Journal of Sport and Exercise Physiology
2023, 16(3):34-43

Original Article

The effect of a resistance training with and without blood flow restriction on cortisol, testosterone and testosterone-to-cortisol ratio in male judo players

Ali Nosrati Hashi, Lotfali Bolboli*, Sajjad Anoushiravani, Reza Farzizadeh

Department of Physical Education and Sports Sciences, Faculty of Educational Sciences and Psychology, Ardabil University, Ardabil, Iran

Abstract

Background and Purpose: Resistance exercise with new training methods such as blood flowrestriction, which is performed with lower intensities than the traditional method, can lead to different physiological responses. The purpose of this study was to investigate the effect of a period of upper body resistance exercise with blood flowrestriction on the level of cortisol, testosterone and the ratio of testosterone to cortisol in male judo players.

Materials and Methods: Thirty male judo players were divided into two groups of resistance training with and without blood flowrestriction. The training program consisted of 6 weeks of resistance training, 3 sessions per week. Resistance exercise with blood flow restriction included performing barbell biceps curl exercise at an intensity corresponding to 30% of one repetition maximum (1-RM) with cuff pressure about 120 to 160 mm Hg (around the proximal area of the arm) based on the systolic pressure of each person. For the traditional resistance training group (without vascular occlusion), subjects performed biceps exercise at an intensity corresponding to 75% of 1-RM. To measure testosterone and cortisol, first blood sample (5ml) was taken before training from the antecubital vein of the right hand. The second blood was taken 48 hours after the last training session of 6th week, the third blood sample was taken 24 hours before the start of the second 6-week activity and the fourth sample was taken 48 hours after the last training session (after 12 weeks).

Results: Between-group comparisons showed that cortisol (P=0.018), testosterone (P<0.001) and the ratio of testosterone to cortisol (P=0.001) were significantly different beuween two groups of resistance training with blood flow restriction and resistance training. Within-group comparisons showed that cortisol (P<0.001; d=1.76), testosterone (P<0.001; d=4.03) and the ratio of testosterone to cortisol (P<0.001; d=1.53) were increased significantly following resistance training with blood flow restriction and the percentage of changes were 38.48, 121.11 and 53.57%, respectively. Moreover, cortisol (P<0.001; d=1.27), testosterone (P<0.001; d=2.05) and the ratio of testosterone to cortisol (P=0.010; d=0.63) increased significantly in resistance training group by 25.35, 60.29 and 21.66 %, respectively.

Conclusion: According to the results of the research, it could be concluded that both traditional resistance training and resistance training with blood flow restriction can lead to increases in testosterone, cortisol and the ratio of testosterone to cortisol. Furthermore, according to the size of the effect and percentage of differences, it can be mention that effectiveness of resistance training along with blood flow restriction is more pronounced than traditional resistance training.

Keywords: Resistance Training, Blood Flow Restriction, Testosterone, Cortisol

How to cite this article: Nosrati Hashi A, Bolboli L, Anoushiravani S, Farzizadeh R. The effect of a resistance training with and without blood flow restriction on cortisol, testosterone and testosterone-to-cortisol ratio in male judo players. J Sport Exerc Physiol. 2023;16(3):34-43.

*Corresponding Author's E-mail: l_bolboli@uma.ac.ir
https://doi.org/10.48308/joeppa.2023.103854

Received: 15/03/2023 Revised: 26/05/2023 Accepted: 18/06/2023

Copyright: © 2023 by the authors. Submitted for possible open access publication under the terms and conditions of the Creative Commons Attribution (CC BY) license (https://creativecommons.org/licenses/by/4.0/).

نشریه فیزیولوژی ورزش و فعالیت بدنی
۱۴۰۲/ دوره ۱۶/ شماره ۳/ صفحه‌های ۳۴-۴۳

مقاله پژوهشی

تأثیر تمرین مقاومتی با و بدون محدودیت جریان خون بر سطح کورتیزول، تستوسترون و نسبت تستوسترون به کورتیزول در مردان جودوکار

علی نصرتی هشی، لطفعلی بلبلی*، سجاد انوشیروانی، رضا فرضی زاده
گروه تربیت بدنی و علوم ورزشی، دانشکدهٔ علوم تربیتی و روانشناسی، دانشگاه محقق اردبیلی، اردبیل، ایران

چکیده

زمینه و هدف: فعالیت ورزشی مقاومتی با روش‌های نوین تمرینی مانند محدودیت جریان خون که با شدت کمتری نسبت به روش سنتی انجام می‌شود، می‌تواند پاسخ‌های فیزیولوژیکی متفاوتی را در پی داشته باشد. هدف از پژوهش حاضر بررسی تأثیر یک نوبت فعالیت مقاومتی با و بدون محدودیت جریان خون بر سطح کورتیزول، تستوسترون و نسبت تستوسترون به کورتیزول در مردان جودوکار بود.

مواد و روش‌ها: ۳۰ مرد جودوکار به به دو گروه تمرین مقاومتی با و بدون محدودیت جریان تقسیم شدند. برنامه تمرینی شامل ۶ هفته و هر هفته ۳ جلسه در هفته تمرین قدرتی جلو بازو با هالتر بود. تمرین مقاومتي با محدودیت جریان خون شامل اجرای حرکت جلوبازو با شدت ۳۰ ٪ یک تکرار بیشینه (1-RM) همراه با فشار کاف (دور ناحیه نزدیک به تنه بازو) حدود ۱۲۰ تا ۱۶۰ میلی‌متر جیوه در نظر گرفته شد که فشار کاف ایجاد محدودیت برای جریان خون هر فرد به فشار سیستولی او بستگی داشت. برای گروه تمرین مقاومتی سنتی (بدون انسداد عروق) تمرین با شدت ۷۵ ٪ یک تکرار بیشینه انجام شد. برای سنجش تستوسترون و کورتیزول، اولین نمونه خون (۵ میلی‌لیتر) پیش از تمرین از ورید پیش آرنجی دست راست گرفته شد. دومین خونگیری ۴۸ ساعت پس از ۶ هفته اول، سومین خونگیری ۲۴ ساعت پیش از شروع فعالیت ۶ هفته دوم و چهارمین خونگیری پس از ۴۸ ساعت از آخرین جلسه تمرینی (پس از ۱۲ هفته) انجام گرفت.

نتایج: نتایج آزمون بین گروهی نشان داد کورتیزول (P=۰/۰۱۸)، تستوسترون (P<۰/۰۰۱) و نسبت تستوسترون به کورتیزول (P=۰/۰۰۱) در دو گروه تمرین مقاومتی همراه با محدودیت جریان خون و مقاومتی اختلاف معناداری داشت. نتایج آزمون درون گروهی نشان داد کورتیزول (P<۰/۰۰۱؛ d=۱/۷۶)، تستوسترون (P<۰/۰۰۱؛ d=۴/۰۳) و نسبت تستوسترون به کورتیزول (P<۰/۰۰۱؛ d=۱/۵۳) در گروه تمرین مقاومتی همراه با محدودیت جریان خون در مرحله پس‌آزمون در مقایسه با پیش‌آزمون به ترتیب ۳۸/۴۸، ۱۲۱/۱۱ و ۵۳/۵۷ درصد افزایش معناداری داشت. همچنین کورتیزول (P<۰/۰۰۱؛ d=۱/۲۷)، تستوسترون (P<۰/۰۰۱؛ d=۲/۰۵) و نسبت تستوسترون به کورتیزول (P=۰/۰۱۰؛ d=۰/۶۳) گروه تمرین مقاومتی در مرحله پس‌آزمون در مقایسه با پیش‌آزمون به ترتیب ۲۵/۳۵، ۶۰/۲۹ و ۲۱/۶۶ درصد افزایش معناداری داشت.

نتیجه‌گیری: با توجه به نتایج پژوهش می‌توان نتیجه گرفت که یک نوبت تمرین مقاومتی با و بدون محدودیت جریان خون توانسته منجر به افزایش تستوسترون، کورتیزول و نسبت تستوسترون به کورتیزول شود. همچنین با توجه به اندازه اثر و درصد اختلاف می‌توان گفت اثر گذاری تمرین مقاومتی به همراه محدودیت جریان خون در مقایسه با تمرین مقاومتی سنتی بیشتر بوده است.

واژه‌های کلیدی: تمرین مقاومتی، محدودیت جریان خون، تستوسترون، کورتیزول

نحوه استناد به این مقاله: نصرتی هشی ع، بلبلی ل، انوشیروانی س، فرضی زاده، رضا. تأثیر تمرین مقاومتی با و بدون محدودیت جریان خون بر سطح کورتیزول، تستوسترون و نسبت تستوسترون به کورتیزول در مردان جودوکار.نشریهٔ فیزیولوژی ورزش و فعالیت بدنی.۱۴۰۲؛۱۶(۳):۳۴-۴۳.

* رایانامهٔ نویسندهٔ مسئول: l_bolboli@uma.ac.ir

تاریخ دریافت: ۱۴۰۱/۱۲/۲۴ تاریخ ویرایش: ۱۴۰۲/۰۳/۰۵ تاریخ پذیرش: ۱۴۰۲/۰۳/۲۸

مقدمه

تمرین مقاومتی برای حفظ و ارتقای تودۀ عضلانی و قدرت توصیه می‌شود (۱). بر اساس شواهد پژوهش‌های در دسترس، کارایی تمرینات مقاومتی به تغییرات هورمونی برای بهبود قدرت و تودۀ عضلانی بستگی دارد. بر اساس تحقیقات پیشین، شدت ۷۰ تا ۸۰ درصد یک تکرار بیشینه (1RM) تمرینات مقاومتی برای افزایش قدرت و اندازۀ عضلانی و همچنین تغییر در هورمون‌های مؤثر بر آنها گزارش شده است (۲، ۳). با این همه، نتایج متفاوتی پس از برنامه‌های ورزشی مختلف در صورت تغییرات کوتاه‌مدت و بلندمدت هورمون‌های مرتبط با افزایش تودۀ عضلانی و قدرت گزارش شده است. به‌نظر می‌رسد تمرینات مقاومتی با شدت بالا با تغییرات چشمگیری در هورمون‌های آنابولیک کاتابولیک همراه است. تعادل بین هورمون‌های آنابولیک کاتابولیک کورتیزول و تستوسترون کاربرد مهمی در نوبت‌های عملکردی و بازیافت پس از تمرینات مقاومتی دارد (۱). کورتیزول یک هورمون کاتابولیک و مهم‌ترین هورمون استرسی در بدن است. ولی افزایش آن در درازمدت مشکلاتی را ایجاد می‌کند که مهم‌ترین آنها آسیب رساندن به دستگاه ایمنی و پروتئین‌هاست. بر اساس نتایج تحقیقات تغییرات کورتیزول به شدت و مدت ورزش بستگی دارد (۴). افزون‌بر این، سرعت رشد سلول‌های عضلانی به فعالیت هورمون‌های استروئیدی جنسی، به‌ویژه تستوسترون بستگی دارد (۵). نتایج پژوهش‌ها در مورد پاسخ حاد هورمونی به ورزش مقاومتی نشان می‌دهد که سطح تستوسترون در حین و پس از تمرینات مقاومتی افزایش می‌یابد (۶). کریمر (۷) در این باره اظهار کرد که اگر فاصلۀ استراحت بین نوبت‌های تمرین مقاومتی (که با ۸۰ درصد 1RM در شش نوبت و ۱۰ تکرار در هر نوبت انجام می‌گیرد) کمتر از یک دقیقه باشد، می‌تواند به افزایش شایان توجه ترشح تستوسترون منجر شود (۷). تستوسترون یک هورمون آنابولیک است که ساخت پروتئین دیرهنگام را تحریک می‌کند و نقش مهمی در رشد و نگهداری بافت عضلانی دارد. با وجود توصیه‌های متعدد برای انجام تمرینات مقاومتی با شدت بالا (بیش از ۸۰ درصد 1RM)، برخی افراد تمایلی به بلند کردن وزنه‌های سنگین ندارند یا نمی‌توانند. در دهه‌های اخیر، تمرین با محدودیت جریان خون (blood flow restriction: BFR) به‌عنوان جایگزینی برای تمرینات مقاومتی سنتی در محیط‌های تمرینی رایج شده است. به این ترتیب، یک کاف پنوماتیک یا باند الاستیک برای کاهش جریان خون و مسدود کردن بازگشت وریدی استفاده می‌شود که سبب ایجاد حالت ایسکمیک در بافت عضلانی می‌شود. تمرین مقاومتی دارای بار مکانیکی بالا و فشار سوخت‌وسازی کم است (۸). با این همه، در طول BFR، فشار سوخت‌وسازی افزایش می‌یابد و سازگاری‌های مشابه با تمرینات سنگین ایجاد می‌کند. بنابراین تمرینات مقاومتی کم‌بار با BFR برای افزایش حجم عضلانی توصیه می‌شود. تحقیقات نشان داده‌اند که تمرین مقاومتی با BFR سبب ایجاد هیپرتروفی و افزایش اندازه و قدرت عضلات می‌شود (۹). برخی سازوکارها برای این سازگاری‌ها پیشنهاد شده‌اند، از جمله افزایش جذب تارهای سریع انقباض نوع دو، تورم سلول‌های عضلانی، تولید گونه‌های فعال اکسیژن مانند اکسید نیتریک، فعال‌سازی مسیرهای آنابولیک (۱۰) و افزایش ترشح کاتکولامین و هورمون‌های آنابولیک مانند هورمون رشد (GH) و تستوسترون به‌دلیل سوخت‌وساز بی‌هوازی و تجمع لاکتات (۱۱). افزایش هورمون رشد و تستوسترون پس از تمرین با BFR گزارش شده است (۱۲). این هورمون‌های آنابولیک رشد عضلانی و قدرت عضلانی را تقویت می‌کنند و در پی آن استقامت عضلانی را افزایش می‌دهند. بنابراین تمرین BFR شاید سازگاری‌های ویژه‌ای را در عضلات فعال ایجاد کند.

شواهد معتبری وجود دارد که نشان می‌دهد میزان هیپرتروفی و افزایش قدرت عضلانی پس از شدت تمرین مقاومتی (با BFR) نزدیک به ۲۰ درصد 1RM برابر با تمرین مقاومتی شدید (شدت تقریباً ۸۰ درصد از 1RM)، ولی بدون محدودیت

جریان خون است (۱۳). در این زمینه تاکارادا و همکاران نشان دادند که تمرینات مقاومتی با شدت کم و جریان خون محدود و همچنین پیاده‌روی با جریان خون محدود به‌طور چشمگیری به هایپرتروفی عضلانی و افزایش قدرت عضلانی در مقایسه با تمرینات با تنش بالا بدون محدودیت عروقی منجر می‌شود. همچنین بر اساس نتایج پژوهش‌ها سازوکار افزایش قدرت در تمرینات مقاومتی همراه با محدودیت عروقی با سازوکار افزایش قدرت عضلانی در اثر تمرینات بدون محدودیت عروق متفاوت است. آنها افزایش قدرت پس از تمرینات مقاومتی BFR را به هایپرتروفی عضلانی نسبت دادند و سهم سازگاری عصبی را در افزایش قدرت پس از این تمرینات ناچیز در نظر گرفتند (۱۴). از آنجایی که بیشترین ثبات در ساختار عضلهٔ اسکلتی پس از تمرینات مقاومتی، در زمان استراحت پس از تمرین و در دوران بازیافت اتفاق می‌افتد، به‌نظر می‌رسد که تغییر در ساختار عضلانی پس از تمرینات مقاومتی BFR که در آن جریان خون کاهش می‌یابد، بیشتر است. بر پایهٔ بررسی‌های پژوهشگر، پژوهش‌های محدودی در مورد سازگاری طولانی‌مدت کورتیزول و تستوسترون به‌دنبال تمرینات مقاومتی BFR انجام گرفته است. ازاین‌رو هدف از پژوهش حاضر بررسی تأثیر یک نوبت فعالیت مقاومتی اندام فوقانی همراه با محدودیت جریان خون بر سطح کورتیزول، تستوسترون و نسبت تستوسترون به کورتیزول در مردان جودوکار بود.

روش پژوهش

روش پژوهش حاضر از نوع مداخله‌ای (نیمه‌تجربی) بود.

نمونه‌های پژوهش: جامعهٔ آماری پژوهش مردان جودوکار (دست‌کم سه سال سابقهٔ عضویت در تیم‌های باشگاهی) شهرستان تهران بودند. معیارهای ورود به پژوهش شامل داشتن ۲۰ تا ۳۲ سال سن، مصرف نکردن سیگار، نداشتن بیماری قلبی- عروقی، استفاده نکردن از داروهای مکمل و معیارهای خروج از پژوهش شامل مشاهدهٔ هرگونه آسیب‌دیدگی، اختلال قلبی- عروقی در حین تمرینات قدرتی، مشاهدهٔ هرگونه مصرف مکمل در نوبت تمرینات و شرکت نامنظم در تمرینات بود. نمونهٔ آماری با استفاده از نرم‌افزار G*Power برای دستیابی به توان آماری ۰/۸ و اندازهٔ اثر ۰/۸ برای هر گروه ۱۵ نفر در نظر گرفته شد. ۳۰ مرد جودوکار به روش نمونه‌گیری در دسترس و به‌طور تصادفی در دو گروه، گروه اول (تمرین با محدودیت جریان خون)، گروه دوم (تمرین بدون محدودیت جریان خون) تقسیم شدند.

متغیرهای مخدوش‌کننده: سن، قد، وزن، سابقهٔ تمرینی و شاخص توده بدنی از عوامل مخدوش‌کنندهٔ اصلی پژوهش حاضر بودند که با همسان‌سازی گروه‌ها کنترل شد (جدول ۱). در خصوص سابقهٔ تمرینی از افرادی که دست‌کم سه سال فعالیت ورزشی در تیم‌های باشگاهی داشتند، استفاده شد.

روش اجرای پژوهش: دو هفته پیش از شروع جلسات تمرین، در دو جلسه آزمودنی‌ها حرکات با هالتر را به‌منظور آمادگی اولیه و آشنایی با برنامهٔ پژوهش (تمرین با محدودیت جریان خون)، در سالن بدنسازی اجرا کردند. یک هفته پیش از شروع برنامهٔ تمرینی اندازه‌گیری‌های آنتروپومتریک شامل سن، قد، وزن و نمایهٔ تودهٔ بدن، متغیرهای فیزیولوژیکی شامل فشار سیستولی و دیاستولی و یک تکرار بیشینه انجام گرفت. پس از تکمیل برگه‌های پرسشنامهٔ پزشکی و آمادگی شرکت در فعالیت بدنی و رضایت‌کتبی همراه با تعهدات اخلاقی متقابل آزمودنی‌ها و پژوهشگر و با توجه به شرایط گزینش داوطلبان که خود شامل رعایت رژیم غذایی، عدم مصرف هرگونه دارو و مکمل، عدم استعمال دخانیات، نداشتن سابقهٔ بیماری و عفونت اثرگذار بر عوامل ایمنی و آشنایی با وزنه بود، آمادگی خود را برای شرکت در برنامهٔ تمرین اعلام کردند. بدین منظور از همهٔ آزمودنی‌ها خواسته شد دو روز پیش از خون‌گیری فعالیت سنگین بدنی انجام ندهند. پیش از اجرای برنامه‌های تمرینی، برای تعیین غلظت سرمی شاخص‌های کورتیزول، تستوسترون و نسبت تستوسترون به کورتیزول نمونه‌های خونی از آزمودنی‌ها گرفته شد.

تمرین مقاومتی همراه با محدودیت جریان خون

(تمرین با شدت ۳۰ درصد یک تکرار بیشینه همراه با فشار کاف (دور ناحیۀ نزدیک به تنۀ بازو)) فشار در نظر گرفته‌شده برای ایجاد محدودیت جریان خون حدود ۱۲۰ تا ۱۶۰ میلی‌متر جیوه بود که به فشار سیستولی هر فرد بستگی داشت.

فشار انسداد کامل شریانی با استفاده از فرمول زیر برای بالاتنه محاسبه شد. در زمان تمرین با باد کردن کاف‌های تمرینی جریان خون عضو محدود شده و در زمان استراحت باد آن‌ها خالی می‌شد تا جریان خون مجدد برقرار شود. ازاین‌رو مدت استراحت بین هر حرکت حدود یک دقیقه طول می‌کشید. قطر کاف مورد استفاده پنج سانتی‌متر بود، چراکه این فرمول‌ها برای کاف‌های با عرض پنج سانتی‌متر مهیا شده‌اند. در این فرمول SBP فشار خون سیستول و DBP فشار خون دیاستول است.

انسداد جریان خون بالاتنه=

(SBP)۰/۵۱۴ + (DBP)۰/۳۳۹ + (قطر بازو) ۱/۴۶۱ + ۱۷/۲۳۶

برای گروه تمرین مقاومتی سنتی (بدون انسداد عروق) تمرین با شدت ۷۵ درصد یک تکرار بیشینه انجام گرفت. برای محاسبۀ 1RM، ابتدا سنگین‌ترین وزنه‌ای که فرد احساس می‌کند می‌تواند جابه‌جا کند، انتخاب شد. سپس آزمودنی‌ها با وزنۀ انتخاب‌شده شروع به انجام حرکات موردنظر کردند. در این مرحله اگر فرد تنها یک‌بار می‌توانست حرکت را انجام دهد، آن وزنه برابر با 1RM در نظر گرفته می‌شد. ولی اگر حرکت با وزنۀ انتخاب‌شده را بیشتر از یک‌بار انجام می‌داد، با قرار دادن تعداد تکرار و مقدار وزنه در فرمول زیر 1RM تعیین می‌شد:

1RM = [وزنه مورد استفاده × (۱ + (۳۰ ÷ تعداد تکرار)]

به آزمودنی‌ها توصیه شد که در مدت زمان انجام پژوهش، فعالیت ورزشی دیگری به‌غیر از برنامۀ تمرینی ارائه‌شده انجام نداده و رژیم غذایی خود را تغییر ندهند. پس از شش هفته تمرین و ۴۸ ساعت پس از آخرین جلسۀ تمرینی خون‌گیری گرفته شد. در ادامه پس از ۱۰ روز استراحت، خون‌گیری مجدد تکرار شد و پس از ۲۴ ساعت گروهی که تمرینات قدرتی را به‌همراه محدودیت جریان خون در مرحلۀ اول انجام دادند، تنها تمرینات قدرتی را انجام دادند و گروهی که تنها تمرینات قدرتی را انجام دادند، به مدت شش هفته تمرینات قدرتی را به‌همراه محدودیت جریان خون انجام دادند که پس از ۴۸ ساعت از اتمام آخرین جلسۀ تمرینی، خون‌گیری تکرار شد.

برنامۀ تمرینی: تمرین در نظر گرفته‌شده برای هر گروه، شامل شش هفته و هر هفته سه جلسه و روی هم رفته ۱۸ جلسۀ تمرین قدرتی با هالتر بود که پس از ظهر در سالن ورزشی اجرا شد. جلسۀ تمرین با پنج دقیقه حرکات کششی-نرمشی دست به‌منظور گرم کردن شروع شد. تمرین در گروه انسدادی به این صورت بود که ابتدا به‌وسیلۀ یک تورنیکت لاستیکی از پیش طراحی‌شده در قسمت فوقانی به دور نزدیک به تنۀ هر بازو بسته شد. برای هر دو گروه سه نوبت ده‌تایی با استراحت یک دقیقه‌ای بین نوبت‌ها در نظر گرفته شد. گروه با انسداد عروق دست با فشار کاف ۱۲۰ تا ۱۶۰ میلی‌متر جیوه با ۳۰ درصد یک تکرار بیشینه (۱۵) حرکات جلو بازو با هالتر و گروه دیگر تمرین مقاومتی بدون انسداد عروق، با ۷۵ درصد یک تکرار بیشینه حرکات جلو بازو با هالتر را انجام دادند (۱۶).

روش‌های آزمایشگاهی: در این پژوهش چهار مرحلۀ خون‌گیری به‌عمل آمد. برای سنجش تستوسترون و کورتیزول پیش از شروع برنامۀ تمرینی و پس از ۱۲ تا ۱۴ ساعت ناشتایی از ورید پیش‌آرنجی دست راست هر آزمودنی در وضعیت نشسته و در حالت استراحتی پنج میلی‌لیتر خون گرفته شد. نخستین خون‌گیری پیش از شروع تمرین انجام گرفت. دومین خون‌گیری پس از

جدول ۱. شاخص توصیفی جودوکاران در دو گروه تمرین مقاومتی با و بدون محدودیت جریان خون

متغیر	گروه تمرین مقاومتی به‌همراه BFR	تمرین مقاومتی	سطح معناداری
سن (سال)	۲۶/۳۳ ± ۳/۵۲	۲۵/۲۳ ± ۳/۱۸	۰/۲۱۰
قد (سانتی‌متر)	۱۷۷/۲۳ ± ۶/۶۶	۱۷۶/۷۶ ± ۶/۷۲	۰/۷۸۸
وزن (کیلوگرم)	۸۲/۹۰± ۸/۱۷	۸۴/۷۰ ± ۷/۲۴	۰/۳۷۱

شش هفتهٔ اول و پس از ۴۸ ساعت از آخرین جلسهٔ تمرینی از هر آزمودنی در شرایط کاملاً مشابه صورت گرفت. خون‌گیری سوم ۲۴ ساعت پیش از شروع فعالیت شش هفته دوم و مرحلهٔ چهارم پس از شش هفتهٔ دوم و پس از ۴۸ ساعت از آخرین جلسهٔ تمرینی انجام گرفت. نمونه‌های خونی به‌منظور جلوگیری از لخته شدن خون، نمونه‌ها بلافاصله به درون لوله‌های FL ساخت ایتالیا انتقال داده شد. سپس برای جداسازی پلاسما، نمونه‌ها به مدت پنج دقیقه و با سرعت ۳۰۰۰ دور در دقیقه در دستگاه سانتریفیوژ (Tajhiz Orom) قرار داده شد و تا پایان پژوهش در دمای منفی ۲۰ درجه سانتی‌گراد نگهداری شد. تستوسترون و کورتیزول با استفاده از کیت Roche ساخت آلمان (حساسیت ۸۴/۹۷ و دقت ۹۸/۸۴ درصد) و روش الکتروکمیلومینسانس (ECL) اندازه‌گیری شد.

جدول ۲. تغییرات بین‌گروهی مؤلفه‌های کورتیزول، تستوسترون و نسبت تستوسترون به کورتیزول در دو گروه تمرین مقاومتی با و بدون محدودیت جریان خون

متغیرها	مجموع‌میانگین	df	مجذورمیانگین	F	سطح‌معناداری	توان آماری
کورتیزول (میکروگرم بر دسی‌لیتر)	۱۷/۱۷۵	۱	۱۷/۱۷۵	۵/۹۳	۰/۰۱۸	۰/۶۶۸
تستوسترون (نانوگرم بر میلی‌لیتر)	۳۹/۶۳۴	۱	۳۹/۶۳۴	۳۲/۷۵	P<۰/۰۰۱	۱/۰۰
نسبت تستوسترون به کورتیزول	۰/۲۵۶	۱	۰/۲۵۶	۱۲/۳۳	۰/۰۰۱	۰/۹۳۲

تحلیل آماری: از آزمون شاپیروویلک برای بررسی وضعیت توزیع داده‌ها و برای مقایسهٔ بین‌گروهی از آزمون کوواریانس و برای مقایسهٔ درون‌گروهی از آزمون تی وابسته استفاده شد. نرم‌افزار مورد استفاده اکسل نسخهٔ ۲۰۱۶ و SPSS نسخهٔ ۲۴ در سطح معناداری P≤۰/۰۵ بود.

نتایج

نتایج نشان داد هیچ‌یک از شاخص‌های توصیفی سن، قد، وزن و شاخص تودهٔ بدنی در دو گروه تمرین مقاومتی با و بدون محدودیت جریان خون اختلاف معناداری را نشان نداد (P>۰/۰۵).

نتایج نشان داد مؤلفه‌های کورتیزول،

جدول ۳. تغییرات درون‌گروهی مؤلفه‌های کورتیزول، تستوسترون و نسبت تستوسترون به کورتیزول در دو گروه تمرین مقاومتی با و بدون محدودیت جریان خون

گروه‌ها	متغیرها	t	df	سطح‌معناداری
گروه تمرین مقاومتی	کورتیزول (میکروگرم بر دسی‌لیتر)	-۷/۰۴	۲۹	P<۰/۰۰۱
	تستوسترون (نانوگرم بر میلی‌لیتر)	-۱۰/۶۵	۲۹	P<۰/۰۰۱
	نسبت تستوسترون به کورتیزول	-۲/۷۵	۲۹	۰/۰۱۰

ادامه جدول ۳. تغییرات درون‌گروهی مؤلفه‌های کورتیزول، تستوسترون و نسبت تستوسترون به کورتیزول در دو گروه تمرین مقاومتی با و بدون محدودیت جریان خون

گروه‌ها	متغیرها	t	df	سطح‌معناداری
گروه تمرین مقاومتی با BFR	کورتیزول (میکروگرم بر دسی‌لیتر)	-۹/۳۵	۲۹	P<۰/۰۰۱
	تستوسترون (نانوگرم بر میلی‌لیتر)	-۱۷/۶۹	۲۹	P<۰/۰۰۱
	نسبت تستوسترون به کورتیزول	-۵/۶۴	۲۹	P<۰/۰۰۱

تستوسترون و نسبت تستوسترون به کورتیزول در مرحله پیش‌آزمون و پس‌آزمون در دو گروه تمرین مقاومتی با و بدون محدودیت جریان خون در آزمون شاپیرو-ویلک اختلاف معناداری نداشت (P>۰/۰۵). ازاین‌رو می‌توان گفت متغیرهای پژوهش حاضر از توزیع طبیعی برخوردار است.

با استفاده از آزمون لون مساوی بودن واریانس‌ها ارزیابی شد. نتایج این آزمون نشان داد که واریانس کورتیزول (F=۰/۴۵ ؛P=۰/۵۰۳)، تستوسترون (F=۰/۷۴ ؛P=۰/۷۸۷) و نسبت تستوسترون به کورتیزول (F=۰/۰۱ ؛P=۰/۹۱۹) در بین گروه‌ها همگن است. نتایج آزمون بین‌گروهی نشان داد کورتیزول (P=۰/۰۱۸)، تستوسترون (P<۰/۰۰۱) و نسبت تستوسترون به کورتیزول (P=۰/۰۰۱) در دو گروه تمرین مقاومتی همراه با محدودیت جریان خون و مقاومتی اختلاف معناداری داشت (جدول ۳).

نتایج آزمون درون‌گروهی نشان داد کورتیزول (P<۰/۰۰۱ ؛d=۱/۷۶)، تستوسترون (P<۰/۰۰۱ ؛□=۴/۰۳) و نسبت تستوسترون به کورتیزول (P<۰/۰۰۱ ؛d=۱/۵۳) در گروه تمرین مقاومتی همراه با محدودیت جریان خون در مرحلهٔ پس‌آزمون در مقایسه با پیش‌آزمون به‌ترتیب ۳۸/۴۸، ۱۲۱/۱۱ و ۵۳/۵۷ درصد افزایش معناداری داشت (جدول ۴). همچنین کورتیزول (P<۰/۰۰۱ ؛d=۱/۲۷)، تستوسترون (P<۰/۰۰۱ ؛d=۲/۰۵) و نسبت تستوسترون به کورتیزول (P=۰/۰۱۰ ؛d=۰/۶۳) گروه تمرین مقاومتی در مرحلهٔ پس‌آزمون در مقایسه با پیش‌آزمون به‌ترتیب ۲۵/۳۵، ۶۰/۲۹ و ۲۱/۶۶ درصد افزایش معناداری داشت (جدول ۴). با توجه به اندازهٔ اثر و درصد اختلاف همهٔ متغیرها مشخص شد که تمرین مقاومتی به‌همراه محدودیت جریان خون در مقایسه با تنها تمرین مقاومتی اثر بیشتری داشته است.

بحث و نتیجه‌گیری

هدف از پژوهش حاضر بررسی تأثیر یک نوبت فعالیت مقاومتی اندام فوقانی همراه با محدودیت جریان خون بر سطح کورتیزول، تستوسترون و نسبت تستوسترون به کورتیزول در مردان جودوکار بود. یک نوبت تمرین مقاومتی با و بدون محدودیت جریان خون به افزایش تستوسترون، کورتیزول و نسبت تستوسترون به کورتیزول منجر شد. با توجه به اندازهٔ اثر و درصد اختلاف تمامی متغیرها مشخص شد که تمرین مقاومتی به‌همراه محدودیت جریان خون در مقایسه با تنها تمرین مقاومتی اثر بیشتری بر کورتیزول، تستوسترون و نسبت تستوسترون به کورتیزول داشته است. وکیلی و همکاران (۱۷)، مادرام و همکاران (۱۸)، فرای و همکاران (۱۹)، کیم و همکاران (۲۰) و فوجیتا و همکاران (۲۱) نشان دادند که پس از یک نوبت تمرین مقاومتی با و بدون محدودیت جریان خون سطح کورتیزول و تستوسترون افزایش پیدا می‌کند که با نتایج پژوهش حاضر همسوست و با نتایج محمدی و همکاران (۲۲)، نورسته و همکاران (۲۳) در زمینهٔ افزایش تستوسترون و نسبت تستوسترون به کورتیزول مغایر است. در تبیین نتایج پژوهش حاضر می‌توان گفت که عوامل مؤثر بر پاسخ تستوسترون به ورزش عبارت‌اند از: شدت، حجم، مدت زمان، استراحت، گروه‌های عضلانی فعال، تمرین و تجربهٔ تمرین مقاومتی. در مطالعه‌ای گزارش شده است که تمرینات مقاومتی و تمرینات با شدت بالا سبب

افزایش غلظت تستوسترون در مردان می‌شود (۲۴). کوک و همکاران (۲۰۱۴) گزارش کردند میزان تستوسترون به‌همراه فعالیت مقاومتی با محدودیت جریان خون افزایش معناداری داشت و مقدار آن در حد بالایی بود، ولی میزان کورتیزول افزایش چشمگیری نداشت (۲۵). در پژوهشی محمدی و همکاران (۲۲) اثر فعالیت مقاومتی با شدت کم به‌همراه محدودیت جریان خون بر سطوح سرمی کورتیزول و تستوسترون مردان جوان را بررسی کردند. نتایج افزایش معنادار کورتیزول و تستوسترون را در هر دو گروه فعالیت مقاومتی با محدودیت با شدت پایین و فعالیت مقاومتی بدون محدودیت با شدت بالا نسبت به گروه کنترل نشان داد. سازوکار احتمالی پشت افزایش حاد تستوسترون با تمرین با شدت کم و BFR با بازیافت فعال شاید به‌دلیل افزایش لاکتات و غلظت کاتکولامین‌ها باشد که به‌طور معمول در طول تمرین افزایش می‌یابد که سلول‌های لیدیگ بیضه را برای افزایش تستوسترون تحریک می‌کند. نورسته و همکاران (۲۰۲۰) نشان دادند که کورتیزول پس از انجام تمرینات مقاومتی با و بدون محدودیت جریان خون تغییر معناداری نداشته است که با نتایج حاضر ناهمسوست (۲۳). یکی از دلایل ناهمسو بودن نتایج، تفاوت‌های فردی و تعداد جلسات کم در تحقیق نورسته و همکاران (۲۰۲۰) و تعداد جلسات طولانی استفاده از تمرین مقاومتی با و بدون محدودیت جریان خون است. در پژوهش مستر پیر و همکاران (۲۰۱۰) نشان داده شد که تفاوت‌های فردی در سطوح تستوسترون به‌طور مثبتی با تفاوت‌ها در غلظت کورتیزول در مردان و زنان همبستگی دارد؛ یعنی با افزایش یکی دیگری نیز افزایش می‌یابد که با نتایج حاضر همسوست.

کورتیزول به‌عنوان یک هورمون کاتابولیک سبب افزایش لیپولیز در بافت چربی و تجزیهٔ پروتئین‌ها و کاهش سنتز پروتئین در سلول‌های عضلانی می‌شود. همچنین موجب افزایش آزادسازی لیپیدها و اسیدهای آمینه در جریان خون می‌شود. این هورمون دارای اثر کاتابولیک بر روی پروتئین‌های تارچه‌هاست و سنتز پروتئین را مهار می‌کند (۵). افزون‌بر این، تأثیرات کاتابولیک کورتیزول بر تارهای عضلانی نوع دوم بیشتر و طولانی‌تر از نوع اول است. بنابراین تحریک اعصاب محیطی تارهای عضلانی تندانقباض در طول تمرین مقاومتی BFR با شدت کم می‌تواند از دلایل افزایش کورتیزول پس از این تمرینات باشد (۲۶). همچنین کورتیزول در مرحلهٔ بین ورود به گلوکز و تجزیه‌وتحلیل نهایی آن، به‌طور مستقیم مصرف گلوکز و در نتیجه میزان مصرف گلوکز توسط سلول‌های بدن را کاهش می‌دهد. بر پایهٔ نتایج تحقیقات پیشین، سطح سرمی کورتیزول پس از تمرینات مقاومتی به‌طور چشمگیری افزایش می‌یابد. سازوکارهای زیادی در بدن وجود دارد که سبب تغییر در غلظت هورمون کورتیزول می‌شود. شدت فعالیت‌های ورزشی و استرس‌های ذهنی از قوی‌ترین و تأثیرگذارترین محرک‌ها بر میزان ترشح این هورمون هستند. همچنین عوامل فیزیولوژیکی و تغییرات حدودی و تغییرات مربوط به غذا خوردن و دما بر ترشح هورمون کورتیزول تأثیر می‌گذارد. به‌نظر می‌رسد یکی دیگر از دلایل افزایش غلظت کورتیزول در شرایط استرس‌زا و فشارهای بدنی، تغییر در فعالیت محور هیپوتالاموس- هیپوفیز- آدرنال باشد. پژوهشگران معتقدند بستن کاف و محدود کردن فشار خون در تمرینات BFR با ایجاد هیپوکسی و اسیدوز و افزایش سطح لاکتات خون سبب افزایش ترشح هورمون کورتیزول می‌شود (۱۲). ازاین‌رو افزایش گلیکولیز بی‌هوازی دلیلی برای افزایش سطح کورتیزول در تمرینات مقاومتی به‌همراه محدودیت جریان خون به‌دلیل محدود کردن فشار خون و در تمرینات مقاومتی سنتی به‌سبب تمرینات با شدت بالاست. با این همه، بسیاری از شواهد پژوهش‌های در دسترس نشان می‌دهد که تنها تمرین قدرتی با شدت زیاد پاسخ کورتیزول را تحریک می‌کند و تمرین با شدت متوسط تأثیری ندارد. در این زمینه راستدا و همکاران (۲۰۰۰) با مطالعهٔ واکنش هورمون‌ها به تمرینات قدرتی به این نتیجه رسیدند که

هورمون‌هایی مانند تستوسترون و کورتیزول پس از فعالیت‌هایی با شدت زیاد نسبت به تمرین با شدت متوسط افزایش معناداری پیدا می‌کند (۲۶). از سویی تفاوت‌های ژنتیکی و استرس طولانی‌مدت می‌تواند الگوی ترشح کورتیزول را در افراد تغییر دهد. همچنین نسبت مقادیر تستوسترون به کورتیزول سرم برای ارزیابی پاسخ و پیشگویی عملکرد تمرین به‌کار می‌رود، به‌طوری‌که افزایش بیشتر از ۳۰ درصد این مقدار نسبت به حالت اولیه نشان‌دهندهٔ برتری فرایند آنابولیکی است. کاهش بیشتر از ۳۰ درصد این مقدار نسبت به حالت اولیه نشان‌دهندهٔ افزایش شرایط کاتابولیکی است. انجام فعالیت‌های سنگین و با محدودیت بدون توجه به نوبت‌های کافی بازگشت به حالت اولیه می‌تواند به برهم خوردن تعادل نسبت به تستوسترون به کورتیزول منجر شود. همچنین کاهش یا افزایش T/C به‌عنوان یکی از نشانه‌های بالا یا پایین بودن حجم تمرین و خستگی ورزشکاران در نظر گرفته می‌شود که این کاهش یا افزایش ممکن است در اثر افزایش یا کاهش کورتیزول یا کاهش یا افزایش تستوسترون به‌وجود آید. بنابراین با نتایج پژوهش حاضر همسو بود، چراکه همان‌گونه‌که تستوسترون افزایش داشت، کورتیزول نیز افزایش داشته است. در پژوهشی دیگر اسلامی و همکاران (۲۷) به مقایسهٔ پاسخ‌های حاد هورمونی ناشی از فعالیت مقاومتی با شدت بالا و پایین فعالیت مقاومتی با محدودیت جریان خون در کشتی‌گیران جوان پرداختند. نتایج کاهش نسبت تستوسترون به کورتیزول را در دو گروه فعالیت مقاومتی با شدت بالا و شدت پایین نشان داد، درحالی‌که در گروه فعالیت مقاومتی با شدت پایین به‌همراه محدودیت جریان خون افزایش معناداری داشت. نتایج این پژوهش از حیث فعالیت مقاومتی با محدودیت جریان خون با یافته‌های این پژوهش همسو بود، چراکه هر دو بررسی افزایش معنادار را تجربه کرد.

از طرفی، پژوهش حاضر دارای محدودیت‌های بود که از جمله می‌توان به خستگی ناشی از تمرین، انتخاب روش نمونه‌گیری در دسترس، و شرایط کرونایی اشاره کرد. با توجه به نتایج پژوهش می‌توان نتیجه گرفت که یک نوبت تمرین مقاومتی با و بدون محدودیت جریان خون توانسته به افزایش تستوسترون، کورتیزول و نسبت تستوسترون به کورتیزول منجر شود. همچنین با توجه به اندازه اثر و درصد اختلاف می‌توان گفت اثرگذاری تمرین مقاومتی به‌همراه محدودیت جریان خون در مقایسه با تمرین مقاومتی سنتی بیشتر بوده است.

تشکر و قدردانی

از همه افرادی که در این پژوهش شرکت کردند، کمال تشکر و قدردانی را داریم. در اجرای پژوهش ملاحظات اخلاقی مطابق با شیوه‌نامه کمیته اخلاق دانشگاه محقق اردبیلی در سال ۱۴۰۱ با کد اخلاق IR.UMA.REC.۱۴۰۱.۰۵۱ در نظر گرفته شده و تمامی اصول اخلاقی در این مقاله لحاظ شده است.

حامی/حامیان مالی

هیچ‌گونه کمک مالی از سازمان‌های تأمین‌کنندهٔ مالی در بخش‌های عمومی و دولتی، تجاری، غیرانتفاعی دانشگاه یا مرکز تحقیقات دریافت نشده است.

مشارکت نویسندگان

تمام نویسندگان در آماده‌سازی این مقاله مشارکت یکسان داشته‌اند.

تعارض منافع

بنابر اظهار نویسندگان، این مقاله تعارض منافع ندارد.

منابع

1. Rokkam MP, Gora O, Konda MR, Koushik A. A proprietary blend of Sphaeranthus indicus flower head and Mangifera indica bark extracts increases muscle strength and enhances endurance in young male volunteers: a randomized, double-blinded, placebo-controlled trial. Food & Nutrition Research. 2023;4(6):52-66.
2. Sadeghian H, Siahkohian M, Beni MA, Bolboli L. Comparison of eight weeks of resistance training and high-intensity in-termittent aerobic training on the ex-

Frontiers in physiology. 2019;10:533.
16. Porsesh M, Habibi A, Ahmadi Barati S, Fatemi SR. Comparison of the Effect of 6 Weeks Resistance Training with and without Vascular Occlusion, on Serum Levels of CRP and LDH in Active Girls. SSU_Journals. 2016;24(9):706-15.
17. Vakili J, Pakzad F, Nikokheslat S. The effect of four weeks of resistance training with and without blood flow restriction on levels of anabolic and catabolic hormonal markers in sedentary males. Research on Biosciences and Physical Actiuity. 2023;4(7):19-29. [In Persain]
18. Madarame H, Sasaki K, Ishii N. Endocrine responses to upper-and lower-limb resistance exercises with blood flow restriction. Acta Physiologica Hungarica. 2010;97(2):192-200.
19. Fry CS, Glynn EL, Drummond MJ, Timmerman KL, Fujita S, Abe T, et al. Blood flow restriction exercise stimulates mTORC1 signaling and muscle protein synthesis in older men. Journal of applied physiology. 2010;108(5):1199-209.
20. Kim E, Gregg LD, Kim L, Sherk VD, Bemben MG, Bemben DA. Hormone responses to an acute bout of low intensity blood flow restricted resistance exercise in college-aged females. Journal of sports science & medicine. 2014;13(1):91.
21. Fujita S, Abe T, Drummond M, Cadenas J, Dreyer H, Sato Y, et al. Blood flow restriction during low-intensity resistance exercise increases S6K1 phosphorylation and muscle protein synthesis (Journal of Applied Physiology (2007) 103 (903-910. Journal of Applied Physiology. 2008;104(4):1256.
22. Mohamadi S, Khoshdel A, Naserkhani F, Mehdizadeh R. The effect of low-intensity resistance training with blood flow restriction on serum cortisol and testosterone levels in young men. Journal of Archives in Military Medicine. 2015;3(3).54-66.]In Persain [
23. Norasteh S, Arazi H, Rahmani A. The Effect of Resistance Exercise with Blood Flow and Respiratory Restriction on Testosterone, Cortisol and Testosterone/Cortisol Ratio Responses in Male Wrestlers. Journal of Applied Health Studies in Sport Physiology. 2020;6(2):47-55. [In Persain]
24. Schumann M, Walker S, Izquierdo M, Newton RU, Kraemer WJ, Häkkinen K. The order effect of combined endurance and strength loadings on force and hormone responses: effects of prolonged training. European journal of applied physiology. 2014;114:867-80.
25. Cook CJ, Kilduff LP, Beaven CM. Improving strength and power in trained athletes with 3 weeks of occlusion training. International journal of sports physiology and performance. 2014;9(1):166-72.
26. Raastad T, Bjøro T, Hallen J. Hormonal responses to high-and moderate-intensity strength exercise. European journal of applied physiology. 2000;82:121-8.
27. Eslami R, Yari M, Lotfi N. Comparison of Acute Hormonal Responses to High and Low-Intensity Resistance Exercise with Blood Flow Restriction in Young Wrestlers. Annals of Military and Health Sciences Research. 2019;17(1):41-55. [In Persain]

pression of microRNAs associated with adipose tissue angiogenesis and antiangiogenesis in rats fed a high-fat diet. Journal of Sport and Exercise Physiology. 2023;15(4/42):53.]In Persain [
3. Haghgoo H, Choobineh S, Pournemati P. The effect of six weeks of combined training on the resting plasma level of Pentraxin-3 and Serum amyloid A in men with type-2 diabetes. Journal of Sport and Exercise Physiology. 2022;15(4):1-10. [In Persain]
4. Obmiński Z, Stupnicki R. Comparison of the testosterone-to-cortisol ratio values obtained from hormonal assays in saliva and serum. The Journal of sports medicine and physical fitness. 1997;37(1):50-5.
5. Kraemer WJ, Staron RS, Hagerman FC, Hikida RS, Fry AC, Gordon SE, et al. The effects of short-term resistance training on endocrine function in men and women. European journal of applied physiology and occupational physiology. 1998;78:69-76.
6. Baechle T, Earle R, Wathen D. Essentials of strength and conditioning: National Strength and Conditioning Association (NSCA). Human Kinetics, Champaign IL. 2000;2(6):21-32.
7. Kraemer WJ. Endocrine responses to resistance exercise. 1987:23(2):28-34.
8. Sillen MJ, Franssen FM, Vaes AW, Delbressine JM, Wouters EF, Spruit MA. Metabolic load during strength training or NMES in individuals with COPD: results from the DICES trial. BMC pulmonary medicine. 2014;14:1-9.
9. Amani-Shalamzari S, Rajabi S, Rajabi H, Gahreman DE, Paton C, Bayati M, et al. Effects of blood flow restriction and exercise intensity on aerobic, anaerobic, and muscle strength adaptations in physically active collegiate women. Frontiers in physiology. 2019;10:810. [In Persain]
10. Abe T, Hinata S, Koizumi K, Sato Y. Day-to-day change in muscle strength and MRI-measured skeletal muscle size during 7 days KAATSU resistance training: A case study. International Journal of KAATSU Training Research. 2005;1(2):71-6.
11. Amani-Shalamzari S, Farhani F, Rajabi H, Abbasi A, Sarikhani A, Paton C, et al. Blood flow restriction during futsal training increases muscle activation and strength. Frontiers in physiology. 2019;10:614. [In Persain]
12. Amani-Shalamzari S, Sarikhani A, Paton C, Rajabi H, Bayati M, Nikolaidis PT, et al. Occlusion training during specific futsal training improves aspects of physiological and physical performance. Journal of sports science & medicine. 2020;19(2):374.
13. Nishimura A, Sugita M, Kato K, Fukuda A, Sudo A, Uchida A. Hypoxia increases muscle hypertrophy induced by resistance training. International journal of sports physiology and performance. 2010;5(4):497-508.
14. Kubo K, Komuro T, Ishiguro N, Tsunoda N, Sato Y, Ishii N, et al. Effects of low-load resistance training with vascular occlusion on the mechanical properties of muscle and tendon. Journal of applied biomechanics. 2006;22(2):112-9.
15. Patterson SD, Hughes L, Warmington S, Burr J, Scott BR, Owens J, et al. Blood flow restriction exercise: considerations of methodology, application, and safety.