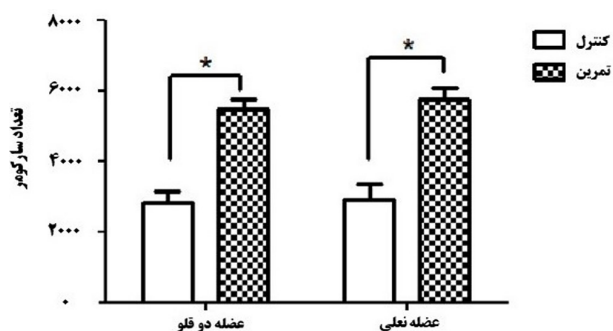
نمونه‌های پژوهش را ده سر موش صحرایی نر نابالغ با سن دو هفته و محدوده‌ی وزنی ۱۰۰-۱۵۰ گرم تشکیل دادند که از مؤسسه‌ی پاستور تهیه و برای انجام پروتکل پژوهش به شرکت دانش‌بنیان بافت و ژن پاسارگاد منتقل شدند.

نمونه‌ها پس از یک هفته سازگاری با محیط جدید به صورت تصادفی در دو گروه کنترل (پنج سر) و تمرین (پنج سر) تقسیم شدند. شرایط نگهداری نمونه‌ها بدین صورت بود که در قفس‌های پلی‌کربنات شفاف در محیطی با دمای 23 ± 2 درجه‌ی سانتی‌گراد، رطوبت ۴۵ تا ۵۵ درصد و چرخه‌ی تاریکی به روشنایی ۱۲:۱۲ ساعته قرار گرفتند. پروتکل تمرینی شامل تمرینات مقاومتی و هوازی بود که برای شش هفته اجرا شد.

روش اجرا

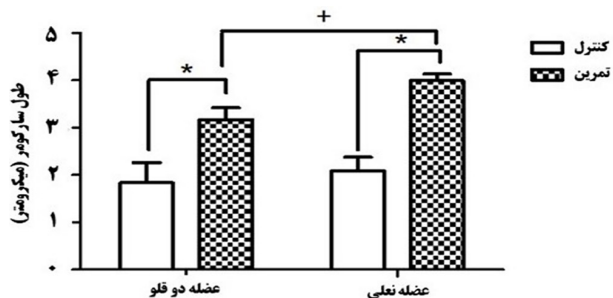
برنامه‌ی تمرین مقاومتی: تمرین مقاومتی شامل بالارفتن از نردبان ۲۶ پله به ارتفاع یک متر و با وزنه‌ی بسته‌شده به دم حیوانات بود که سه جلسه در هفته به صورت یک‌روز در میان به مدت شش هفته اجرا شد.

$P=0/0016$ و دوقلو $P=0/0006$ در گروه تمرین نسبت به گروه کنترل نشان داده شد (شکل ۱).



شکل ۱. * تفاوت معنی دار تعداد سارکومرهای عضله نعلی و دوقلو در دو گروه تمرین و کنترل

براساس آنالیز آماری انجام شده و به دنبال شش هفته تمرین ترکیبی هوازی-مقاومتی مشخص شد که طول سارکومرهای عضله نعلی $P=0/0010$ و دوقلو $P=0/00348$ در گروه تمرین نسبت به گروه کنترل دارای مقادیر بالاتر و معنی دار بود ($P<0/05$) که این روند برای عضله نعلی در مقایسه با عضله دوقلو در گروه تمرین بیشتر بوده است (شکل ۲).



شکل ۲. * تفاوت معنی دار طول سارکومرهای عضله نعلی و دوقلو در دو گروه تمرین و کنترل. + مقایسه معنی دار بین عضله نعلی نسبت به عضله دوقلو در گروه تمرین

تصاویر عضله دوقلو (شکل ۳) در گروه های تمرین و کنترل با بزرگ نمایی بیست میکرومتر، نشان دهنده مقادیر بالاتر تعداد و طول سارکومرها در موش های گروه تمرین در مقایسه با گروه کنترل بود ($P<0/05$). تصاویر عضله نعلی (شکل ۴) در گروه های تمرین و کنترل با بزرگ نمایی بیست میکرومتر، نشان دهنده تعداد بالاتر و افزایش طول سارکومرها در موش های گروه تمرین در مقایسه با گروه کنترل بود ($P<0/05$). براساس آنالیز آماری انجام شده، مشخص شد که مقدار MGF در عضله نعلی و دوقلو در گروه تمرین نسبت به گروه کنترل دارای مقادیر بالاتر و معنی دار بود ($P<0/05$) (شکل ۵).

درجه ی سانتی گراد به مدت بیست دقیقه قرار گرفت تا پارافین های موجود در نمونه ذوب شود. در مرحله ی دوم پارافین زدایی، نمونه ها در داخل زایلول ۲۱ (sigma-1330-20-7) هرکدام به مدت پانزده دقیقه قرار گرفت. برای رنگ کردن، ابتدا آب بافت به آن برگردانده شد و سپس در آب مقطر به مدت یک دقیقه شست و شو داده شد و سپس نمونه ها دو ثانیه داخل کربنات لیتیوم Sigma-1.05680 قرار گرفت و پس از آن سه دقیقه داخل رنگ اتوزین Sigma-HT110116 قرار داده شد و در ادامه به منظور آب گیری بافت، لام ها را به الکل مطلق رسانده و لامل روی لام چسبانده شد و با میکروسکوپ نوری LABOMED عکس برداری انجام شد.

اندازه گیری MGF

از روش الیزا برای اندازه گیری MGF در بافت هر دو نوع عضله، با استفاده از کیت شرکت elabscience ساخت کشور آمریکا با حساسیت ۴۰۰ ng/ml-۶۲/۵ ng/ml استفاده شد.

ملاحظات اخلاقی

طرح پژوهش حاضر در آزمایشگاه مؤسسه ی بافت و ژنتیک پاسارگاد تهران و با نظارت استادان فیزیولوژی و متخصصان آزمایشگاهی و نیز با رعایت کلیه ی اصول اخلاقی انجام شد. همچنین کلیه ی اصول نگهداری و استفاده از حیوانات آزمایشگاهی، مطابق دستورالعمل مؤسسه ملی سلامت (NIH)^۱ رعایت گردید و تمام مراحل آن را کمیته ی اخلاق دانشگاه آزاد اسلامی واحد رشت با کد اخلاق IR.IAU.RASHT. REC.1402.050 تأیید کرد.

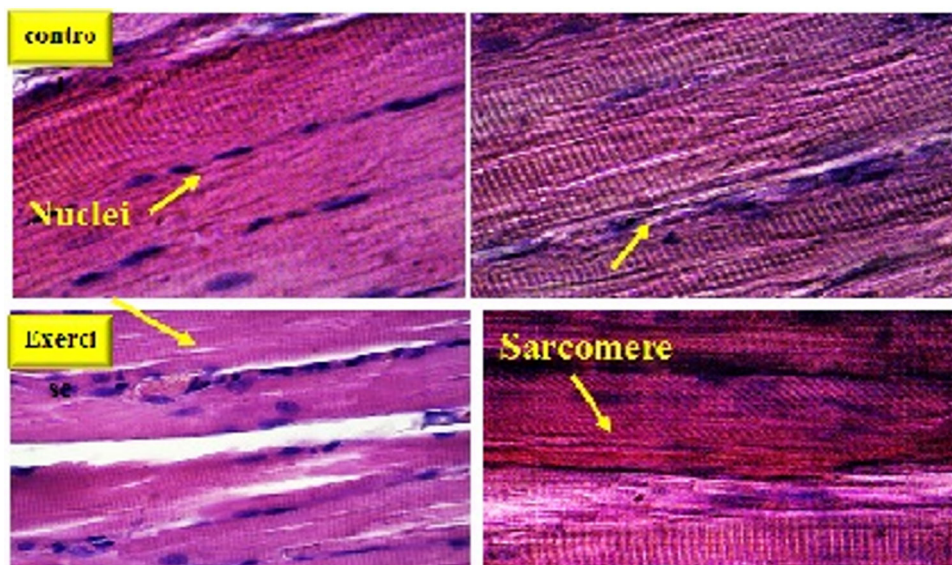
آنالیز آماری

در این تحقیق به منظور بررسی طبیعی بودن توزیع داده ها از آزمون شاپیرو-ویلک^۲ استفاده شد. همچنین برای مقایسه ی بین دو گروه از آزمون آماری t مستقل استفاده شد. تجزیه و تحلیل داده ها با استفاده از نرم افزار PRISM در سطح معنی داری ($P<0/05$) صورت پذیرفت.

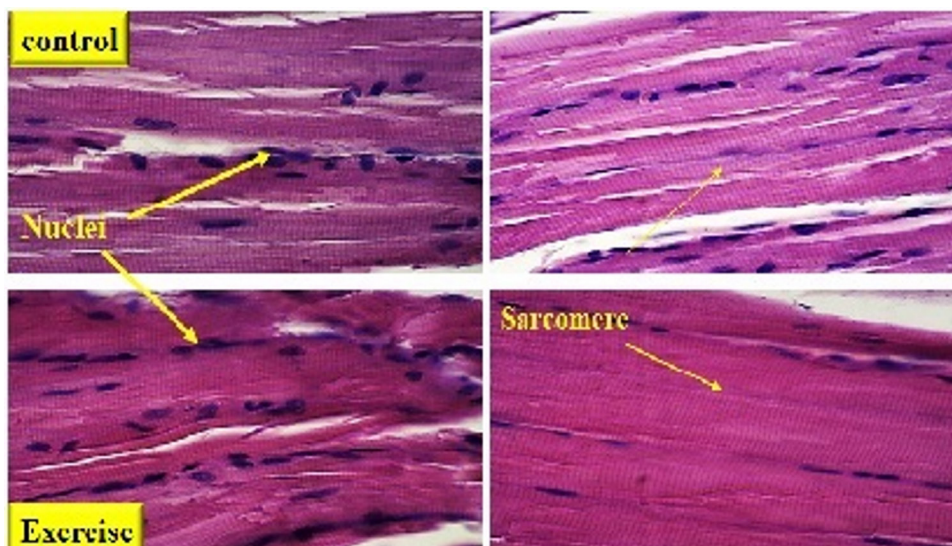
یافته ها

براساس آنالیز آماری انجام شده، مشخص شد به دنبال شش هفته تمرین ترکیبی هوازی-مقاومتی تفاوت معنی داری در تعداد سارکومرهای عضله نعلی

1. National Institutes of Health
2. Shapiro-Wilk

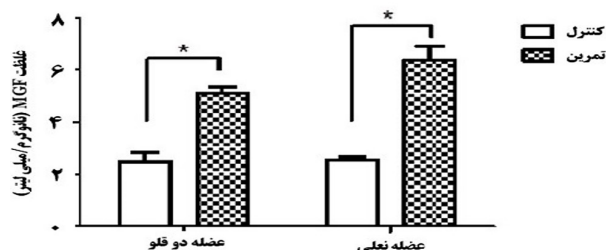


شکل ۳. تصاویر افزایش تعداد و طول سارکومرهای عضله‌ی دوقلو در دو گروه کنترل و تمرین



شکل ۴. تصاویر افزایش تعداد و طول سارکومرهای عضله‌ی نعلی در دو گروه کنترل و تمرین

یکی از تغییرات فیزیولوژیکی که بر اثر فعالیت بدنی اتفاق می‌افتد هایپرتروفی عضلانی است که خود می‌تواند براساس نوع و شدت فعالیت بدنی تحت تأثیر تغییرات هورمونی از نوع آنابولیک باشد که بیشتر در جنس مذکر به‌صورت افزایش در غلظت تستوسترون، IGF-1 و MGF نمایان می‌شود (۸). بااین‌حال در دوره‌ی کودکی افزایش فزاینده‌ی تستسترون برای رشد عضلانی غالب نیست، بلکه محور GH/IGF-1 قبل از جهش رشدی در دوره‌ی نوجوانی، عامل اصلی هایپرتروفی عضلانی است (۱۷-۱۹). پژوهش حاضر نشان داد تمرینات مقاومتی-هوازی باعث افزایش تعداد و اندازه‌ی سارکومرهای عضله‌ی نعلی و دوقلو شده و این هم‌راستا با مطالعاتی است که نشان داده‌اند تمرین مقاومتی باعث هایپرتروفی عضلانی می‌گردد. این یافته هم‌سو با نتایج بسیاری از پژوهش‌های گذشته است؛ مانند



شکل ۵. * تفاوت معنی‌دار MGF در گروه تمرین و کنترل عضله‌ی دوقلو و نعلی

بحث

تارهای عضله‌ی اسکلتی توانایی چشمگیری برای سازگاری در پاسخ به محرک‌ها، اختلال‌های محیطی و شرایط فشارزا دارند (۱۶). در پاسخ به عوامل بالا، عضله‌ی اسکلتی، تعدادی فرایندهای سلولی شامل نوسازی و هایپرتروفی تار عضله را متحمل می‌شود.

اثر تمرین مقاومتی بر عضله‌ی دوسربازویی موش‌های نر ویستار که توسط نتو و همکاران انجام شد (۷) و در تحقیق بیگلری و همکاران اثر تمرین با شدت بالا بر عضله‌ی دوقلوی موش‌های صحرایی نر نشان داده شد (۲۰). همچنین نتایج تحقیق باقرپور و همکاران (۲۰۲۰) نشان داد که تمرین مقاومتی-هوازی بر عضله‌ی نعلی موش‌های صحرایی نر در سنین مختلف به هاپرپلازی سلول‌های عضلانی گروه تمرین در مقایسه با گروه کنترل انجامید. درواقع، بهبود ۱۱۲ درصدی هاپرتروفی در گروه تمرین نسبت به گروه کنترل، حاکی از آن بود که بخش تمرین مقاومتی از طریق افزایش سنتز پروتئین در تارهای عضلانی موجب هاپرتروفی عضلانی شده است (۱۳). از دلایل عمده‌ی هاپرتروفی بافت عضلانی می‌توان به اثر طولی رشد در دوران کودکی اشاره کرد که خود حاصل تغییرات هورمونی ازجمله هورمون‌های آنابولیک مانند رشد، تستسترون، IGF-1 و MGF با منشاء بافت عضلانی است. نتایج تحقیق حاضر نشان داد که MGF عضلانی در هر دو نوع عضله‌ی کند و تندانبضافزایش داشت (۲۱). نتایج تحقیق هینمیر و همکاران موافق با نتایج پژوهش حاضر بود که نشان داد تمرین مقاومتی، بیان mRNA MGF را افزایش می‌دهد (۱۰). همچنین نتایج تحقیق چارلس نشان داد فقط در اثر فشار مکانیکی MGF بیان می‌شود (۱۱). بررسی‌های انجام‌گرفته نشان می‌دهد که روند رشد بافت عضلانی ناشی از هاپرتروفی در دوران کودکی یعنی از وضعیت نابالغ آغاز و در دوران بلوغ به‌خصوص در جنس نر با سرعت بالایی تداوم دارد. اعمال محرک‌هایی چون تمرینات مقاومتی می‌تواند چنین فرایندی را تغییر دهد (۱۷). نتایج مطالعه‌ی نشان داد که اجرای تمرینات ترکیبی می‌تواند بر هاپرتروفی عضله‌ی نعلی موش‌های صحرایی نر نابالغ، بالغ و سالمند مؤثر واقع شود؛ باین‌حال بیشترین تمرین‌پذیری در رده‌های سنی نابالغ و سالمند دیده شد که نشان‌دهنده‌ی پویایی اثر تمرین به‌خصوص در دوران کودکی است یعنی تمرین‌پذیری در این بازه‌ی

سنی بالاتر از دوران جوانی است (۱۳). مقایسه‌ی دو نوع عضله‌ی سولئوس و گاستروکینموس در تحقیق حاضر نشان داد اثر تمرین مقاومتی-هوازی بر طول سارکومرهای عضله‌ی کندانبضافزایش بیشتر از تندانبضافزایش بود که خود حاصل اثربخشی بیشتر تمرین استقامتی بر این عضله بود. هرچند محمدنژاد و همکاران (۲۰۲۰) در پژوهش خود نشان دادند که تمرین مقاومتی موجب تنظیم منفی میوئستاتین در عضلات تند و کندانبضافزایش موش‌های صحرایی نر می‌شود که این تغییر در عضله‌ی تندانبضافزایش نسبت به عضله‌ی کندانبضافزایش بیشتر است (۲۲). درمجموع باتوجه به یافته‌های به‌دست‌آمده می‌توان گفت که تمرین مقاومتی-هوازی می‌تواند باعث رشد عضلانی و هاپرتروفی در دوران کودکی شود.

محدودیت تحقیق

ازجمله محدودیت‌های تحقیق حاضر مقایسه‌نشدن دو نوع تمرین مقاومتی و هوازی به‌صورت مجزا بر فرایند رشد طولی تارهای عضلانی بود. همچنین باتوجه به ماهیت متفاوت نمونه‌ی حیوانی، تعمیم نتایج به نمونه‌ی انسانی ممکن نیست و مطالعات بیشتر در نمونه‌های انسانی ضروری به‌نظر می‌رسد.

نتیجه‌گیری

به‌طور کلی نتایج پژوهش حاضر نشان داد که هاپرتروفی طولی عضلانی در اثر تمرین ترکیبی مقاومتی-هوازی در موش‌های صحرایی نر در دوران رشدافزایش یافت که با افزایش MGF در هر دو نوع بافت عضلانی همراه بود. هرچند اثر تمرین بر افزایش طول سارکومرهای بافت عضلانی کندانبضافزایش بیشتر بود.

تعارض منافع

هیچ‌گونه تعارض منافی وجود ندارد.

منابع

1. Purslow PP. The structure and growth of muscle. In: Lawrie's meat science. Amsterdam: Elsevier; 2023. p. 51-103.
2. Purslow PP. The structure and role of intramuscular connective tissue in muscle function. Front Physiol. 2020;11:495.
3. Hasti Sherizadeh. [Unpublished academic work]. Shiraz: Faculty of Educational Sciences and Psychology, Shiraz University; 2022. Persian.
4. Smith JAB, Murach KA, Dyar KA, Zierath JR. Exercise metabolism and adaptation in skeletal muscle. Nat Rev Mol Cell Biol. 2023;24(9):607-32.

5. Karimi R, Fakhrpour R, Zarneshan A. Effect of resistance training with milk protein concentrate (MPC) supplementation on serum levels of follistatin and myostatin and muscle hypertrophy in beginner bodybuilders. *J Appl Health Stud Sport Physiol*. 2022;9(1):151-63.
6. Castelli F, Valero-Breton M, Hernandez M, Guarda F, Cornejo J, Cabello-Verrugio C, et al. Regulatory mechanisms of muscle mass: the critical role of resistance training in children and adolescent. In: *Cell biology and translational medicine*, volume 19: perspectives in diverse human diseases and their therapeutic options. Cham: Springer; 2022. p. 21-34.
7. Krause Neto W, Silva WA, de Oliveira TVA, Vilas Boas A, Ciená AP, Anaruma CA, et al. Muscle hypertrophy is correlated with load progression delta, climb volume, and total load volume in rodents undergoing different ladder-based resistance training protocols. *Tissue Cell*. 2022;75:101725.
8. Yoshida T, Delafontaine P. Mechanisms of IGF-1-mediated regulation of skeletal muscle hypertrophy and atrophy. *Cells*. 2020;9(9):1970.
9. Kraemer WJ, Ratamess NA, Hymer WC, Nindl BC, Fragala MS. Growth hormone (s), testosterone, insulin-like growth factors, and cortisol: roles and integration for cellular development and growth with exercise. *Front Endocrinol (Lausanne)*. 2020;11:513110.
10. Heinemeier K, Bjerrum S, Schjerling P, Kjaer M. Expression of extracellular matrix components and related growth factors in human tendon and muscle after acute exercise. *Scand J Med Sci Sports*. 2013;23(3):e150-61.
11. Lambert CP, Wright NR, Finck BN, Villareal DT. Exercise but not diet-induced weight loss decreases skeletal muscle inflammatory gene expression in frail obese elderly persons. *J Appl Physiol* (1985). 2008;105(2):473-8.
12. Taghi Beikzadeh Badr P, Shabkhiz F, Shahrbanian S. Expression of PGC-1 alpha isoforms in response to eccentric and concentric resistance training in healthy subjects. *J Sport Biosci*. 2020;11(4):447-62.
13. Bagherpour Tabalvandani MM, Fadaei MR, Elmieh A. The effect of resistance-aerobic training on the growth of muscle fibers, serum testosterone and androgen receptors on soleus muscles, in different ages groups of male rats. *Metab Exerc*. 2020;10(2):1-10.
14. Chafy MRF, Tabalvandani MMB, Elmieh A, Arabzadeh E. Determining the range of aerobic exercise on a treadmill for male Wistar rats at different ages: a pilot study. *J Exerc Organ Cross Talk*. 2022;2(3):96-100.
15. Fadaei Chafy MR, Mohebbi H, Rahmani Nia F, Arabzadeh E. Possible crosstalk between leptin and insulin resistance in sedentary obese boys at different stages of puberty. *J Exerc Organ Cross Talk*. 2021;1(1):15-23.
16. Powers SK, Schrager M. Redox signaling regulates skeletal muscle remodeling in response to exercise and prolonged inactivity. *Redox Biol*. 2022;54:102374.
17. Nematalahi M, Farzaneh HA, Farzanegi P. TGF- β 1 response to eight weeks combined training with different orders in slow and fast twitch muscles in Wistar rats. *Razi J Med Sci*. 2021;28(8):11-20.
18. Tunç BS, Toprak F, Toprak SF, Sozer S. In vitro investigation of growth factors including MGF and IGF-1 in neural stem cell activation, proliferation, and migration. *Brain Res*. 2021;1759:147366.
19. Liu L. Satellite cell activation and signaling pathway response in joint exercise athletes. *Rev Bras Med Esporte*. 2022;28(5):573-6.
20. Biglari S, Afousi AG, Mafi F, Shabkhiz F. High-intensity interval training-induced hypertrophy in gastrocnemius muscle via improved IGF-I/Akt/FoxO and myostatin/Smad signaling pathways in rats. *Physiol Int*. 2020;107(2):220-30.
21. Cornish SM, Bugera EM, Duhamel TA, Peeler JD, Anderson JE. A focused review of myokines as a potential contributor to muscle hypertrophy from resistance-based exercise. *Eur J Appl Physiol*. 2020;120(4):941-59.
22. Mohammadnezhad G, Matin Homayi H, Ghazalian F. Effect of a 6-week resistance training program on transforming growth factor beta-1 and myostatin genes expression in tendons of extensor digitorum longus and soleus muscles in rats. *J Arak Univ Med Sci*. 2020;23(1):82-91.