Journal of Military Medicine
2024, Volume 26, Issue 2
Pages: 2258-2268
10.30491/JMM.2024.1006614.1139

The Effects of Weekly Variations in Resistance Training routine on Muscle Thickness and Strength Adaptations in Young Men

Mehdi Tayebi [1], Mohamad Fashi [1*], Afshar Jafari [1]

[1] *Department of Biological Sciences in Sports, Faculty of Sports Sciences and Health, Shahid Beheshti University, Tehran, Iran*

Received: 20 January 2024 **Accepted:** 20 April 2024

Abstract

Background and Aim: Given the significant relationship between muscle cross-sectional area (CSA) and muscle strength, the primary objective for athletes involved in resistance training is to enhance muscle mass and strength. Proper manipulation of training variables such as intensity, volume, frequency, exercise selection, rest interval, and tempo are essential for maximizing exercise-induced muscle hypertrophy. The present study examined the effects of weekly variations in resistance training on muscle thickness (MT) and strength adaptations in young men.

Methods: This research included 30 participants (age: 21.37 ± 1.37 years, height: 174.48 ± 3.34 cm, weight: 72.13 ± 3.45 kg). They were randomly assigned into varying training groups whose training routine changed every week (VAR) or traditional training groups that did not change (TRAD) for ten weeks. For the VAR group training weeks were labeled as adaptation, metabolic stress, mechanical tension, muscle damage, and de-load week 2 cycles of this change occurred through the training intervention for them, but the TRAD group training routine did not change through the study.

Results: Both the TRAD and VAR groups showed significant increases in the MT of the biceps brachii muscle (BB) (VAR: $P = 0.001$; TRAD: $P = 0.007$), significant differences were observed between groups ($P = 0.012$). Vastus lateralis (VL) MT increased significantly in both groups ($P = 0.001$), no significant difference was observed between the two groups ($P>0.05$). Among the groups, lean body mass (LBM) increased significantly ($P = 0.001$), TRAD group showed a significant decrease in body fat ($P = 0.49$), there was no significant change in BMI of both groups ($P>0.05$). Both groups showed significant increase in bench press and back squat 1-RM strength test ($P = 0.001$). Back squat showed a trivial non-significant difference between the groups ($P = 0.072$).

Conclusion: The results showed that changing resistance training methods weekly was more effective than traditional resistance training for biceps hypertrophy. Nevertheless, the effects of VAR and TRAD exercises are similar in the case of the latissimus dorsi muscle.

Keywords: Resistance Training, Muscle Hypertrophy, Mechanical Tension, Metabolic Stress, Muscle Damage.

*Corresponding author: **Mohamad Fashi,** Email: m_fashi@sbu.ac.ir

مجله طب نظامی
دوره ۲۶، شماره ۲، خرداد و تیر ۱۴۰۳
صفحات: ۲۲۶۸-۲۲۵۸
10.30491/JMM.2024.1006614.1139

تأثیر تغییرات هفتگی روش تمرین مقاومتی بر ضخامت و قدرت عضلانی در مردان جوان

مهدی طیبی[۱]، محمد فشی[۱*]، افشار جعفری[۱]

[۱] گروه علوم زیستی و ورزش، دانشکده علوم ورزشی و تندرستی، دانشگاه شهید بهشتی، تهران، ایران

چکیده

زمینه و هدف: با توجه به رابطه معنی‌دار بین سطح مقطع عضلانی (CSA) و قدرت عضلانی، هدف اصلی ورزشکاران درگیر در تمرینات مقاومتی، افزایش حجم و قدرت عضلانی است. دستکاری مناسب متغیرهای تمرینی مانند شدت، حجم، فرکانس، انتخاب تمرین، فاصله استراحت و سرعت برای به حداکثر رساندن هایپرتروفی عضلانی ناشی از تمرین ضروری است. مطالعه حاضر به بررسی تأثیر تغییرات هفتگی تمرین مقاومتی بر ضخامت عضله و سازگاری قدرتی در مردان جوان پرداخت.

روش‌ها: تعداد ۳۰ مرد جوان (سن: ۱/۳۷ ± ۲۱/۳۷ سال، قد: ۳/۳۴ ± ۱۷۴/۴۸ سانتی‌متر، وزن: ۳/۴۵ ± ۷۲/۱۳ کیلوگرم) به طور تصادفی به گروه‌های تغییر شیوه تمرینی (VAR) یا گروه تمرین سنتی (TRAD) تقسیم شدند. هفته‌های تمرین گروه VAR شامل انطباق، استرس متابولیک، تنش مکانیکی، آسیب عضلانی و هفته بدون بار تمرینی بود که ۲ چرخه از این تغییرات از طریق مداخله تمرینی برای آن‌ها رخ داد، اما روال تمرینی گروه TRAD در طول دوره تغییر نکرد.

یافته‌ها: هر دو گروه TRAD (P = ۰/۰۰۱) و VAR (P = ۰/۰۰۷) افزایش قابل توجهی در ضخامت عضله دوسر بازویی (BB) نشان دادند، اما تفاوت معنی‌داری بین دو گروه مشاهده شد (P = ۰/۰۱۲). ضخامت عضله پهن خارجی (VL) در هر دو گروه به طور معنی‌داری افزایش یافت (P = ۰/۰۰۱) اما تفاوت معنی‌داری بین دو گروه مشاهده نشد (P>۰/۰۵). در بین گروه‌ها، توده بدون چربی بدن (LBM) به طور معنی‌داری افزایش (P = ۰/۰۰۱) و درصد چربی بدن TRAD (P = ۰/۰۲۴) و VAR (P = ۰/۰۴۹) کاهش یافت اما تفاوت معنی‌داری در شاخص توده بدنی مشاهده نشد (P>۰/۰۵). هر دو گروه در آزمون قدرت پرس سینه و اسکات پشت (1-RM) افزایش معنی‌داری نشان دادند (P = ۰/۰۰۱).

نتیجه‌گیری: نتایج نشان داد که تغییر شیوه‌های تمرین مقاومتی به صورت هفتگی برای هایپرتروفی عضله دوسربازویی مؤثرتر از تمرین مقاومتی سنتی است. با این وجود در مورد عضله پهن خارجی اثر تمرینات VAR و TRAD مشابه می‌باشد.

کلیدواژه‌ها: تمرین مقاومتی، هایپرتروفی عضلانی، تنش مکانیکی، استرس متابولیک، آسیب عضلانی.

*نویسنده مسئول: **محمد فشی.** پست الکترونیک: m_fashi@sbu.ac.ir
دریافت مقاله: ۱۴۰۲/۱۰/۳۰ پذیرش مقاله: ۱۴۰۳/۰۲/۰۱

مقدمه

تمرین مقاومتی شامل بلند کردن وزنه یا انجام تمرینات با وزن بدن برای رشد عضلانی، افزایش قدرت و بهبود سطح تناسب اندام است (۱). با توجه به رابطه معنی‌دار بین سطح مقطع عضلانی (CSA) و قدرت عضلانی (۲)، هدف اولیه برای ورزشکارانی که تمرینات مقاومتی انجام می‌دهند، افزایش توده عضلانی یا هایپرتروفی است. دستکاری مناسب متغیرهای تمرین مانند شدت، حجم، فرکانس انتخاب تمرین، فاصله استراحت و سرعت برای به حداکثر رساندن رشد عضلانی ناشی از تمرین مقاومتی ضروری است (۳). سه عامل اصلی مسئول شروع پاسخ هایپرتروفیک به ورزش مقاومتی هستند: تنش مکانیکی، آسیب عضلانی و استرس متابولیک (۴). شاید تنش مکانیکی مهمترین عامل برای رشد عضلات با تمرینات مقاومتی باشد و بر اساس گایدلاین‌های تمرینی استفاده از شدت تمرین بالا (بیشتر از ۷۰٪ یک تکرار بیشینه) باعث ایجاد تنش مکانیکی به اندازه‌ای می‌شود که پاسخ‌های رشدی را در بر دارد که با تمرینات با شدت پایین‌تر همچنین نتیجه‌ای نخواهد داشت، اما مطالعات دیگر نشان می‌دهند که دو عامل استرس متابولیکی و آسیب عضلانی نیز به همراه تنش کمتر می‌توانند پاسخ‌های آنابولیکی را برای عضلات فراهم آورند (۳). رشد عضلانی مستلزم تنش‌های مکانیکی ناشی از تولید نیرو و کشش است. به نظر می‌رسد که ترکیب این دو محرک اثر قابل توجهی ایجاد کند (۵). تنش مرتبط با تمرین مقاومتی ممکن است یکپارچگی عضلات اسکلتی را بر هم زند و باعث ایجاد پاسخ‌های جبرانی مولکولی و سلولی شیمیایی شود (۶). در حالی که تنش مکانیکی در رشد عضلات نقش ایفا می‌کند، بعید است که تنها عامل هایپرتروفی عضلانی ناشی از ورزش باشد (۷). البته برخی پروتکل‌های تمرین مقاومتی که تنش بالایی دارند می‌توانند عمدتاً سازگاری عصبی را بدون ایجاد هایپرتروفی ایجاد کنند (۸). مطالعات نشان داده‌اند که استرس متابولیک ناشی از تمرین مقاومتی آنابولیک هستند (۹،۱۰) و تجمع متابولیت‌ها ممکن است در بهینه‌سازی هایپرتروفی نسبت به رشد عضله با تنش و نیروی بالا حیاتی‌تر باشد (۱۱). اگرچه استرس متابولیک لزوماً برای رشد عضلانی حیاتی نیست (۱۲) اما شواهد فزاینده نشان می‌دهد که این عامل می‌تواند به طور قابل توجهی به هایپرتروفی عضلانی کمک کند، چه به طور مستقیم و چه غیرمستقیم (۱۳). آسیب جزیی تارهای عضلانی ممکن است تنها بر تعداد کمی از ماکرومولکول‌های بافت تأثیر بگذارد، یا ممکن است منجر به پارگی‌های بزرگ در سارکولما، لایه بازال و بافت همبند پشتیبان شود و به عناصر انقباضی و اسکلت سلولی آسیب برساند (۱۴،۱۵). دستیابی به این عوامل با بهینه سازی متغیرهای تمرین مقاومتی و با ترکیب آن متغیرها امکان‌پذیر است. ترکیبی از تنش مکانیکی، استرس متابولیک و آسیب عضلانی ممکن است به طور قابل توجهی بر هایپرتروفی عضلانی تأثیر بگذارد، زیرا هر عامل هایپرتروفی به تنهایی بی اثر است. این تئوری پیشنهاد می‌کند که سازگاری‌های تقویت‌شده می‌تواند با درگیر کردن واحدهای حرکتی بیشتر، افزایش مشارکت در گلیکولیز بی‌هوازی و تولید متابولیت‌هایی مانند لاکتات، یون هیدروژن و فسفات معدنی قابل دست‌یابی باشد. این فرآیند همچنین شامل فعال شدن سلول‌های ماهواره‌ای است. با توجه به مطالعات ضد و نقیض در این خصوص و این سوال که آیا راهی وجود دارد که از هر ۳ عامل تنش مکانیکی و استرس متابولیکی و آسیب عضلانی به طور مجزا و با تاکید بیشتر در یک برنامه تمرینی استفاده کرد که از تمرین سنتی سازگاری بهتری داشته باشد، این مطالعه با هدف بررسی تأثیر تغییرات هفتگی روش تمرین مقاومتی بر ضخامت عضلانی و قدرت انجام شد.

روش‌ها

۴۰ دانشجوی پسر جوان، سالم و فعال از دانشگاه شهید بهشتی تهران برای مطالعه انتخاب شدند. حجم نمونه با استفاده از نرم‌افزار GPower (نسخه ۳.۱.۹.۷ از آلمان، دوسلدورف) تعیین شد. تجزیه و تحلیل بر اساس اندازه اثر ۰/۸۰ برای ضخامت عضلانی واستوس لترالیس، سطح آلفا ۰/۰۵، و توان ۰/۸۰ (1-β)، مطابق با یافته‌های Varović و همکاران بود. (۲۰). حجم نمونه مورد نیاز برای دستیابی به توان آماری کافی محاسبه شد. معیار های ورود برای انجام مطالعه نداشتن تمرین مقاومتی در ۶ ماه گذشته، نداشتن آسیب عضلانی و مفصلی، عدم مصرف دخانیات و مکمل ورزشی، عدم مصرف استروییدهای آنابولیکی بودند. پس از یک جلسه اولیه که در آن اطلاعات و توضیحات ارائه شد، ۱۰ نفر معیارهای ورود به مطالعه را نداشتند و شرکت نکردند. این تحقیق از ۳۰ آزمودنی (میانگین سن: ۱/۳۷ ± ۲۱/۳۷ سال، متوسط قد: ۳/۳۴ ± ۱۷۴/۴ سانتی‌متر، میانگین وزن: ۳/۴۵ ± ۷۲/۱۳ کیلوگرم، چربی بدن: ۱/۸ ± ۱۱/۹۳ درصد) تشکیل شد. تصادفی سازی بلوک شده برای اختصاص دادن آزمودنی‌ها به گروه‌های VAR یا TRAD استفاده شد. آزمودنی‌ها باید حداقل در ۹۰ درصد از جلسات آموزشی شرکت کنند و دو غیبت غیر متوالی مجاز باشد. به آزمودنی‌ها توصیه شد که خارج از برنامه تمرینی این مطالعه به هیچ گونه فعالیت بدنی شدید نپردازند و عادات غذایی فعلی خود را حفظ کنند.

پروتکل تمرینی

پروتکل تمرینی شامل ۴ ست ۴ ایستگاه (۴ تمرین در هر گروه عضلانی) ۳ بار در هفته بود. به آزمودنی‌ها آموزش داده شد که در طول مدت مطالعه از انجام هر گونه تمرینات مقاومتی اضافی خودداری کنند. در طول هر هفته تمرین، همه آزمودنی‌ها تمرینات یکسانی را بر اساس تنش مکانیکی، استرس متابولیک و آسیب عضلانی انجام دادند. شدت تمرین طوری تنظیم شد که آزمودنی مورد نظر بتواند تکرار مورد نظر را تکمیل کند. هفته پنجم مداخله یک هفته دی لود تمرینی برای کم کردن تنش و کاهش ریسک

جدول-۱. پروتکل تمرینی

گروه - هفته	تمرین ها (سه بار در هفته)		تعداد ست	شدت - تمپو	استراحت (دقیقه)
VAR و TRAD هفته اول (هفته انطباق)	دوسر بازویی جلوبازو با دمبل جلوبازو هالتر لاری جلوبازو با دمبل روی میز شیب دار جلوبازو اسپایدر	چهارسر ران پرس پا اسکات جلوپا دستگاه سی سی اسکات	۴	۱۲ تکرار بیشینه /۰-۲-۰-۲	۱
VAR هفته دوم (استرس متابولیک)	جلوبازو با دمبل + جلوبازو هالتر لاری جلوبازو با دمبل روی میز شیب دار + جلوبازو اسپایدر	پرس پا + اسکات جلوپا دستگاه + سی سی اسکات	۴	۱۲ تکرار بیشینه /۰-۲-۰-۲	۱
VAR هفته سوم (تنش مکانیکی)	جلوبازو با دمبل جلوبازو هالتر لاری جلوبازو با دمبل روی میز شیب دار جلوبازو اسپایدر	پرس پا اسکات جلوپا دستگاه سی سی اسکات	۴	۵ تکرار بیشینه /۰-۲-۰-۲	۲
VAR هفته چهارم (آسیب عضلانی)	جلوبازو با دمبل جلوبازو هالتر لاری جلوبازو با دمبل روی میز شیب دار جلوبازو اسپایدر	پرس پا اسکات جلوپا دستگاه سی سی اسکات	۴	۱۲ تکرار بیشینه /۰-۲-۰-۸	۱
VAR و TRAD هفته پنجم (هفته دی لود)	جلوبازو با دمبل جلوبازو هالتر لاری جلوبازو با دمبل روی میز شیب دار جلوبازو اسپایدر	پرس پا اسکات جلوپا دستگاه سی سی اسکات	۲	۱۵ تکرار بیشینه /۰-۲-۰-۲	۱
VAR هفته ششم تا نهم	تکرار تمرینات هفته های قبل		(مشابه هفته‌های قبل)	(مشابه هفته های قبل)	(مشابه هفته‌های قبل)
TRAD هفته سوم تا چهارم، هفته پنجم تا نهم	جلوبازو با دمبل جلوبازو هالتر لاری جلوبازو با دمبل روی میز شیب دار جلوبازو اسپایدر	پرس پا اسکات جلوپا دستگاه سی سی اسکات	۴	۱۲ تکرار بیشینه /۰-۲-۰-۲	۱

آسیب در نظر گرفته شد. حجم تمرینی برای هر دو گروه یکسان بوده و هردو پروتکل ایزو والیوم هستند که مجموع ست‌ها ۱۶ ست در هفته است، حرکات تمرینی برای گروه VAR و TRAD در جدول ۱ نشان داده شده است. پروتکل تمرینی برای هر دو گروه شامل ۳ جلسه هفتگی بود که در ۱۰ هفته انجام شد.

همه مراحل مستقیماً توسط دستیاران تحقیقاتی نظارت می‌شدند تا از عملکرد و تکنیک مناسب روال‌های مربوطه اطمینان حاصل شود. قبل از دوره مداخله تمرینی، همه آزمودنی‌ها برای تعیین بارهای تمرینی اولیه فردی برای هر تمرین تحت آزمایش ۱۰ تکرار بیشینه قرار گرفتند (طبق دستورالعمل‌های ایجاد شده توسط انجمن ملی قدرت و آمادگی (۱۲). افزایش اضافه بار تدریجی هر ۲ هفته تنظیم می‌شد تا آزمودنی‌ها بتوانند تعداد تکرار مورد نظر را تکمیل کنند. هیچ آسیبی گزارش نشد و پایبندی به برنامه برای هر دو گروه ۱۰۰٪ بود.

ارزیابی متغیر های تحقیق

ضخامت عضله

تصویر برداری مغناطیسی یا MRI به عنوان "استاندارد طلایی" برای سنجیدن ضخامت عضلات در نظر گرفته می شود، در این مطالعه از روش اولتراسوند یا با استفاده از دستگاه سونوگرافی ضخامت عضلات سنجیده شد که هم بستگی بالایی با تصویربرداری مغناطیسی دارد (۱۶). مطالعات قبلی همبستگی بالایی بین MRI و اندازه‌گیری‌های اولتراسوند ضخامت عضلات برای فلکسورهای آرنج، اکستنسورهای آرنج و ضخامت عضلات چهار سر ران را نشان می‌دهند، این همبستگی ها به ترتیب ۰/۸۹، ۰/۷۳ و ۰/۹۱ هستند (۱۷). اندازه‌گیری ضخامت عضله پهن خارجی ران (VL) و دو سر بازویی (BB) قبل و بعد از مداخله تمرین مقاومتی (RT) با استفاده از سونوگرافی B-mode (Philips clearvue 550) انجام شد. به آزمودنی ها توصیه شد حداقل ۴۸ ساعت قبل از جلسه از ورزش شدید خودداری کنند تا از صحت نتایج جلسه اطمینان حاصل شود. این اقدام احتیاطی برای جلوگیری از دیستورشن احتمالی ناشی از تورم عضلانی انجام شد. تصویربرداری اولتراسوند، که بخشی از جلسه آزمایش است، توسط یک تکنسین ماهر با استفاده از یک پروب خطی ۱۰-۵ مگاهرتز انجام شد. در طول سونوگرافی، آزمودنی‌ها روی تخت دراز کشیده بودند و ماهیچه های بازو و پا دراز کشیده و شل شده بودند و مبدل عمود بر محور بلند ماهیچه ها قرار می‌گرفت. اندازه گیری عضله پهن خارجی در (۵۰٪) طول میانی

عضله بین کندیل خارجی استخوان ران و تروکانتر بزرگ برای عضله چهار سر ران انجام شد. در حالی که طول عضله پهن خارجی به عنوان فاصله بین تروکانتر بزرگتر و قسمت فوقانی کشکک اندازه گیری شد، عضله دوسر بازویی (BB) در مکانی اندازه گیری شد که دو سوم فاصله بین چین آرنج و نوک استخوان آکرومیون است. برای اندازه گیری نهایی، از هر مکان سه تصویر گرفته شد و مقادیر آنها میانگین گیری شد.

آزمون قدرت عضلانی

از آزمودنی‌ها خواسته شد که حداقل ۴۸ ساعت قبل از آزمایش پایه و حداقل ۴۸ ساعت قبل از آزمایش از هر گونه تمرینی غیر از فعالیت‌های روزمره خودداری کنند. در پایان مطالعه، حداکثر قدرت دینامیکی آزمودنی‌ها قبل و بعد از آموزش با استفاده از آزمون یک تکرار بیشینه (1-RM) برای وزنه آزاد هالتر پرس روی نیمکت و تمرینات اسکات پشت اندازه گیری شد. قبل از آزمایش، از آزمودنی‌ها مقدار 1-RM قبلی خود برای هر تمرین خواسته شد و سپس دو تکرار در ۶۰٪، ۷۰٪ و ۸۰٪ و یک تکرار در ۹۰٪ و ۱۰۰٪ 1-RM انجام شد. در مواردی که یک آزمودنی در تلاش ناموفق بود، بار در محدوده ۵-۲/۵ کیلوگرم کاهش می یافت تا 1-RM آن‌ها با درجه بالایی از دقت تعیین شود. بین هر آزمایش سه دقیقه استراحت داده شد.

ترکیب بدنی

برای اندازه‌گیری ترکیب بدن یک روز قبل و یک روز پس از مداخله ۱۰ هفته‌ای از روش های تن‌سنجی استفاده شد. قد آزمودنی‌ها در حالی که بدون کفش ایستاده بودند و سرشان در سطح افقی فرانکفورت قرار داشت با استفاده از یک استادیومتر اندازه‌گیری شد. تجزیه و تحلیل بیوامپدانس (BIA) روشی است که برای اندازه‌گیری ترکیب بدن به صورت قابل حمل، غیرتهاجمی و به اندازه اسکن DEXA قابل اعتماد است (۱۸،۱۹). دستگاه InBody 570 BIA (ساخت کره جنوبی) برای اندازه‌گیری وزن (به کیلوگرم)، شاخص توده بدن (BMI)، توده بدون چربی (LBM) و توده چربی (BF) استفاده شد.

رژیم غذایی

به آزمودنی‌ها یک برنامه غذایی داده شد که پروتئین کافی روزانه خود را دریافت کنند و همچنین از ایجاد یک عامل مخدوش کننده رژیم غذایی در آن‌ها جلوگیری شود. منبع غذایی آن‌ها از آنجایی که در خوابگاه‌های دانشگاه زندگی می‌کردند مشابه بود. از آن‌ها خواسته شد تا عادات غذایی معمول خود را حفظ کنند، در حالی که حداقل پروتئین دریافتی ۲ گرم در کیلوگرم و رژیمی که همان مقدار انرژی مصرف شده یا کمی بیشتر را تامین می‌کند، داشته باشند.

جدول-۲. نمونه برنامه غذایی و مقدار درشت مغذی‌ها ارائه شده به آزمودنی‌ها

مقدار درشت مغذی‌ها به ازای وزن و کالری مورد نیاز برای میانگین وزنی آزمودنی‌ها (۷۲ کیلوگرم)			
کربو هیدرات ۳۶۰ گرم	پروتیین ۱۴۵ گرم	چربی ۴۵ گرم	کالری ۲۴۰۰-۲۵۰۰
صبحانه	**نهار**	**شام**	**میان وعده ها ۳ بار**	**بعد از تمرین مقاومتی**
۴ عدد تخم مرغ نیمرو یا املت یا آبپز ۱۰۰ گرم نان یک عدد سیب	۱۵۰ گرم برنج ۱۵۰ گرم سینه یا ران مرغ همراه سالاد	۱۵۰ گرم سیب زمینی ۱۵۰ گرم گوشت چرخ کرده همراه سالاد	۵۰ گرم ماست کم چرب + ۲۰ گرم بادام زمینی + ۵ عدد سفیده +۲ زرده تخم مرغ + ۱۰۰ گرم میوه دلخواه	۱۵۰ گرم سینه مرغ یا ۶ عدد سفیده ۲ عدد زرده

تجزیه و تحلیل آماری داده‌ها

از آزمون شاپیرو-ویلک برای بررسی نرمال بودن توزیع داده‌ها و از آزمون لِوین برای بررسی همگن بودن واریانس‌ها استفاده شد. میانگین و انحراف معیار برای ارائه داده‌های ضخامت عضله قبل از مداخله استفاده شد. آزمون تی مستقل برای بررسی تفاوت بین گروه‌ها و آزمون تی زوجی برای بررسی وجود تفاوت قبل و پس از مداخله. تمامی محاسبات آماری با استفاده از JASP 017.2.1 برای ویندوز انجام شد (دانشگاه آمستردام، هلند). سطح معناداری $P\leq$ ۰/۰۵ تعیین شد.

ملاحظات اخلاقی

در این پژوهش تمام اصول اخلاقی مرتبط، از جمله اخذ کد اخلاق از کمیته اخلاق در پژوهش دانشگاه شهید بهشتی به شماره IR.SBU.REC.1402.007، محرمانه بودن پرسشنامه‌ها، رضایت کتبی و آگاهانه شرکت کنندگان در پژوهش، رعایت پروتکل‌های بهداشتی و اختیار خروج از پژوهش رعایت شد.

نتایج

هر دو گروه دارای توزیع نرمال و واریانس همگن بودند. هیچ تفاوت معناداری قبل از مداخله بین گروه‌ها در ضخامت عضلانی مشاهده نشد (P>۰/۰۵) هر دو گروه TRAD و VAR افزایش معناداری در ضخامت عضلات دو سر بازویی نشان دادند (TRAD: P = ۰/۰۰۷; VAR: P = ۰/۰۰۱) اما تفاوت معناداری بین گروه‌ها در ضخامت عضله دو سر بازویی مشاهده شد (۰/۰۱۲ = P). ضخامت عضله پهن خارجی به طور معناداری در هر دو گروه بعد از مداخله افزایش داشت (P = ۰/۰۰۱) اما تفاوت معناداری بین دو گروه در ضخامت عضله پهن خارجی دیده نشد (P>۰/۰۵) (شکل ۱).

شکل-۱. ضخامت عضلات دوسر بازویی (BB) و پهن خارجی (VL) قبل و بعد از مداخله

جدول-۳. داده‌های دموگرافیک آزمودنی‌ها

داده‌های جمعیت شناختی	تعداد	حداقل	حداکثر	میانگین	انحراف معیار
سن (سال)	۳۰	۲۰	۲۵	۲۱/۳۷	۱/۳۷
قد (سانتی متر)	۳۰	۱۶۹	۱۸۵	۱۷۴/۴۸	۳/۳۴
وزن (کیلوگرم)	۳۰	۶۶	۸۴	۷۲/۱۳	۳/۴۵
وزن بدون چربی (کیلوگرم)	۳۰	۵۸	۶۵	۶۰/۴۰	۱/۷۸
BMI (kg/m^2)	۳۰	۲۱/۴	۲۷	۲۳/۴۹	۱/۴۷
Bf %	۳۰	۹/۵	۱۵/۵	۱۱/۹۳	۱/۸۰

ترکیب بدنی

جدول ۳ مقادیر توده بدون چربی (LBM)، درصد چربی بدن(BF) و شاخص توده بدنی (BMI) را قبل و بعد از مداخله تمرینی نشان می‌دهد. هر دو گروه افزایش معناداری در LBM ($P = ۰/۰۰۱$) داشتند. کاهش معناداری در درصد چربی بدن در گروه TRAD ($P<۰/۰۵$) مشاهده شد، اما شاخص توده بدنی آن‌ها تغییر معناداری نداشت ($P>۰/۰۵$). همچنین تفاوت معناداری در هیچ کدام از متغیرهای ترکیب بدن وجود نداشت ($P>۰/۰۵$).

قدرت عضلانی

جدول ۳ مقادیر آزمون اسکات پشت و پرس سینه نیمکت 1-RM را قبل و بعد از مداخله تمرینی نشان می‌دهد. گروه‌های TRAD و VAR به طور معناداری در حرکت پرس سینه و اسکات پشت افزایش قدرت داشتند ($P = ۰/۰۰۱$). هرچند در متغیر قدرت تفاوت کمی بین دو گروه بود اما معنادار نبود ($P>۰/۰۵$).

بحث

این مطالعه به بررسی تأثیر تغییرات هفتگی روش تمرین مقاومتی بر ضخامت و قدرت عضلات مردان جوان پرداخت. مطالعه حاضر این فرضیه را مطرح کرد که تغییرات هفتگی در برنامه تمرین به طوری که یک هفته استرس متابولیک مضاعف، در هفته بعدی تنش مکانیکی مضاعف و در آخر آسیب عضلانی مضاعف نسبت به تمرین سنتی وجود داشته باشد و منجربه افزایش ضخامت و قدرت عضلانی بیشتری نسبت به تمرین سنتی شود. گروه VAR افزایش بیشتری در ضخامت عضلات دوسر بازویی داشتند و در متغیر قدرت نیز تفاوت کمی در حرکت اسکات پشت به نفع گروه VAR دیده شد اما از لحاظ آماری معنادار نبود. در مورد متغیرهای اندازه‌گیری شده دیگر مانند توده بدون چربی و ضخامت عضله پهن خارجی ران و آزمون قدرت پرس سینه هر دو گروه VAR و TRAD افزایش مشابهی را نشان دادند.

یافته‌های مطالعه حاضر با یافته‌های Decamargo و همکاران درسال ۲۰۲۲ و Fink و همکاران درسال ۲۰۱۸، که نشان دادند ضخامت عضله با استراحت کوتاه‌تر بین ست‌ها که ابزاری برای افزایش استرس متابولیکی است به طور قابل توجهی بیشتر است، مطابقت دارد (۲۰،۲۱). با این حال، Schoenfeld و همکاران درسال ۲۰۱۶ دریافتند که استراحت طولانی‌تر بین ست در افزایش قدرت و هایپرتروفی می‌تواند بهتر باشد (۲۳). در مطالعه حاضر نیز

جدول-۴. مقایسه قبل و بعد بین دو گروه TRAD و VAR در ضخامت عضله، ترکیب بدن و قدرت

گروه‌ها و متغیرها	TRAD				VAR				
	میانگین ± انحراف معیار قبل	میانگین ± انحراف معیار بعد	میانگین تفاوت (قبل و بعد)	*p* در گروه	میانگین ± انحراف معیار قبل	میانگین ± انحراف معیار بعد	میانگین تفاوت (قبل و بعد)	*p* در گروه	*p* بین گروه‌ها
تصویربرداری اولتراسوند دوسر بازویی (mm)	۳۳/۵۰ ± ۳/۹۸	۳۳/۹۶ ± ۴/۲۳	۰/۴۶	۰/۰۰۷*	۳۳/۸۶ ± ۴/۴۳	۳۷/۸۵ ± ۳/۶۳	۳/۹۹	۰/۰۰۱**	۰/۰۱۲*
پهن خارجی (mm)	۲۵/۲۶ ± ۲/۸۱	۲۶/۲۰ ± ۲/۷۸	۰/۹۴	۰/۰۰۱**	۲۶/۸۲ ± ۲/۸۷	۲۸/۲۱ ± ۲/۹۹	۱/۳۹	۰/۰۰۱**	۰/۰۶۸
ترکیب بدنی LBM (کیلوگرم)	۶۰/۸۸ ± ۱/۹۱	۶۱/۴۳ ± ۱/۸۳	۰/۵۵	۰/۰۰۱**	۵۹/۹۱ ± ۱/۵۴	۶۰/۶۶ ± ۱/۵۳	۰/۷۵	۰/۰۰۱**	۰/۲۲۴
چربی بدن (٪)	۱۱/۹۹ ± ۱/۸۹	۱۱/۹۲ ± ۱/۷۸	۰/۰۷	۰/۰۴۹*	۱۱/۸۸ ± ۱/۷۹	۱۱/۷۵ ± ۱/۷۴	۰/۱۳	۰/۲۴	۰/۷۹۸
BMI (kg/m^2)	۲۳/۴۲ ± ۱/۵۶	۲۳/۴۳ ± ۱/۵۲	۰/۰۱	۰/۸۲۱	۲۳/۵۵ ± ۱/۴۲	۲۳/۵۴ ± ۱/۳۴	۰/۰۱	۰/۹۱	۰/۸۳۰
قدرت اسکات پشت 1-RM (کیلوگرم)	۹۰/۳۳ ± ۳/۸۸	۱۰۸/۱۳ ± ۳/۴۲	۱۷/۸	۰/۰۰۱**	۹۰/۴۰ ± ۳/۴۱	۱۱۰/۰۶ ± ۲/۰۸	۱۹/۶۶	۰/۰۰۱**	۰/۰۷۲
پرس سینه 1-RM (کیلوگرم)	۷۰/۸۵ ± ۳/۵۴	۸۴/۷۳ ± ۴/۹۳	۱۴/۴	۰/۰۰۱**	۷۰/۸۰ ± ۳/۱۱	۸۲/۲۰ ± ۵/۱۱	۱۱/۸	۰/۰۰۱**	۰/۱۷۸

* $P\leq$۰/۰۵ تفاوت معنادار است؛ ** $P\leq$۰/۰۱ تفاوت معنادار است.

هفته‌ای که تاکید بر استرس متابولیک مضاعف بود، از تکنیک سوپر ست به عنوان ابزاری برای کوتاه کردن زمان استراحت و انباشت متابولیت‌های ناشی از انقباض‌ها استفاده شد و استراحت بین ست کلید تجمع متابولیت‌ها درعضلات است. مطالعات قبلی نیز نشان دادند که سوپر ست‌ها و تریست‌ها و دراپ ست‌ها می‌تواند منجربه تورم عضلانی بیشتر شوند (۲۱،۲۲،۲۴)، و تورم عضلانی نشانگری از استرس متابولیک بالاتر است که منجربه هایپرتروفی می‌شود (۲۵،۱۲). روش‌های تمرینی که به مسیر گلیکولیتیک وابسته هستند، باعث ایجاد تورم قابل توجهی در عضلات به علت تغییرات اسمزی ناشی از تجمع متابولیت‌ها می‌شوند (۲۷). همانطور که گفته شد، سیستم سوپرست ممکن است توسط ورزشکاران که هدفشان افزایش اندازه عضله است، اتخاذ شود. دلیل این کار افزایش حاد ضخامت عضله یا همان تورم عضلانی است که می‌تواند مکانیسم‌های آنابولیک درون سلولی را تحریک کند و منجربه افزایش سنتز پروتئین عضله می‌شود (۲۸). از طریق تمرینات مقاومتی مبتنی بر استرس متابولیک مضاعف، افزایش هیدراتاسیون درون سلولی حاصل می‌شود و این به نوبه‌خود، محتوای آب سلول‌های عضلانی را افزایش می‌دهد، که به عنوان یک عامل مهم در افزایش رشد عضلانی در شرایط تجمع متابولیک مطرح می‌شود (۲۲،۲۴). مکانیزم‌های سلولی و ملوکولی مطرح شده برای سنتز پروتیین ناشی از استرس متابولیک و تورم عضلانی اثر گذاشتن خود متابولیت‌های تجمع شده در عضله از جمله یون هیدروژن، فسفات غیر آلی و لاکتات است که در ادامه باعث ایجاد اکسیدان‌ها و فعال کردن مسیر MAPK و mTOR خواهند شد که این دو مسیر آنابولیک و ضد تجزیه پروتیین هستند (۳۸).

هفته تنش مکانیکی این مطالعه که دو هفته تمرین با شدت بالا یعنی ۸۵٪ ۱ تکرار بیشینه که همان شدت مورد استفاده در مطالعه حاضر یعنی ۵ تکرار بیشینه در گروه VAR در مقایسه با ۷۰٪ ۱ تکرار بیشینه که شدت مورد استفاده در گروه TRAD یعنی ۱۲ تکرار بیشینه بود، می‌تواند افزایش قدرتی را که نتایج ما در گروه VAR شاهدش بودیم را توجیه کند. نتایج همسو با مطالعه حاضر در مطالعه انجام شده توسط Lopez و همکاران ۲۰۲۱ نشان داد که تمرین با شدت بالا برای بهبود قدرت نسبت به شدت متوسط یا کم برتری دارد (۲۸). از سوی دیگر، Kubo و همکاران دریافتند که اگر حجم تمرین برابر باشد، تفاوت معناداری بین ۳ شدت تمرینی مختلف ۴ تکرار بیشینه، ۸ تکرار بیشینه و ۱۲ تکرار بیشینه مشاهده نشد، اما افزایش قدرت در شدت ۴ تکرار بیشینه و ۸ تکرار بیشینه قابل توجه‌تر است (۲۹). از نظر هایپرتروفی تفاوت معناداری بین تمرین با بار متوسط و بار زیاد وجود ندارد (۳۱-۲۹). تئوری معروف تعداد تکرار (۳۲) نشان می‌دهد که شدت‌های تمرینی مختلف با سازگاری‌های مختلف در تمرین مقاومتی مطابقت دارد. به طور خاص، این تئوری پیشنهاد می‌کند که تمرین با شدت بالا، برای افزایش قدرت بهینه‌تر است که این شدت ۱ تا ۵ تکرار بیشینه است. در مقابل، تمرین با شدت متوسط برای افزایش هایپرتروفی

عضلانی بهینه‌تر است، که ۶ تا ۱۲ تکرار بیشینه است. در این مطالعه از شدت ۵ تکرار بیشینه به عنوان شدتی که در نقطه میانی این دو طیف وجود دارد که هم سازگاری قدرتی و هم سازگاری هایپرتروفی را به همراه دارد استفاده شد. علت این سازگاری‌های ناشی از شدت تمرینی بالا بر هم خوردن یکپارچگی سلول عضلانی و سیگنال‌هایی که از طریق گیرنده‌های مکانیکی و کانال‌های یونی و انتگرین‌هایی روی غشا سلول عضلانی وجود دارند ایجاد می‌شود، این برهم خوردگی‌ها و تنش‌های مکانیکی برای حفظ یکپارچگی، سیگنال‌های آنابولیکی را از طریق مسیر کیناز MAPK و JNK فعال می‌کنند (C-jun N terminal Kinase) که در آخر فعالیت mTOR را به همراه داشته و سنتز پروتیین صورت می‌گیرد (۳۹).

در مورد تکنیک تمپو آهسته در تمرینات مقاومتی اختلاف نظر وجود دارد و مطالعات در زمینه کمیاب هستند، مطالعه انجام شده توسط Burd و همکاران درسال ۲۰۱۲ نشان داد که انقباض برونگرای آهسته در طول تمرین مقاومتی می‌تواند سنتز پروتئین میوفیبریلار را ۲۴ تا ۳۰ ساعت پس از جلسه تمرین به شدت افزایش دهد. علاوه بر این، این تکنیک تمرینی می‌تواند سنتز پروتئین سارکوپلاسمی و میتوکندریایی را به صورت حاد افزایش دهد و انقباض برونگرای آهسته می‌تواند اثرات فوری و طولانی مدت بر سنتز پروتئین ماهیچه‌ها داشته باشد (۳۲). انقباض برونگرای آهسته‌تر به معنای زمان بیشتر تحت تنش است که یکی از عوامل اصلی هایپرتروفی عضلانی است (۳۳). بر اساس مطالعه متاآنالیز Schoenfeld و همکاران درسال ۲۰۱۵، اگرچه آن‌ها فازهای حرکت برونگرا و درونگرا را کنترل نکردند، اما به این نتیجه رسیدند که پاسخ‌های هایپرتروفیک زمانی مشابه هستند که مدت زمان تکرارها از ۰/۵ تا ۸ ثانیه باشد (۳۴).

سرعت انقباض (تمپو) آهسته‌تر به بار خارجی کمتری نیاز دارد، اما همچنان می‌تواند محرک کافی برای هایپرتروفی و افزایش قدرت باشد به شرطی که با زمان تحت تنش بیشتر همراه باشد. مکانیزم هایپرتروفی مطرح شده در مورد اثر آسیب عضلانی بوجود آمده توسط تمپو آهسته در انقباض برونگرا اثر آنابولیکی سلول‌های ماهواری هستند که با این پدیده فعال می‌شوند، البته سلول‌های ماهواره‌ای در تمرینات قدرتی عادی نیز فعال می‌شوند اما زمانی که آسیب عضلانی بیشتر باشد آن‌ها نیز فعالیت بیشتری دارند و فعالیت بیشتر آن‌ها منجربه سنتز پروتیین بیشتر خواهد شد (۴۰). با این حال تمرکز بیش از حد بر روی زمان تحت تنش می‌تواند توانایی دستیابی به اضافه بار پیشرونده را مختل کند. اصل اضافه بار هم تعیین کننده اصلی در هایپرتروفی و قدرتی است که افراد می‌توانند با تمرینات قدرتی به آن برسند. به همین علت است که در این مطالعه به صورت توأمان هفته تنش مکانیکی بالا در کنار تمپو آهسته نیز در مداخله استفاده شد.

تا امروز پژوهشی در مورد بررسی اثرات تغییر تکنیک‌های تمرینی به صورت هفتگی بر هایپرتروفی عضلانی وجود ندارد، با این حال، مطالعاتی وجود دارند که تأثیر تغییر انتخاب نوع تمرین مقاومتی و تأثیر آن بر هایپرتروفی را بررسی کرده است، یکی از آن‌ها مطالعه Bazvalle و همکاران درسال ۲۰۱۹ است که اگرچه نشان دادند انگیزه تمرینی در گروهی که تمرینات متغیر انجام می‌دادند بیشتر بود اما سازگاری هایپرتروفی و قدرتی مشابهی را بین هر دو گروه نشان داد، اما آن‌ها فقط انتخاب تمرین را بدون هیچ متغیر دیگری تغییر دادند. همچنین تغییرات را در هر جلسه و نه به صورت هفتگی تغییر دادند (۳۵). در یک مطالعه جدیدتر اثر یک تمرین ثابت در مقابل تمرینات متغیر برای یک گروه عضلانی را بر هایپرتروفی مقایسه کردند و گروهی که تمرینات خود را تغییر دادند، شاهد بهبود معنادار در هایپرتروفی برای تمام نقاط عضله بودند (۳۶). البته با توجه به مطالعه اخیر Kasiano و همکاران در سال ۲۰۲۲ (۳۷) تغییر بیش از حد تمرینات نه تنها مفید نیست بلکه می‌تواند برای سازگاری‌های هایپرتروفی و قدرتی مضر نیز باشد. در مطالعه حاضر ما روش تمرین را به صورت هفتگی تغییر دادیم اما تمرینات ثابت باقی ماندند، تا آنجا که می‌دانیم مطالعه دیگری همچین مداخله‌ای را در تمرینات خود انجام نداده‌اند. یافته‌های مطالعه ما تا حدودی با مطالعات مشابه همخوانی دارد (۳۷) و به نظر می‌رسد که تغییر روش تمرین به صورت هفتگی می‌تواند اثرات مثبتی بر هایپرتروفی و قدرت داشته باشد، دلیل این سازگاری‌ها می‌تواند به علت فعالیت mTOR و کیناز MAP که به علت انباشت متابولیت‌هایی چون یون هیدروژن و لاکتات و اکسیدان‌ها صورت می‌گیرد در ادامه نیز به علت تنش مکانیکی بالا مسیر MAPK و JNK سیگنال‌های آنابولیکی را فعال می‌کنند و همچنین در آخر هم سلول‌های ماهواره‌ای که به علت آسیب عضلانی ایجاد شده توسط تمپو آهسته قسمت منفی انقباض فعال‌تر می‌شوند به صورت توأمان سازگاری هایپرتروفی بیشتری را ایجاد می‌کنند.

از محدودیت‌هایی که در این تحقیق وجود داشت می‌تواند به زمان مداخله اشاره کرد، ممکن است اگر این مداخله طولانی‌تر بود سازگاری‌ها بیشتری در گروه تمرین متغیر دیده می‌شد. همچنین به علت نبود امکانات و سختی کار از نمونه برداری عضلانی و همچنین هایپرتروفی موضعی نیز در این تحقیق استفاده نشد. پیشنهاد می‌شود برای تحقیقات آینده زمان مداخله طولانی‌تر و همچنین نمونه برداری و استفاده از دستگاه MRI برای سنجش هایپرتروفی موضعی نیز استفاده شود.

نتیجه‌گیری

بر اساس نتایج به دست آمده در این مطالعه یک برنامه تمرین مقاومتی ۱۰ هفته‌ای با تغییرات هفتگی در تکنیک تمرین نشان داد که هایپرتروفی عضله دوسر بازویی را به طور معناداری نسبت به تمرینات سنتی در مردان تمرین نکرده افزایش می‌دهد. همچنین قدرت عضلانی در گروهی که تکنیک تمرینی هر هفته تغییر داشت افزایش بیشتری داشت گرچه معنی‌دار نبود اما نشان از تمایل به

پیشرفت بیشتری دیده می‌شد. ورزشکاران و نظامیان می‌توانند از این سیستم تمرینی برای افزایش ضخامت عضلات دو سر بازویی در برنامه تمرینی خود استفاده کنند.

تشکر و قدردانی: مطالعه حاضر در کمیته اخلاق دانشگاه شهید بهشتی باکد اخلاق IR.SBU.REC.1402.007 تایید شده است. بدین وسیله نویسندگان از همه شرکت کنندگان در مطالعه حاضر به خاطر صبر و شکیبایی آن‌ها تشکر و قدردانی می کنند.

تضاد منافع: نویسندگان تصریح می‌کنند که هیچ‌گونه تضاد منافعی در مطالعه حاضر وجود ندارد.

نکات بالینی کاربردی برای جوامع نظامی

- با توجه به اهمیت قدرت و توده عضلانی در پرسنل نظامی و همچنین بالا نگه داشتن انگیزه در هنگام تمرینات قدرتی بهتر است تکنیک تمرینات مقاومتی نظامی‌ها هر هفته تغییر کند تا هم از لحاظ استرس متابولیکی، آسیب عضلانی و تحمل تنش بالای مکانیکی سازگاری‌های لازم صورت گیرد. همچنین با توجه به نتایج به دست آمده در این مطالعه پرسنل نظامی می‌توانند به هایپر تروفی عضلانی بیشتری در مدت ۱۰ هفته تمرینی با سیستم تمرینی متغیر نسبت به تمرین سنتی دست یابند.

منابع

1. Herman JR, Rana SR, Chleboun GS, Gilders RM, Hageman FC, Hikida RS, et al. Correlation between muscle fiber cross-sectional area and strength gain using three different resistance-training programs in college-aged women. The Journal of Strength & Conditioning Research. 2010;24:1. doi:10.3390/ijerph16244897
2. Jones EJ, Bishop PA, Woods AK, Green JM. Cross-sectional area and muscular strength: a brief review. Sports Medicine. 2008;38:987-94. doi:10.2165/00007256-200838120-00003
3. Bernárdez-Vázquez R, Raya-González J, Castillo D, Beato M. Resistance Training Variables for Optimization of Muscle Hypertrophy: An Umbrella Review. Frontiers in sports and active living. 2022;4:949021. doi:10.3389/fspor.2022.949021
4. Schoenfeld BJ. The mechanisms of muscle hypertrophy and their application to resistance training. The Journal of Strength & Conditioning Research. 2010;24(10):2857-72. doi:10.1519/JSC.0b013e3181e840f3
5. Joanisse S, Lim C, McKendry J, Mcleod JC, Stokes T, Phillips SM. Recent advances in understanding resistance exercise training-induced skeletal muscle hypertrophy in humans. F1000Research. 2020;9:F1000 Faculty Rev-141. doi:10.12688/f1000research.21588.1
6. Erskine RM, Jones DA, Maffulli N, Williams AG, Stewart CE, Degens H. What causes in vivo muscle specific tension to increase following resistance training? Experimental Physiology. 2011;96(2):145-55. doi:10.1113/expphysiol.2010.053975
7. 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. Frontiers in Endocrinology. 2020;11:33. doi:10.3389/fendo.2020.00033
8. Vissing K, Brink M, Lønbro S, Sørensen H, Overgaard K, Danborg K, et al. Muscle adaptations to plyometric vs. resistance training in untrained young men. The Journal of Strength & Conditioning Research. 2008;22(6):1799-810. doi:10.1519/JSC.0b013e318185f673
9. Carey Smith R, Rutherford O. The role of metabolites in strength training: I. A comparison of eccentric and concentric contractions. European Journal of Applied Physiology and Occupational Physiology. 1995;71:332-6. doi:10.1007/BF00240413
10. Oranchuk DJ, Storey AG, Nelson AR, Cronin JB. Scientific basis for eccentric quasi-isometric resistance training: a narrative review. The Journal of Strength & Conditioning Research. 2019;33(10):2846-59. doi:10.1519/JSC.0000000000003291
11. Anderson AB, Owens JG, Patterson SD, Dickens JF, LeClere LE. Blood flow restriction therapy: from development to applications. Sports Medicine and Arthroscopy Review. 2019;27(3):119-23. doi:10.1097/JSA.0000000000000240
12. Krzysztofik M, Wilk M, Wojdała G, Gołaś A. Maximizing muscle hypertrophy: a systematic review of advanced resistance training techniques and methods. International Journal of Environmental Research and Public Health. 2019;16(24):4897. doi:10.3390/ijerph16244897
13. Saito Y, Chikenji TS, Matsumura T, Nakano M, Fujimiya M. Exercise enhances skeletal muscle regeneration by promoting senescence in fibro-adipogenic progenitors. Nature Communications. 2020;11(1):889. doi:10.1038/s41467-020-14734-x
14. Maeo S, Huang M, Wu Y, Sakurai H, Kusagawa Y, Sugiyama T, et al. Greater hamstrings muscle hypertrophy but similar damage protection after training at long versus short muscle lengths. Medicine and Science in Sports and Exercise. 2021;53(4):825. doi:10.1249/MSS.0000000000002523
15. Schoenfeld BJ. Does exercise-induced muscle damage play a role in skeletal muscle hypertrophy? The Journal of Strength & Conditioning Research. 2012;26(5):1441-53. doi:10.1519/JSC.0b013e31824f207e
16. Franchi MV, Longo S, Mallinson J, Quinlan JI, Taylor T, Greenhaff PL, et al. Muscle thickness correlates to muscle cross-sectional area in the assessment of strength training-induced hypertrophy.

Scandinavian Journal of Medicine & Science in Sports. 2018;28(3):846-53. doi:10.1111/sms.12961
17. Miyatani M, Kanehisa H, Ito M, Kawakami Y, Fukunaga T. The accuracy of volume estimates using ultrasound muscle thickness measurements in different muscle groups. European Journal of Applied Physiology. 2004;91:264-72. doi:10.1007/s00421-003-0974-4
18. Anusitviwat C, Vanitcharoenkul E, Chotiyarnwong P, Unnanuntana A. Dual-frequency bioelectrical impedance analysis is accurate and reliable to determine lean muscle mass in the elderly. Journal of Clinical Densitometry. 2023;26(1):90-6. doi:10.1016/j.jocd.2022.12.006
19. Dehghan M, Merchant AT. Is bioelectrical impedance accurate for use in large epidemiological studies?. Nutrition Journal. 2008;7:26. doi:10.1186/1475-2891-7-26
20. Varović D, Žganjer K, Vuk S, Schoenfeld BJ. Drop-set training elicits differential increases in non-uniform hypertrophy of the quadriceps in leg extension exercise. Sports. 2021;9(9):119. doi:10.3390/sports9090119
21. Fink J, Schoenfeld BJ, Kikuchi N, Nakazato K. Effects of drop set resistance training on acute stress indicators and long-term muscle hypertrophy and strength. The Journal of Sports Medicine and Physical Fitness. 2018;58(5):597-605. doi:10.23736/S0022-4707.17.06838-4
22. de Camargo JB, Zaroni RS, Júnior AC, DE OLIVEIRA TP, Trindade TB, Lopes CR, et al. Tri-Set Training System Induces a High Muscle Swelling with Short Time Commitment in Resistance-Trained Subjects: A Cross-Over Study. International Journal of Exercise Science. 2022;15(3):561-9.
23. Schoenfeld BJ, Pope ZK, Benik FM, Hester GM, Sellers J, Nooner JL, et al. Longer interset rest periods enhance muscle strength and hypertrophy in resistance-trained men. The Journal of Strength & Conditioning Research. 2016;30(7):1805-12. doi:10.1519/JSC.0000000000001272
24. De Almeida FN, Lopes CR, Conceição RM, Oenning L, Crisp AH, De Sousa NM, et al. Acute effects of the new method sarcoplasma stimulating training versus traditional resistance training on total training volume, lactate and muscle thickness. Frontiers in Physiology. 2019;10:579. doi:10.3389/fphys.2019.00579
25. Hirono T, Ikezoe T, Taniguchi M, Tanaka H, Saeki J, Yagi M, et al. Relationship between muscle swelling and hypertrophy induced by resistance training. The Journal of Strength & Conditioning Research. 2022;36(2):359-64. doi:10.1519/JSC.0000000000003478
26. Schoenfeld BJ. Potential mechanisms for a role of metabolic stress in hypertrophic adaptations to resistance training. Sports Medicine. 2013;43:179-94. doi:10.1007/s40279-013-0017-1
27. Wackerhage H, Schoenfeld BJ, Hamilton DL, Lehti M, Hulmi JJ. Stimuli and sensors that initiate skeletal muscle hypertrophy following resistance exercise. Journal of Applied Physiology. 2019;126(1):30-43. doi:10.1152/japplphysiol.00685.2018
28. Lopez P, Radaelli R, Taaffe DR, Newton RU, Galvão DA, Trajano GS, et al. Resistance training load effects on muscle hypertrophy and strength gain: systematic review and network meta-analysis. Medicine and Science in Sports and Exercise. 2021;53(6):1206-16. doi:10.1249/MSS.0000000000002585
29. Kubo K, Ikebukuro T, Yata H. Effects of 4, 8, and 12 repetition maximum resistance training protocols on muscle volume and strength. The Journal of Strength & Conditioning Research. 2021;35(4):879-85. doi:10.1519/JSC.0000000000003575
30. Lasevicius T, Ugrinowitsch C, Schoenfeld BJ, Roschel H, Tavares LD, De Souza EO, et al. Effects of different intensities of resistance training with equated volume load on muscle strength and hypertrophy. European Journal of Sport Science. 2018;18(6):772-80. doi:10.1080/17461391.2018.1450898
31. Campos GE, Luecke TJ, Wendeln HK, Toma K, Hagerman FC, Murray TF, et al. Muscular adaptations in response to three different resistance-training regimens: specificity of repetition maximum training zones. European Journal of Applied Physiology. 2002;88:50-60. doi:10.1007/s00421-002-0681-6
32. Burd NA, Andrews RJ, West DW, Little JP, Cochran AJ, Hector AJ, et al. Muscle time under tension during resistance exercise stimulates differential muscle protein sub-fractional synthetic responses in men. The Journal of Physiology. 2012;590(2):351-62. doi:10.1113/jphysiol.2011.221200
33. Wilk M, Zajac A, Tufano JJ. The Influence of Movement Tempo During Resistance Training on Muscular Strength and Hypertrophy Responses: A Review. Sports Medicine. 2021;51(8):1629-50. doi:10.1007/s40279-021-01465-2
34. Schoenfeld BJ, Ogborn DI, Krieger JW. Effect of repetition duration during resistance training on muscle hypertrophy: a systematic review and meta-analysis. Sports Medicine. 2015;45(4):577-85. doi:10.1007/s40279-015-0304-0
35. Baz-Valle E, Schoenfeld BJ, Torres-Unda J, Santos-Concejero J, Balsalobre-Fernández C. The effects of exercise variation in muscle thickness, maximal strength and motivation in resistance trained men. PLoS One. 2019;14(12):e0226989. doi:10.1371/journal.pone.0226989
36. de Vasconcelos Costa BD, Kassiano W, Nunes JP, Kunevaliki G, Castro-E-Souza P, Rodacki A, et al. Does Performing Different Resistance Exercises for the Same Muscle Group Induce Non-homogeneous Hypertrophy?. International Journal of Sports Medicine. 2021;42(09):803-11. doi:10.1055/a-1308-3674
37. Kassiano W, Nunes JP, Costa B, Ribeiro AS, Schoenfeld BJ, Cyrino ES. Does Varying Resistance Exercises Promote Superior Muscle Hypertrophy and Strength Gains? A Systematic Review. The Journal of Strength & Conditioning Research. 2022;36(6):1753-62. doi:10.1519/JSC.0000000000004258
38. de Freitas MC, Gerosa-Neto J, Zanchi NE, Lira

FS, Rossi FE. Role of metabolic stress for enhancing muscle adaptations: Practical applications. World Journal of Methodology. 2017;7(2):46-54. doi:10.5662/wjm.v7.i2.46
39. Mirzoev TM. Mechanotransduction for muscle protein synthesis via mechanically activated ion channels. Life. 2023;13(2):341. doi:10.3390/life13020341
40. Stožer A, Vodopivc P, Bombek LK. Pathophysiology of exercise-induced muscle damage and its structural, functional, metabolic, and clinical consequences. Physiological Research. 2020;69(4):565-98. doi:10.33549/physiolres.934371