Study of the effect of 12 weeks of swimming, resistance and combined (resistance+ swimming) training patterns on the mechanical strength of bone tissue in female Wistar rats

Sadegh Rigi, Maryam Banparvari, Mohammad Reza Rezaipoor, Omid Mohammadoost*

Department of Exercise Physiology, Faculty of Education and Psychology, University of Sistan and Baluchestan, Zahedan, Iran

Corresponding author e-mail: omid.mo@ped.usb.ac.ir

Abstract

Background and Objective: Osteoporosis is a disease that is spreading as a threat to world health. This study aimed to compare the effect of resistance training, swimming, and combination training patterns on the on mechanical strength of osteoporotic bone tissue of female Wistar rats.

Materials and Methods: The current type of research was experimental and 36 healthy female Wistar rats (6 weeks old) with an average initial weight of 170-190 grams were studied. In order to confirm the induction of osteoporosis in the initial study, 12 were randomly divided into two groups: healthy and alcohol injection. In the main study, the remaining 24 rats were randomly divided into 4 groups (6 rats in each group) after induction of osteoporosis (resistance exercise, swimming exercise, combined exercise and control). Osteoporosis was induced by intraperitoneal injection of 20% ethanol solution and saline at a dose of 3 grams per kilogram of rat body weight, once a day and 4 days a week. Swimming training protocol (12 weeks, 90 minutes per day, 5 days per week) and resistance protocol (12 weeks, 5 days per week and each session including 8 sets with 8 to 12 repetitions of climbing the ladder) were performed. The combined group performed resistance training with progressive overload in 4 sets with 8 to 12 repetitions and swimming training with half the time of the swimming group. After the end of 12 weeks, femur bone samples were taken for densitometry and L5 vertebra and tibia bone to study mechanical resistance indicators. To assess bone strength, a mechanical properties testing machine, the Zwick model, made in Germany, was used. Data were analyzed using SPSS-25 using independent t-tests, one-way analysis of variance and Tukey's at a significance level of less than 0.05 ($P<0.05$).

Results: The tibia tensile maximum load in swimming, resistance and concurrent training groups was significantly greater than pretest ($p=0.000$, $p=0.004$, $p=0.03$). The L5 maximum load of resistance and concurrent training groups was significantly greater than pretest ($p=0.009$, $p=0.001$). the tibia tensile maximum load in concurrent groups was significantly greater than swimming, resistance and control groups ($p=0.000$, $p=0.000$, $p=0.004$). The L5 maximum load in concurrent training ($p=0.02$, $p=0.03$) and resistance group ($p=0.003$, $p=0.002$) was significantly greater than swimming and control groups.

Conclusion: It seems that the intervention of swimming and resistance training in a combined model may have a synergistic effect on increasing the mechanical strength of bone in osteoporotic female rats. This model is likely to increase the mechanical strength of bone better than the implementation of swimming or resistance training alone and provide more optimal care against osteoporosis.

Keywords: Swimming training, Resistance training, Concurrent training, Mechanical strength of bone

Received: Nov 11, 2024 **Revised:** Dec 22, 2024 **Accepted:** Dec 23, 2024

How to cite this article: Rigi S, Banparvari M, Rezaipoor MR, Mohammadoost O. Study of the effect of 12 weeks of swimming, resistance and combined (resistance+ swimming) training patterns on the mechanical strength of bone tissue in female Wistar rats. Daneshvar Medicine 2024; 32(5):77-90. doi: 10.22070/DANESHMED.2024.19773.1566

This is an open access article distributed under the terms of the Creative Commons Attribution-Non Commercial License 4.0 (CCBYNC), where it is permissible to download, share, remix, transform, and buildup the work provided it is properly cited. The work cannot be used commercially without permission from the journal.

مطالعه اثر ۱۲ هفته الگوهای تمرینی شنا، مقاومتی و ترکیبی (مقاومتی+شنا) بر استحکام مکانیکی بافت استخوان رت‌های ماده ویستار

صادق ریگی[۱]، مریم بان‌پروری[۲]، محمدرضا رضایی‌پور[۲]، امید محمددوست[۲*]

گروه علوم ورزشی، دانشکده علوم تربیتی و روانشناسی، دانشگاه سیستان و بلوچستان، زاهدان، ایران
*نویسنده مسئول: امید محمددوست **Email: omid.mo@ped.usb.ac.ir**

چکیده

مقدمه و هدف: پوکی‌استخوان یک بیماری متابولیکی است که باعث افزایش خطر شکستگی استخوان می‌گردد. هدف از پژوهش، بررسی تأثیر الگوهای تمرینی شنا، مقاومتی و ترکیبی بر استحکام مکانیکی بافت استخوان استئوپروتیک رت‌های ماده ویستار بود.

مواد و روش ها: در این پژوهش تجربی، ۳٦ سر رت ماده نژاد ویستار سالم (٦ هفته‌ای) با میانگین وزن ۱۷۰g–۱۹۰، مورد مطالعه قرار گرفتند. جهت تأیید القای استئوپروسیس، ۱۲ رت به‌صورت تصادفی، به دو گروه سالم و تزریق الکل تقسیم شدند. ۲٤ سر رت باقی مانده، پس از القای پوکی استخوان به‌صورت تصادفی به ٤ گروه (هر گروه ٦ سر رت)، (۱.تمرین مقاومتی، ۲.تمرین شنا، ۳.تمرین ترکیبی و ٤.کنترل) تقسیم شدند. القای استئوپروسیس با تزریق ۳ هفته‌ای صفاقی محلول ۲۰٪ الکل اتانول و سالین با دوز ۳ گرم به ازای ۱ کیلوگرم وزن بدن، ۱ نوبت در روز و ٤ روز در هفته صورت گرفت. پروتکل تمرینی شنا (۱۲ هفته، ۹۰ دقیقه در روز، ۵ روز در هفته) و پروتکل مقاومتی (۱۲ هفته، ۵ روز در هفته و هر جلسه شامل ۸ ست با ۸ تا ۱۲ تکرار بالارفتن از نردبان) انجام گرفت. گروه ترکیبی، تمرین مقاومتی را در ٤ ست با ۸ تا ۱۲ تکرار و تمرین شنا را با نصف مدت زمان گروه شنا، انجام دادند. پس از پایان ۱۲ هفته، برداشت نمونه‌های استخوانی مهره L5 و استخوان تیبیا جهت مطالعه شاخص‌های مقاومت مکانیکی، انجام شد. برای ارزیابی استحکام استخوان از دستگاه تست خواص مکانیکی، مدل zwick ساخت کشور آلمان انجام شد. داده‌ها با استفاده از آزمون‌های تی‌وابسته، تحلیل واریانس یک‌راهه و توکی در سطح معنی‌داری کمتر از ۰/۰۵ با SPSS-25 تحلیل شدند ($p<0/05$).

نتایج: در مقایسه درون گروهی، تمرین شنا، مقاومتی و تمرین ترکیبی باعث افزایش معنی‌داری در استحکام مکانیکی کششی تیبیا شدند (p=۰/۰۳، p=۰/۰۰٤ , p=۰/۰۰۰). استحکام مکانیکی فشاری مهره L5 گروه مقاومتی و تمرین ترکیبی در مرحله پس‌آزمون افزایش معنی‌داری را نسبت به پیش‌آزمون نشان دادند (p=۰/۰۰۱، p=۰/۰۰۹). در مقایسه بین گروهی، استحکام کششی تیبیا گروه ترکیبی افزایش معنی‌داری را در مقایسه با گروه‌های تمرین مقاومتی، شنا و گروه کنترل نشان داد (p=۰/۰۰٤، p=۰/۰۰۰ , p=۰/۰۰۰). گروه‌های تمرین مقاومتی و شنا در مقایسه با گروه کنترل، افزایش معنی‌داری در این مؤلفه داشتند (p=۰/۰۰۱، p=۰/۰۰۰). استحکام مکانیکی فشاری مهره L5 در گروه ترکیبی و مقاومتی (p=۰/۰۳، p=۰/۰۲) افزایش معنی‌داری را در مقایسه با گروه‌های تمرین شنا و گروه کنترل (p=۰/۰۰۳، p=۰/۰۰۲) نشان داد.

نتیجه‌گیری: به‌نظر می‌رسد مداخله‌ی تمرین شنا و مقاومتی در الگوی ترکیبی، ممکن است یک اثر هم‌افزایی بر افزایش استحکام مکانیکی استخوان در رت‌های ماده استئوپروتیک داشته باشد؛ این الگو، احتمال دارد استحکام مکانیکی استخوان را بهتر از اجرای محض تمرین شنا یا مقاومتی افزایش داده و مراقبت بهینه‌تری در برابر استئوپروسیس فراهم نماید.

واژه های کلیدی: تمرین شنا، تمرین مقاومتی، تمرین ترکیبی، استحکام مکانیکی استخوان

وصول مقاله: ۱۴۰۳/۰۸/۲۱
اصلاحیه نهایی: ۱۴۰۳/۱۰/۰۲
پذیرش: ۱۴۰۳/۱۰/۰۳

مقدمه

استخوان‌ها نقش‌های کلیدی در بدن انسان دارند از جمله، مسئولیت فرم‌دهی بدن، ذخیره مواد معدنی و چربی را برعهده و از اندام‌های حیاتی و مهم محافظت می‌کنند، در تولید سلول‌های خونی و هم‌چنین تولید حرکت نقش دارند (۱). بیماری پوکی استخوان[1]، سیستم اسکلتی را تهدید می‌نماید و زمانی رخ می‌دهد که تعادل بین دو فرایند بازجذب و تشکیل استخوان به هم‌خورده و منجر به کاهش توده ماده معدنی استخوانی گردد (۱). در نواحی مختلف بدن استخوان‌ها بنا به موقعیت قرارگیری، ضخامت تیغه های بافت استخوان اسفنجی، فاصله‌های تیغه‌های بافت استخوان اسفنجی و ضخامت استخوان متراکم، دارای اهمیت بسیاری هستند، به‌طوری‌که تغییرات کاهشی در ضخامت تیغه‌ها، ضخامت استخوان متراکم و تغییرات افزایشی در فاصله‌های تیغه‌های بافت می‌تواند باعث افزایش خطر شکستگی‌های استخوانی شود (۱). شکستگی استخوان ران و مهره‌ها شایع‌ترین شکستگی‌های مرتبط با پوکی هستند که با افزایش آن‌ها، میزان مرگ و میر نیز افزایش می‌یابد (۳ ،۲). تخمین زده شده است که تعداد شکستگی‌های لگن در ۲۵ سال آینده دو برابر شود (٤). شکستگی‌های مهره‌ای و گردن استخوان ران می‌تواند باعث ناتوانی حرکتی گردد (۳). پوکی استخوان علاوه بر شکستگی، دارای عوارض دیگری نیز هست که می‌توان به بدشکلی ستون فقرات در اثر فشردگی قدامی مهره‌ها، عدم کارکرد طبیعی کمر، کاهش عملکرد تنفسی و کاهش قابل توجه کیفیت زندگی اشاره کرد (۲). علت اصلی اکثر شکستگی‌های ناشی از پوکی استخوان، تقلیل کیفیت استخوان و کاهش استحکام مکانیکی آن است (۵). ویژگی‌های مکانیکی استخوان، یک معیار مهم در تشخیص تغییرات استخوان است که در سطح میکروسکوپی حادث می‌گردد (۵). به‌طوری‌که نتایج حاصل از اندازه‌گیری مکانیکی استخوان، اطلاعات عینی استحکام و قدرت استخوان را بیان می‌کند و ممکن است شکستگی‌های استخوانی در مطالعات بالینی را شبیه سازی کند. این در حالی است که مطالعات اندازه‌گیری استحکام مکانیکی استخوان در نمونه‌های انسانی غیر ممکن است و بیشتر پژوهش‌های انسانی انجام شده در زمینه اثرسنجی تمرین بدنی بر استخوان، بر تراکم سنجی استخوان متمرکز هستند (۵،٤) و انجام تست‌های مستقیم ارزیابی مکانیکی تنها با مدل‌های حیوانی امکان پذیر است (۵).

امروزه روش‌های درمانی مداخله‌ای مانند جایگزینی استروژن، تجویز بیس فوسفانات[2] جهت مقابله با بیماری استئوپروسیس مطرح هستند، اما عوارض جانبی این روش‌ها محدودیت استفاده از آن‌ها را دوچندان می‌کند. پژوهش‌ها به دنبال استراتژی‌های درمانی غیردارویی جهت جایگزینی روش‌های دارویی هستند. پیشنهاد شده است که مداخلات تمرینی، احتمالاً بتواند به‌عنوان یک مداخله‌ی غیر دارویی که عوارض جانبی سایر روش‌ها را نداشته و با هزینه کم، جهت مقابله با این بیماری در نظر گرفته شود (٦). مکانیسم های اثرگذاری فعالیت بدنی بر بهبود پوکی استخوان از یک طرف و تقویت عضلات جهت افزایش ثبات قامتی، جلوگیری از خطرافتادن‌های منجر به شکستگی از سوی دیگر احتمالاً می‌تواند نقش فعالیت بدنی را دو چندان نماید (٦).

حضور بار مکانیکی، یک عامل تعیین کننده برای نگهداشت عملکردی بافت استخوان است (۷). اگر چه شواهد پیشنهاد می‌کنند که شرایط نبود بار مکانیکی، تأثیر زیادی بر ویژگی‌های مکانیکی بافت استخوان دارد، اما اثرات مدل‌های مختلف تمرین بدنی بر این ویژگی‌های استخوانی نامشخص باقی مانده است (۷). اثرات ورزش استقامتی بر ریز معماری استخوان اسفنجی موش‌های صحرایی نشان داد ۱۰ هفته تمرین بر روی تردمیل، قدرت مکانیکی استخوان را از طریق افزایش تراکم ماده معدنی، ضخامت

1 Osteoporosis

2 Bisphosphonates

بافت متراکم و حداکثر بار بهبود می‌بخشد (۸). در مطالعه‌ای با هدف مقایسه ۳ نوع شدت تمرین استقامتی نشان داده شد که مداخله تمرینی ۱۲ متر در دقیقه به مدت ۱ ساعت در روز، باعث افزایش تراکم ماده معدنی تیبیا و قدرت مکانیکی فمور شد؛ در حالی‌که تراکم ماده معدنی و حداکثر بار فشاری مهره L5 در دو شدت تمرینی دیگر با گروه کنترل تفاوت معنی‌داری نداشت (۹). آگوئیار و همکاران (۲۰۱۰) در پژوهشی به تحلیل پاسخ مکانیکی فمور رت‌ها به تمرینات مقاومتی و ایروبیک پرداختند؛ بعد از ۸ هفته تمرین مقاومتی، این گروه افزایش معنی‌داری را در حداکثر نیروی شکست در مقایسه با گروه کنترل نشان دادند. اما گروه ایروبیک تفاوت معنی‌داری را در این متغیر در مقایسه با گروه کنترل نشان نداد (۷). در مطالعه‌ای دیگر که با هدف اثر سنجی تمرین دویدن بر قدرت استخوان فمور که از طریق ارزیابی مقیاس‌های کمی برای توصیف تراکم سنجی رادیواکتیو انجام شد، نتایج نشان داد که قدرت استخوان در گروه ورزش به‌طور معنی‌داری افزایش داشته است (۱۰). Maurel و همکاران (۲۰۱۸)، مطالعه‌ای را جهت تعیین اثرات فعالیت بدنی بر پارامترهای استخوانی رت‌های دچار پوکی استخوان انجام دادند؛ براساس نتیجه‌گیری این پژوهش تمرین منظم بدنی، دارای اثرات سودمند بر برخی پارامترهای ریزساختاری استخوانی داشت (۱۱). Chang و همکاران (۲۰۱۳) پس از بررسی اثر ۱۲ هفته تمرین هوازی در رت‌ها، بیان کردند که تمرین هوازی دویدن روی تردمیل تأثیر کمی بر حفظ توده استخوانی رت‌ها دارد (۱۲). Rani و همکاران (۲۰۱۷) نیز بیان کرد که اجرای یک برنامه تمرین مقاومتی با بار مکانیکی فزاینده، اثرات تحریکی افزایشی بر تراکم ماده معدنی، قدرت و سایر خصوصیات فیزیکی استخوان رت‌های استئوپنی دارد (۱۳). Bolam (۲۰۱۳) به مقایسه اثر ۸ هفته تمرینات مقاومتی و استقامتی پرداخت و دریافت که تنها تمرین مقاومتی یا در ترکیب با فعالیت‌های تمرینی ضربه ای، می‌توانند به بهبود استخوان افراد دارای پوکی استخوان کمک کنند (۱٤). به‌طور کلی فعالیت بدنی از طریق نیروهای ضربه‌ای از طریق جاذبه و انقباضات عضلانی می تواند بر استخوان اثر داشته باشد (۱٤). احتمال می‌رود تلفیق تمرین مقاومتی و شنا بتواند اثربخشی دوجانبه را فراهم آورد به‌طوری‌که تمرینات مقاومتی از طریق مستقیم و تمرین شنا از طریق انقباضات عضلانی و فشار هیدروستاتیک، مزیت مکانیکی لازم برای اثرگذاری بر کیفیت استخوان را فراهم آورند. امروزه در مداخلات بازتوانی ورزشی بر تمرینات ترکیبی توجه شده و به‌نظر می‌رسد دارای اثرات هم‌افزایی تمرین مستقل بوده و سازگاری‌های ایجاد شده از هر کدام از تمرینات انفرادی را در یک برنامه تمرینی اعمال می‌کنند. در خصوص اثرات استئوژنیک تمرین ترکیبی اطلاعات بسیار اندکی در دسترس است. درخصوص اثر بخشی تمرینات بدنی بر بهبود وضعیت استخوان‌های استئوپروتیک در مدل‌های انسانی و حیوانی، تمرینات به صورت انفرادی اعمال شده و یا اینکه در یک برنامه بازتوانی، با بکارگیری دو نوع تمرین انفرادی، به مقایسه اثرات تخصصی آن‌ها پرداخته شده است (۱٤، ۱۵). این در حالی است که ممکن است اثر تلفیق دو نوع فعالیت‌بدنی، متمایز از اثرات جداگانه آن‌ها باشد و استخوان بتواند از سودمندی‌های فیزیولوژیکی و مکانیکی هر دو تمرین، به‌طور همزمان بهره ببرد. با وجود تأیید اثربخشی فعالیت‌بدنی بر متابولیسم و شرایط استخوان هنوز بعضاً تناقضات زیادی در این زمینه وجود دارد. هر چند بیان شده است که فعالیت بدنی یک عامل مهم در کسب حداکثر دانسیته استخوانی و کاهش ابتلا به استئوپروسیس است، اما هنوز در مورد راهکارهای تمرینی قطعی جهت پیشگیری و درمان پوکی استخوان اتفاق نظر وجود ندارد و در خصوص اینکه کدام نوع فعالیت بدنی مناسب‌تر بوده و بالاترین اثربخشی را دارد توافقی وجود ندارد. لذا در این پژوهش به‌دنبال جواب این سؤال هستیم که آیا الگوهای تمرینی شنا، مقاومتی و ترکیبی

(مقاومتی+شنا) بر استحکام مکانیکی بافت استخوان استئوپروتیک رت‌های ماده ویستار تأثیر دارد یا خیر؟

مواد و روش‌ها

نوع تحقیق حاضر تجربی و جامعه آماری، تمامی رت‌های ماده نژاد ویستار بودند. نمونه‌ی مطالعه، ۳٦ سر رت ویستار ماده ٦ هفته‌ای (وزن اولیه ۱۹۰- ۱۷۰ گرم) در مرکز تحقیقات حیوانی دانشگاه علوم پزشکی زاهدان بودند. مطابق استاندارد رت‌ها در گروه‌های ۳ و ٤ تایی در قفس‌های پلی کربنات با ابعاد استاندارد ۱۵× ۱۵× ۳۰ سانتی‌مترمکعب و دارای ظرف آب استاندارد ۵۰۰ میلی‌لیتری مخصوص رت نگهداری شدند. با استفاده از یک تایمر از ساعت ٦ صبح تا ساعت ۱۸ عصر لامپ‌های آزمایشگاه خاموش و از ساعت ۱۸ عصر تا ٦ صبح فردا، تمامی لامپ‌ها روشن بودند. تهویه آزمایشگاه نیز به صورت مداوم به وسیله فن قوی انجام و میزان رطوبت هوای آزمایشگاه ۵۵-۵۰٪ در نظر گرفته شد. با استفاده از دماسنج حداکثر–حداقل دمای آزمایشگاه ۲±۲۲ درجه سانتی‌گراد نگه داشته شد (۱۵). تعویض پوشال‌ها به صورت روزانه و خوراک روزانه رت‌ها با پلت غذای حیوانات آزمایشگاهی شرکت دان پارس صورت پذیرفت. ترکیبات این غذا شامل کنجاله سویا، نمک، گندم، متیونین، ذرت، کربنات کلسیم، چربی گیاهی، دی کلسیم فسفات، لیزین هیدروکلراید، آنتی‌اکسیدان، پودر ماهی می‌باشد. دسترسی به آب نامحدود بود. وزن بدن و غذای دریافتی به صورت روزانه پیش از تمرین اندازه‌گیری می‌گردید. جهت وزن‌کشی روزانه رت‌ها از ترازوی وزن‌کشی مدل mettle pc 2000 ساخت کشور سوئیس استفاده شد. با توجه به اینکه تغییرات ناشی از پوکی استخوان در فاز رمودلینگ استخوانی اتفاق می‌افتد و این فاز تقریباً مصادف با ٦۵ تا ۱۱۰ روزه‌گی رت‌ها می‌باشد، رت‌ها به مدت ۲ هفته و تا رسیدن به سن مورد نظر در آزمایشگاه نگهداری شدند. جهت تأیید القای پوکی استخوان ابتدا مطالعه اولیه انجام شد که در آن ۱۲ سر رت به صورت تصادفی در قالب ۲ گروه سالم و تزریق الکل (هر گروه ٦ سر رت) طبقه‌بندی شدند. تا نتایج پارامترهای استخوانی گروه سالم با گروه تزریق الکل مقایسه شده و اطمینان کامل از القای پوکی استخوان در گروه‌های مورد مطالعه حاصل گردد. در مطالعه اصلی، ۲٤ سر رت باقی مانده، پس از القای پوکی استخوان به روش تزریق الکل (مطابق مطالعه اولیه) به ٤ گروه (۱.تمرین مقاومتی، ۲.تمرین شنا، ۳.تمرین ترکیبی و ٤.کنترل (هر گروه شامل ٦ سر رت) به صورت تصادفی تقسیم‌بندی شدند. القای پوکی استخوان با تزریق درون صفاقی محلول الکل اتانول ۲۰٪ و سالین (با دوز ۳ گرم به ازای ۱ کیلوگرم وزن رت)، به مدت ۳ هفته، ٤ روز در هفته و ۱ نوبت در روز صورت پذیرفت (۱٦). به مدت ۱۲ هفته پروتکل‌های تمرینی شنا، مقاومتی و ترکیبی انجام گرفت. در پایان ۱۲ هفته مداخلات تمرین، ابتدا میز جراحی توسط اتانول ۷۰٪ ضدعفونی و وسایل جراحی نیز قبلاً توسط اتوکلاو استریل گردید. برای آماده‌سازی و ارزیابی نمونه‌های استخوانی گروه‌های مورد مطالعه، ٤۸ ساعت پس از آخرین جلسه تمرین، رت‌ها به‌وسیله زایلازین (٤ میلی‌گرم به ازای هر کیلوگرم وزن بدن) و کتامین (۵۰ میلی‌گرم به ازای هر کیلوگرم وزن بدن) بیهوش شده سپس، نمونه‌های استخوانی فمور جهت بررسی تراکم‌سنجی استخوان و استحکام مکانیکی (مطالعه اولیه) و مهره L5 جهت تست مکانیکی فشاری و هم‌چنین نمونه‌های استخوانی تیبیا چپ جهت مطالعه شاخص‌های مقاومت مکانیکی کششی (مطالعه اصلی)، پس از جداسازی از بافت نرم و مراقبت از این که به سطح آن‌ها خراشی وارد نشود و به پریوستئوم استخوان آسیب نرسد در گازهای آغشته به سالین ۰/۹٪ برای جلوگیری از دهیدراسیون قرار گرفتند و به صورت جداگانه بسته‌بندی شده و تا زمان انجام تست‌ها در دمای ۸۰- درجه سانتی‌گراد در فریزر نگهداری شدند (۱۷). یک روز قبل از آزمایشات، نمونه‌های استخوانی از فریزر به یک یخچال معمولی منتقل شده و در روز آزمایش، استخوان‌ها در دمایی برابر با دمای محیط ۲۲ – ۲۰ درجه سانتی‌گراد و در سالین نگهداری شدند. در طی انجام تست‌ها، نمونه‌ها به‌وسیله اسپری سالین مرطوب شدند. جهت تزریق اتانول و برداشت نمونه‌های استخوانی و جداسازی بافت‌های نرم، از ست کامل لوازم جراحی و وسائل بهداشتی نظیر الکل، بتادین، گاز استریل، سرنگ و ... استفاده شد. جهت ارزیابی تراکم ماده معدنی استخوان از روش

Dual-energy X-ray absorptiometry یا DEXA (LEXXOS, USA) که برای اندازه‌گیری در حیوانات کوچک تطبیق داده شده بود و به یک کامپیوتر جهت انتقال داده‌ها لینک شده بود، استفاده شد.

پروتکل‌های تمرین

یک هفته پس از القای پوکی استخوان در نمونه‌های پژوهش، پروتکل‌های تمرینی به مدت ۱۲ هفته و ۵ جلسه در هفته اجرا شد:

تمرین مقاومتی

برنامه آشناسازی رت‌ها با تمرین مقاومتی، به مدت ۳ روز و شامل سه تلاش در روز انجام شد. این برنامه روی نردبان عمودی (۱۱۰ سانتی‌متر طول و ۳۵ سانتی‌متر عرض و ۲ سانتی‌متر فواصل پله‌ای) با زاویه ۸۰ درجه نسبت به سطح افق صورت پذیرفت. جعبه‌ی استراحت‌گاه (۲۰×۲۰×۲۰ سانتی‌متر مکعب) در بالای نردبان تعبیه شده بود تا رت‌ها در فواصل بین ست‌های بالا رفتن از نردبان در آن استراحت کنند. در ابتدا، رت در استراحت‌گاه به مدت ٦۰ ثانیه قرار داده می‌شد. در تلاش اول، حیوان در یک سوم بالایی نردبان، در مرحله دوم در نیمه نردبان و در تلاش سوم، حیوان در ابتدای نردبان قرار داده می‌شد (۱۸). پروتکل تمرینی مقاومتی، یک پروتکل پیشرونده بود که شامل ۸ ست بالارفتن از نردبان با اضافه بار پیشرونده متصل شده به پروگزیمال دم رت‌ها بود که وزنه‌های فلزی به تدریج درون یک کیسه متصل به دم رت که به‌وسیله یک نوار به دم حیوان متصل شده بود اضافه می‌شدند. هرست شامل ۸ تا ۱۲ تکرار تا رسیدن به جعبه استراحت‌گاه بود. وزنه متصل شده به دم رت‌ها در ست‌های اول و دوم ، برابر با ۵۰ ٪ وزن بدن رت، در ست‌های سوم و چهارم ۷۵ ٪ وزن بدن رت، ۹۰٪ برای ست‌های پنجم و ششم و در مرحله نهایی ۱۰۰ ٪ بود. استراحت ٦۰ ثانیه‌ای در فواصل بین ست‌ها، در استراحت‌گاه در نظر گرفته شد. وزنه‌های فلزی، براده‌های مستطیل شکل کوچکی به وزن تقریبی ۳ گرم بودند که درون کیسه‌ای که با نوار چسب به دم رت‌ها بسته می‌شد، قرار می‌گرفتند (۱۸).

تمرین شنا

پروتکل تمرینی شنا به مدت ۱۲ هفته، ۵ روز در هفته و ٦۰ دقیقه در روز و در آبی با دمای هوای محیط انجام شد. آشناسازی با محیط آبی، پیش از برنامه تمرینی اصلی انجام شد. وان شنا (٤٥×٤٥×٥۰ سانتی‌متر مکعب) با ۲۰ سانتی‌متر عمق آب پر شد و رت‌ها جهت انجام تمرین در آن قرار داده شدند. در پایان تمرین شنا، حیوانات کاملاً خشک شده و به قفس انتقال داده می‌شدند.

تمرین ترکیبی

پروتکل تمرین ترکیبی شامل تمرین مقاومتی و تمرین شنا بود. در طول یک جلسه از این تمرین، ابتدا تمرین مقاومتی و سپس تمرین شنا انجام می‌شد. در پروتکل ترکیبی، رت‌ها تمرین مقاومتی را در ٤ ست ۸ تا ۱۲ تکراری با اضافه بار معادل ۵۰ ٪ وزن بدن رت برای ست اول، ۷۵ ٪ برای ست دوم، ۹۰ ٪ برای ست سوم و سرانجام ۱۰۰ ٪ وزن حیوان در ست چهارم، انجام دادند. سپس نصف مدت زمان گروه تمرین شنا، به تمرین شنا می‌پرداختند. تمرین مقاومتی همواره پیش از تمرین شنا طراحی شد تا از خستگی زودرس حیوان ناشی از تمرین شنا جلوگیری شود (۱۹).

نمونه‌برداری استخوانی

دستگاه تست مکانیکی کششی و فشاری

نمونه‌های استخوانی تیبیای چپ و مهره L5 به‌وسیله دستگاه تست خواص مکانیکی zwick universal material testing machine z 2.5(2/5 HS WN 150888) ساخت کشور آلمان تحت تست کششی و فشاری قرار گرفتند.

نحوه تراکم‌سنجی استخوان (مطالعه اولیه)

نمونه‌های استخوانی، ۳ ساعت پیش از انجام تست در دمای طبیعی اتاق قرار داده شد و جهت جلوگیری از دهیدراسیون با سالین مرطوب شدند و تراکم سنجی کل فمور انجام گرفت. تراکم ماده معدنی استخوان فمور بر حسب گرم بر سانتی‌مترمربع به‌دست آمد.

تجزیه و تحلیل آماری

براساس اهداف پژوهش، جهت توصیف داده‌ها از آمار توصیفی استفاده و طبیعی بودن توزیع داده‌ها با استفاده از آزمون آماری شاپیرو-ویلک مورد بررسی قرار گرفت. همگنی واریانس‌ها نیز توسط آزمون لون بررسی شد. برای بررسی تغییرات درون گروهی از آزمون تی‌وابسته و مقایسه بین گروه‌ها با استفاده از آزمون آنالیز واریانس یک‌طرفه (تغییرات پس‌آزمون) و در صورت معنی‌داری از آزمون

تعقیبی توکی استفاده شد. داده‌ها با نرم‌افزار SPSS-25 در سطح معنی‌داری کمتر از ۰/۰۵ تحلیل شدند ($P<0/05$).

نتایج

از آزمون شاپیرو–ویلک برای تعیین نرمال بودن داده‌ها استفاده و سطح معنی‌داری همه متغیرهای تحقیق در مطالعه اولیه و اصلی در چهار گروه: تمرین شنا، تمرین مقاومتی، تمرین ترکیبی و کنترل بیشتر از ۰/۰۵ به‌دست آمد (P=۰/۹۸)؛ در نتیجه داده‌های پژوهش، شرایط لازم برای به‌کارگیری تحلیل آمار استنباطی پارامتریک را دارا هستند.

در ابتدای پژوهش و پیش از انجام تمرینات، تفاوت معنی‌داری در وزن گروه‌های مورد مطالعه وجود نداشت. تغییرات وزن گروه‌های مداخله، در مقایسه با وضعیت پایه افزایش داشت، اما تفاوت معنی‌داری در پایان مداخله تمرین بین گروه‌ها وجود نداشت (جدول۱).

جدول ۱. گروه‌های مطالعه قبل و پس از برنامه تمرینی

گروه وزن(گرم)	سالم(شم)	تزریق الکل (القاءاستئوپروز)	کنترل	شنا	مقاومتی	ترکیبی	سطح معنی‌داری
اولیه (قبل تمرین)	**۲٦۸/۷ ± ۸/٦**	**۲٤٦/٥ ± ۱۱/۷**	**۲٥۰/٥ ± ۱٦/۱**	**۲۳۸/۲ ± ۱٥/۲**	**۲٥۰/۸ ± ۱٤/۲**	**۲٥۹/۱ ±۱۲/٦**	**۰/٥۹٥**
پایانی (بعد تمرین)	–	–	**٤۰٥/۱ ± ۸/۳**	**۳۸۹/۲ ± ۱٤/۳**	**٤۰۹/۲ ± ۱۱/۱**	**۳۸۸/۱ ±۱٤/۹**	**۰/۱۹۷**

* معنی‌داری در سطح کمتر از ۰/۰٥. ($P<0/05$).

مقایسه میانگین متغیرهای پژوهش در دو گروه: ۱.سالم (شم) و ۲. تزریق الکل (القاءاستئوپروز)(پایه)، با استفاده از آزمون تی‌وابسته، صورت پذیرفت (جدول۲).

جدول ۲. مقایسه متغیرها در دو گروه سالم و گروه تزریق الکل (القاءاستئوپروز)

متغیر	گروه	انحراف معیار ± میانگین	اختلاف میانگین‌ها	آماره t	سطح معنی‌داری
حداکثر نیروی شکست فمور (نیوتن)	سالم(شم)	۱۳۲/۰٦ ±۱٥/٥٦	– ٥۸/۱۸	– ٦/٥۹	۰/۰۰۰*
	تزریق الکل (القاءاستئوپروز)	۷۳/۸۸ ± ٦/۱٦			
سفتی استخوان فمور (نیوتن بر میلی‌متر)	سالم	۱۹٦/۰۹ ± ۸/٤۲	– ۹٤/۲۱	– ۱۷/۹۱	۰/۰۰۰*
	تزریق الکل (القاءاستئوپروز)	۱۰۱/۸۸ ± ٦/۸٥			
دانسیته ماده معدنی فمور (گرم بر سانتی‌مترمربع)	سالم	۰/۲۳ ± ۰/۰۱	– ۰/۱۲	– ۱۲/۸۸	۰/۰۰۰ *
	تزریق الکل (القاءاستئوپروز)	۰/۱۱ ± ۰/۰۰			
آلکالین فسفاتاز ویژه استخوان (واحد بین المللی بر لیتر)	سالم	۹۹/۷٤ ± ٤/٦٦	– ۳۸/٦٥	– ۱٤/۱۲	۰/۰۰۰ *
	تزریق الکل (القاءاستئوپروز)	**٦۱/۰۹ ± ٥/۲۲**			

* معنی‌داری در سطح کمتر از ۰/۰۱. ($P<0/01$).

براساس نتایج جدول۲، مقایسه میانگین (آزمون تی‌وابسته) متغیرهای پژوهش جهت تأیید تأثیر الکل بر ایجاد استئوپروسیس بین دو گروه سالم و تزریق الکل (القاءاستئوپروز)(پایه)، نشان داد که وقوع پوکی استخوان در رت‌ها پس از تزریق الکل به شکل ایجاد تغییرات در دانسیته ماده معدنی استخوان فمور، حداکثر نیروی شکست فمور، سفتی استخوان فمور و سطح سرمی آلکالین فسفاتاز ویژه استخوان صورت پذیرفته است و می‌توان بیان کرد که تزریق صفاقی الکل با دوز بیان شده موجب القای استئوپروسیس در نمونه‌های پژوهش شده است. بر این اساس تمامی رت‌های مورد مطالعه که در گروه‌های تمرینی قرار می‌گیرند، پیش از اعمال مداخله تمرینی به روش فوق، استئوپروتیک شدند. برای بررسی اثر تمرین ترکیبی، مقاومتی و شنا بر استحکام مکانیکی کششی استخوان تیبیا و استحکام مکانیکی فشاری مهره L5 رت‌های ماده ویستار استئوپروتیک، میانگین پیش و پس آزمون متغیرها در گروه‌های پژوهش با استفاده از آزمون تی‌وابسته مقایسه شد. نتایج آزمون در جدول ۳ ارائه شده است.

جدول ۳. مقایسه استحکام مکانیکی کششی و فشاری استخوان در گروه‌های پژوهش در دو مرحله پیش‌آزمون و پس‌آزمون

گروه	متغیر	مرحله	انحراف‌معیار± میانگین	اختلاف میانگین‌ها (پیش‌آزمون- پس‌آزمون)	آماره t	سطح معنی‌داری
تمرین شنا	استحکام مکانیکی کششی استخوان تیبیا (نیوتن)	پیش‌آزمون	۴۹/۵۱ ± ۱۱/۴۵	-۱۰/۰۹	-۲/۸۷	*۰/۰۳۰
		پس‌آزمون	۵۹/۶۰ ± ۶/۳۳			
	استحکام مکانیکی فشاری مهره L5 (نیوتن)	پیش‌آزمون	۲۱۸/۳۵ ± ۲۲/۳۰	-۲۶/۴۴	-۲/۳۹	۰/۰۶۰
		پس‌آزمون	۲۴۴/۸۰ ± ۱۶/۵۷			
تمرین مقاومتی	استحکام مکانیکی کششی استخوان تیبیا (نیوتن)	پیش‌آزمون	۴۹/۵۱ ± ۱۱/۴۵	-۱۹/۸۶	-۴/۸۹۶	*۰/۰۰۴
		پس‌آزمون	۶۹/۳۸ ± ۷/۷۹			
	استحکام مکانیکی فشاری مهره L5 (نیوتن)	پیش‌آزمون	۲۱۸/۳۵ ± ۲۲/۳۰	-۱۲۷/۷۱	-۶/۶۹	*۰/۰۰۱
		پس‌آزمون	۳۴۶/۰۷ ± ۶۰/۳۰			
تمرین ترکیبی	استحکام مکانیکی کششی استخوان تیبیا (نیوتن)	پیش‌آزمون	۴۹/۵۱ ± ۱۱/۴۵	-۳۴/۴۱	-۸/۳۷	*۰/۰۰
		پس‌آزمون	۸۳/۹۳ ± ۴/۳۲			
	استحکام مکانیکی فشاری مهره L5 (نیوتن)	پیش‌آزمون	۲۱۸/۳۵ ± ۲۲/۳۰	-۹۹/۷۷	-۴/۰۱	*۰/۰۰۹
		پس‌آزمون	۳۱۸/۱۲ ± ۵۲/۰۱			
کنترل	استحکام مکانیکی کششی استخوان تیبیا (نیوتن)	پیش‌آزمون	۴۸/۸۵ ± ۱۱/۲۲	۱/۷۲	۳/۵۷	۰/۱۱۵
		پس‌آزمون	۴۷/۱۳ ± ۴/۳۲			
	استحکام مکانیکی فشاری مهره L5 (نیوتن)	پیش‌آزمون	۲۱۸/۳۵ ± ۲۱/۳۰	۲/۲۳	۳/۶۰	۰/۱۱۲
		پس‌آزمون	۲۱۶/۱۲ ± ۳۲/۰۱			

* معنی‌داری در سطح کمتر از ۰/۰۵. (*P<0/05*).

بر اساس نتایج جدول ۳، مقدار احتمال به‌دست آمده برای میانگین استحکام مکانیکی کششی استخوان تیبیا در گروه تمرین شنا کمتر از ۰/۰۵ می‌باشد (**P=۰/۰۳**)، لذا تفاوت معنی‌داری در میانگین استحکام مکانیکی کششی استخوان تیبیا گروه شنا در دو مرحله پایه و پس آزمون وجود دارد. این در حالی است که، مقایسه پیش آزمون و پس آزمون

متغیر استحکام مکانیکی فشاری مهره **L5** گروه شنا نشان می‌دهد که تفاوت آماری معنی‌داری در میانگین این متغیر در دو مرحله پایه و پس آزمون در گروه شنا وجود ندارد (**P=۰/۰٦**). همچنین چون مقدار احتمال به‌دست آمده برای استحکام مکانیکی کششی استخوان تیبیا (**P=۰/۰۰٤**) و استحکام مکانیکی فشاری مهره **L5** (**P=۰/۰۰۱**)، گروه تمرین مقاومتی کمتر از ۰/۰۵ می‌باشد، بین استحکام مکانیکی کششی استخوان تیبیا و استحکام مکانیکی فشاری مهره **L5** گروه تمرین مقاومتی در دو مرحله پایه و پس آزمون تفاوت آماری معنی‌داری وجود دارد. نهایتاً بر اساس نتایج جدول فوق، چون مقدار احتمال به‌دست آمده برای استحکام مکانیکی کششی استخوان تیبیا (**P=۰/۰۰۰**) و استحکام مکانیکی فشاری مهره **L5** (**P=۰/۰۰۹**)، گروه تمرین ترکیبی کمتر از ۰/۰۵ می‌باشد، بین استحکام مکانیکی کششی استخوان تیبیا و استحکام مکانیکی فشاری مهره **L5**، گروه تمرین ترکیبی در دو مرحله پایه و پس آزمون تفاوت آماری معنی‌داری وجود دارد به‌طوری‌که میانگین این متغیر در پس‌آزمون افزایش یافته است. ولی مقدار احتمال به‌دست آمده برای میانگین استحکام مکانیکی کششی و فشاری استخوان در گروه کنترل بیشتر از ۰/۰۵ شده (**P=۰/۱۱**)، لذا تفاوت معناداری در گروه کنترل مشاهده نشد. بررسی تغییرات استحکام مکانیکی کششی استخوان تیبیا و استحکام مکانیکی فشاری مهره **L5** رت‌های ماده ویستار استئوپروتیک، پس از ۱۲ هفته تمرین مقاومتی، شنا و ترکیبی، در چهار گروه پژوهش، با استفاده از تحلیل واریانس یک‌راهه انجام و از آزمون لون برای همگنی واریانس‌ها استفاده شد. نتایج آزمون نشان داد که سطح معنی‌داری به‌دست آمده جهت مقایسه گروه‌های پژوهش در مؤلفه استحکام مکانیکی کششی استخوان تیبیا و مولفه استحکام مکانیکی فشاری مهره **L5**، در مرحله پس آزمون کمتر از ۰/۰۵ می‌باشد (**P= ۰/۰۰**)، لذا تفاوت معنی‌داری در میانگین‌های پس‌آزمون استحکام مکانیکی کششی استخوان تیبیا و استحکام مکانیکی فشاری مهره **L5** در بین چهار گروه تمرین شنا، مقاومتی، ترکیبی و گروه کنترل وجود دارد. با توجه به نتیجه به‌دست آمده در آزمون لون جهت بررسی همگنی واریانس در استحکام مکانیکی کششی استخوان تیبیا (**P= ۰/۵۸**) و استحکام مکانیکی فشاری مهره **L5**، (**P= ۰/۰۷**)، فرض همگنی واریانس‌ها پذیرفته شده و بر این اساس برای مقایسه‌ی زوجی گروه‌ها از آزمون تعقیبی توکی استفاده شد؛ نتایج در جدول ٤ مشاهده می‌شود.

جدول ٤. نتایج آزمون تعقیبی توکی مقایسه میانگین استحکام مکانیکی کششی و فشاری استخوان در مرحله پس‌آزمون

متغیر	گروه	گروه	اختلاف میانگین‌ها	سطح معنی‌داری
استحکام مکانیکی کششی استخوان تیبیا (نیوتن)	تمرین ترکیبی	تمرین مقاومتی	۱٤/۵۵	*۰/۰۰٤
		تمرین شنا	۲٤/۳۲	*۰/۰۰۰
		کنترل	٤۵/٤۰	*۰/۰۰۰
	تمرین مقاومتی	تمرین شنا	۹/۷۷	۰/۰٦۱
		کنترل	۳۰/۸۵	*۰/۰۰۰
	تمرین شنا	کنترل	۲۱/۰۷	*۰/۰۰۰
استحکام مکانیکی فشاری مهره L5 (نیوتن)	تمرین ترکیبی	تمرین مقاومتی	-۲۷/۹٤	۰/٦۷۱۱
		تمرین شنا	۷۳/۳۲	*۰/۰۳۰
		کنترل	۷۸/۰۵	*۰/۰۲۰
	تمرین مقاومتی	تمرین شنا	۱۰۱/۲٦	*۰/۰۰۳
		کنترل	۱۰۵/۹۹	*۰/۰۰۲
	تمرین شنا	کنترل	٤/۷۲	۰/۹۹۱

* اختلاف در سطح معنی‌داری کمتر از ۰/۰۵ است (p<0/05).

استحکام مکانیکی کششی استخوان تیبیا گروه تمرین ترکیبی افزایش معنی‌داری را در مقایسه با گروه‌های تمرین مقاومتی، شنا و گروه کنترل نشان داد (P=۰/۰۰). گروه‌های تمرین مقاومتی و شنا در مقایسه با گروه کنترل، افزایش آماری معنی‌داری در این مؤلفه داشتند (P=۰/۰۰). ولی بین استحکام مکانیکی کششی استخوان تیبیا گروه تمرین مقاومتی و گروه تمرین شنا تفاوت آماری معنی‌داری وجود نداشت (P=۰/۰۶). همچنین استحکام مکانیکی فشاری مهره L5 در گروه تمرین ترکیبی افزایش معنی‌داری را در مقایسه با گروه‌های تمرین شنا و گروه کنترل نشان داد (P=۰/۰۳). گروه تمرین مقاومتی نیز افزایش معنی‌داری را در مقایسه با گروه‌های تمرین شنا و گروه کنترل نشان داد (P=۰/۰۰). گروه تمرین ترکیبی در مقایسه با گروه تمرین مقاومتی تفاوت معنی‌داری در این مؤلفه نداشت (P=۰/۶۷). بین استحکام مکانیکی فشاری مهره L5 گروه تمرین شنا و گروه کنترل تفاوت معنی‌داری وجود نداشت (P=۰/۹۹).

بحث

هدف از مطالعه حاضر، مقایسه اثر الگوهای تمرینی شنا، مقاومتی و ترکیبی بر استحکام مکانیکی بافت استخوان استئوپروتیک رت‌های ماده ویستار بود. در این پژوهش رت‌ها به‌وسیله تزریق اتانول داخل صفاقی دچار پوکی استخوان شدند که این تغییر به‌وسیله کاهش شاخص‌های دانسیته مواد معدنی استخوان، استحکام مکانیکی فمور و نشانگر بیوشیمیایی آلکالین فسفاتاز در مقایسه رت‌های گروه سالم و گروه تزریق الکل در مطالعه اولیه به‌دست آمد. وزن گروه‌های مورد مطالعه، در مقایسه با وضعیت پیش آزمون افزایش داشت، ولی تفاوت معنی‌داری در وزن بدن آن‌ها در مرحله پس آزمون وجود نداشت. تفاوت معنی‌داری در میانگین استحکام مکانیکی کششی استخوان تیبیا گروه تمرین شنا در دو مرحله پیش و پس آزمون وجود داشت. به طوری که میانگین این متغیر در پس‌آزمون افزایش یافته بود در حالی که، در متغیر استحکام مکانیکی فشاری مهره L5 گروه تمرین شنا تفاوت معنی‌داری در دو مرحله پیش و پس آزمون وجود نداشت. بین استحکام مکانیکی کششی استخوان تیبیا گروه تمرین مقاومتی در دو مرحله پیش و پس آزمون تفاوت معنی‌داری به نفع مرحله پس‌آزمون وجود داشت. به علاوه استحکام مکانیکی فشاری مهره L5 گروه تمرین مقاومتی در مرحله پس آزمون نسبت به مرحله پیش آزمون افزایش معنی‌داری را نشان داد. پارامترهای استحکام مکانیکی کششی استخوان تیبیا و استحکام مکانیکی فشاری مهره L5 گروه تمرین ترکیبی در مرحله پس آزمون افزایش معنی‌داری را در مرحله پس‌آزمون نسبت به مرحله پیش آزمون نشان دادند.

در پارامتر استحکام مکانیکی کششی استخوان تیبیا گروه تمرین ترکیبی افزایش معنی‌داری را در مقایسه با گروه‌های تمرین مقاومتی، شنا و گروه کنترل نشان داد. گروه‌های تمرین مقاومتی و شنا در مقایسه با گروه کنترل، افزایش معنی‌داری در این مؤلفه داشتند. بین استحکام مکانیکی کششی استخوان تیبیا گروه تمرین مقاومتی و گروه تمرین شنا تفاوت معنی‌داری وجود نداشت. در متغیر استحکام مکانیکی فشاری مهره L5 ،گروه تمرین ترکیبی افزایش معنی‌داری را در مقایسه با گروه‌های تمرین شنا و گروه کنترل نشان داد. گروه تمرین مقاومتی نیز افزایش معنی‌داری را در مقایسه با گروه‌های تمرین شنا و گروه کنترل نشان داد. گروه تمرین ترکیبی در مقایسه با گروه تمرین مقاومتی تفاوت معنی‌داری در این مؤلفه نداشت. بین استحکام مکانیکی فشاری مهره L5 گروه تمرین شنا و گروه کنترل تفاوت معنی‌داری وجود نداشت.

در بخش ارزیابی استحکام مکانیکی کششی استخوان تیبیا، گروه تمرین ترکیبی افزایش معنی‌داری را در مقایسه با گروه‌های تمرین مقاومتی، شنا و گروه کنترل نشان داد. آگوییار (۲۰۱۰)، در پژوهشی، کاهش استحکام کششی در تمرین استقامتی را با کاهش ماتریکس ارگانیک، به‌طور ویژه کلاژن نوع ۱ مرتبط دانست (۷). اهمیت کلاژن در قدرت و استحکام مکانیکی استخوان، در بیماری‌هایی مانند استئوژنز ایمپرفکتا نمایان می‌گردد که در این بیماری یک نقص ساختاری کلاژن وجود دارد و در نتیجه خطر شکستگی افزایش می‌یابد (۲۰). علاوه بر آن شبکه کلاژنی دارای ارتباطات عرضی بسیاری است که آبنرمالیتی‌های موجود در ارتباطات عرضی شبکه کلاژن، با افزایش خطر

شکستگی ارتباط داده شده است. حجم پایین ارتباط عرضی بافت کلاژن در حیوانات آزمایشگاهی، قدرت خمشی استخوان را ۲۶ درصد و خاصیت الاستیستی را ۳۰ درصد کاهش می‌دهد (۲۱). علاوه بر حجم بافت کلاژنی و اتصالات عرضی شبکه کلاژنی که در استحکام مکانیکی و خاصیت الاستیستی استخوان نقش دارند، مارتین و همکاران (۲۰۰۸) در تحقیقی با هدف بررسی اثرات تراکم و جهت‌گیری کلاژن بر استحکام و قدرت مکانیکی استخوان نشان دادند که جهت‌گیری فیبرهای کلاژن نیز به‌عنوان یکی دیگر از پیش‌گویی کننده‌های مهم استحکام کششی استخوان است (۲۲). در پژوهش حاضر اثر مثبت تمرین ترکیبی بر استحکام مکانیکی کششی استخوان تیبیا احتمالاً مؤید این مسئله است که این تمرین توانسته است بر تراکم و جهت‌گیری فیبرهای کلاژن مؤثر بوده باشد. به‌نظر می‌رسد که تمرین ترکیبی توانسته است از ویژگی‌های مثبت و اثرگذار هر دو الگوی تمرینی شنا و مقاومتی در مجموع بر بهبود وضعیت کلاژنی ساختار استخوانی که تعیین کننده استحکام مکانیکی کششی استخوان هستند اثر گذار بوده باشد. نتایج مطالعه سیلوا و همکاران (۲۰۰۶) نشان داد میک‌هایی که دارای استخوان‌های ضعیف و شکننده هستند، دارای فیبریل‌های کلاژنی سازمان نیافته و هم‌چنین حجم کلی کلاژنی پایینی هستند (۲۳). ایساکسون و همکاران (۲۰۰۹) در آزمایشی نشان دادند که تمرین مقاومتی، استحکام کششی استخوان‌های کلسیم‌گیری شده در موش‌ها را افزایش داد علی‌رغم اینکه هیچ‌گونه تغییری در مقدار کل کلاژن ایجاد نشده بود (۲۴). پیشنهاد و توجیه این بود که تغییر در خواص مکانیکی کششی استخوان ممکن است در اثر بهبود سازمان شبکه‌ای کلاژن ایجاد شده باشد. بر اساس این یافته احتمال می‌رود تمرین ترکیبی پژوهش حاضر بر بهبود سازمان شبکه‌ای کلاژن استخوان تیبیا نیز اثرگذار باشد.

بر اساس نتایج پژوهش حاضر احتمال می‌دهد که که انقباضات عضلانی مؤثر در تمرین شنا و بارهای مکانیکی بهینه ناشی از تمرینات مقاومتی و ترکیبی، به عنوان فاکتورهای تعیین کننده در حفظ سنتز کلاژن بافت استخوانی بوده و باعث افزایش حجم ارتباط عرضی بافت کلاژن شده و یا به جهت‌گیری مناسب فیبرهای کلاژن یا بهبود سازمان شبکه‌ای کلاژن کمک کرده است و یا حتی ممکن است بر مجموعه عوامل مطرح شده اثرگذار باشد، چرا که افزایش استحکام کششی استخوان، یا به عبارتی الاستیسیتی استخوان کاملاً به بافت کلاژن استخوان وابسته است و از طرفی با توجه به بالا بودن میانگین استحکام کششی استخوان تیبیا در تمرین ترکیبی در مقایسه با سایر گروه‌های تمرینی به نظر می‌رسد که این الگوی تمرینی اثر بخشی بهینه‌تری را بر شبکه کلاژنی استخوان تیبیا داشته است و احتمالاً از بهره مکانیکی هر دو تمرین شنا و مقاومتی با هم بهره جسته است. نکته قابل توجه دیگر در پژوهش حاضر، افزایش استحکام مکانیکی کششی گروه شنا در مقایسه با گروه کنترل است. احتمال می‌رود که بارهای مکانیکی اعمال شده به‌وسیله تمرین شنا در تحقیق حاضر، شدت مناسب را برای تحریک مکانیکی ماتریکس آلی بافت استخوانی داشته است.

اگرچه عنوان شده است که بار مکانیکی، اولین فاکتور در افزایش تراکم ماده معدنی استخوان است (۷). نتایج تحقیق ما پیشنهاد می‌کنند که بارهای مکانیکی در تمرین شنا و مقاومتی با هم ممکن است فاکتور تعیین کننده در حفظ سنتز کلاژن بافت استخوانی باشد که این نتیجه در مجموع در تمرین ترکیبی نمایان می‌گردد. براساس این ایده، احتمالاً الگوی تمرین ترکیبی بتوانند فاکتور محرک برای افزایش الاستیسیتی استخوان، ناشی از حفظ سنتز کلاژن باشد که از این طریق استحکام مکانیکی استخوان را بهبود می‌بخشد. از طرفی شواهد علمی آشکار می‌کند که نقص در زنجیره‌های پلی پپتیدی کلاژن موجود در ماتریکس بافت استخوان با افزایش خطر شکستگی مرتبط است (۲۵). پیش از این نیز و در تأیید یافته‌های مطالعه حاضر، تست مکانیکی انجام شده در حیوانات تمرین کرده نشان داد که خاصیت الاستیسیتی فمور رت‌های تمرین کرده نسبت به رت‌های غیر فعال شاهد، افزایش قابل توجهی بدون تغییر معنی‌دار در تراکم توده و اندازه استخوان داشته است (۱۷). بهبودی بیومکانیکی ماتریکس استخوان در حیوانات آزمایشگاهی تمرین کرده ممکن است با تنظیم آنزیمی سنتز شبکه کلاژنی مرتبط باشد (۲۶). بر اساس شواهد علمی که نشان می‌دهد که تمرین مقاومتی به‌وسیله تأثیرگذاری بر واگردش استخوان، ممکن است باعث

افزایش نوسازی کلاژن ماتریکس استخوان گردد (۵)، که احتمالاً تمرین ترکیبی از این طریق توانسته است استحکام مکانیکی کششی تیبیا را بهبود ببخشد.

در بخش ارزیابی استحکام مکانیکی فشاری مهره L5، یافته‌های تحقیق حاضر با نتیجه آگوییِنار و همکاران (۲۰۱۰) هم سو بود (۷). آگوییِنار پاسخ متفاوت ویژگی‌های مکانیکی استخوان فمور رت‌های نر به دو نوع مدل تمرین بدنی را نشان داد. از آنجایی‌که سازگاری‌های دائمی بافت استخوانی، ویژگی‌های منحصر به فرد این بافت را در پاسخ به محرک‌های به کار گرفته شده در طی تمرین بدنی نشان می‌دهد. یافته‌ها، از این قاعده حمایت می‌کنند که احتمالاً هر الگوی فعالیت بدنی به صورت الگوی خاص عمل می‌کند و تمرین مقاومتی و ترکیبی توانسته‌اند بار مکانیکی لازم را در ناحیه مهره L5 اعمال نمایند اما تمرین شنا این اثرگذاری را نداشته است. چرا که در تمرین مقاومتی و بخشی از تمرین ترکیبی بار وزنه متصل شده به دم رت می‌تواند اثر استئوژنیک لازم را در این ناحیه داشته باشد.

مطالعات متعددی نشان داده‌اند که حساسیت مکانیکی بافت اسفنجی بسیار بیشتر از بافت ترابکولار است و این موضوع می‌تواند پاسخ بافت استخوان را به محرک‌های آنابولیکی و کاتابولیکی تحت تأثیر قرار دهد (۲۶ ،۵). از آنجایی‌که سطح وسیع موجود در شبکه ترابکولار در بافت استخوانی جسم مهره احتمالاً ناحیه وسیع‌تری را برای سلول‌های تشکیل دهنده و جذب کننده استخوان فراهم می‌کند. به‌طوری‌که بارمکانیکی حاصل از تمرین مقاومتی و ترکیبی برای اثرگذاری مثبت و ایجاد تغییرات انطباقی در بافت ترابکولا بسیار مؤثر بوده است به‌طور کلی مکانیزم‌های فیزیکی و بیولوژیکی که سازگاری استخوان در برابر بارهای مکانیکی را کنترل می‌کنند، پیچیده‌اند (۱۵).

قبلا بیان گردید که استخوان از مواد زیستی مرکب، شامل هر دو نوع ترکیبات معدنی (هیدروکسی آپاتیت) و ترکیبات آلی (کلاژن، پروتئوگلیکان و گلیکوپروتئین) تشکیل شده است. بنابراین قدرت بیومکانیکی استخوان، به عنوان یک شاخص مهم در خطر شکستگی استخوان، به طور مشترک توسط ترکیبات معدنی و ترکیبات آلی تعیین می‌شود (۲۶). ماتریکس ارگانیک که داربستی از شبکه پروتئینی کلاژنی است، خاصیت الاستیک و انعطاف‌پذیر داشته و به استخوان توانایی مقاومت در مقابل کشش را می‌دهد. از سوی دیگر جزء معدنی املاح کلسیم رسوب شده در ماتریکس به دلیل سختی و محکمی، به استخوان توانایی مقاومت در مقابل فشار را می‌دهد. بنابراین تغییرات در هر دو بخش، ممکن است بر ویژگی‌های مکانیکی استخوان و در نتیجه خطر شکستگی تأثیرگذار باشند. با توجه به این معلومات، به نظر می‌رسد افزایش استحکام مکانیکی فشاری مهره L5 در رت‌های استئوپروتیک در گروه‌های تمرینی مقاومتی و ترکیبی، با افزایش فاز معدنی ماتریکس ارگانیک در ارتباط باشد. بافت استخوانی به تغییرات معنی‌دار در ویژگی‌های مکانیکی استخوان پاسخ مناسب می‌دهند و تست مکانیکی استخوان (شامل استحکام و قدرت مکانیکی بافت) یک روش کارآمد برای تعیین وضعیت عملکردی استخوان است. صاحب نظران بر نقش تمرینات بر استحکام و قدرت مکانیکی استخوان صحه گذاشته‌اند، اما به واسطه‌ی محدودیت‌های طرح مطالعاتی و تکنولوژی ارزیابی‌های غیرتهاجمی استخوان، در انسان‌ها نادیده گرفته می‌شوند.

نتیجه‌گیری

پژوهش حاضر نشان می‌دهد که مداخله ترکیب تمرین شنا و مقاومتی در الگوی ترکیبی، ممکن است یک اثر هم‌افزایی بر افزایش استحکام مکانیکی کششی استخوان درشت نی و استحکام فشاری مهره L5 در رت‌های ماده استئوپروتیک داشته باشد. این الگوی مداخله‌ای، به نظر می‌رسد که استحکام مکانیکی استخوان را بهتر از اجرای محض تمرین شنا یا مقاومتی افزایش داده و باعث مراقبت بهینه‌تری در برابر استئوپروسیس فراهم نماید.

تشکر و قدردانی

از معاونت محترم پژوهشی، اساتید گرانقدر گروه علوم ورزشی دانشگاه سیستان و بلوچستان و مدیر و مسئول آزمایشگاه حیوانات دانشگاه علوم پزشکی زاهدان، که در اجرای این تحقیق، همکاری صمیمانه داشتند، تشکر و قدردانی می‌گردد.

ملاحظات اخلاقی

این پژوهش حاصل پایان نامه مقطع کارشناسی ارشد گرایش فیزیولوژی ورزشی دانشگاه سیستان و بلوچستان است که قبل از انجام پژوهش در گروه علوم ورزشی دانشگاه با کد ۱۹۸۶۰ تصویب و جهت رعایت ملاحظات اخلاقی از کمیته اخلاق دانشگاه سیستان و بلوچستان کد اخلاق به شماره IR.USB.REC.1400.044 دریافت شد. از هیچ‌کدام از روش‌های محرک دردناک جهت الزام به انجام فعالیت‌های بدنی استفاده نشد و تنها از ماساژ گردن رت‌ها جهت تحریک آن‌ها استفاده شد.

تعارض و منافع

نویسندگان مقاله اعلام می دارند که هیچ گونه تضادی در منافع وجود ندارد.

منابع

1. Parkinson IH, Fazzalari NL. Characterisation of Trabecular Bone Structure. Studies in Mechanobiology Tissue Engineering and Biomaterials. 2013;31−51.
2. Boonen S, Wahl DA, Nauroy L, Brandi ML, Bouxsein ML, Goldhahn J, et al. Balloon kyphoplasty and vertebroplasty in the management of vertebral compression fractures. Osteoporosis International With other Metabolic Bone Diseases. 2011;22(12):2915-34.
3. Puisto V, Heliövaara M, Impivaara O, Jalanko T, Kröger H, Knekt P, et al. Severity of vertebral fracture and risk of hip fracture: a nested case−control study. Osteoporosis International With other Metabolic Bone Diseases. 2011;22(1):63-8.
4. Hernlund E , Svedbom A, Ivergård M, Compston J, Cooper C, Stenmark J, et all. Osteoporosis in the European Union: medical management, epidemiology and economic burden. A report prepared in collaboration with the International Osteoporosis Foundation (IOF) and the European Federation of Pharmaceutical Industry Associations (EFPIA). Archives of Osteoporosis. 2013;8(2):136.
5. Fonseca H , Moreira- Goncalves D , Appell coriolano HJ, Duarte J A. Bone Quality: The Determinants of Bone Strength and Fragility. Sports Medicine. 2013;10:1007-1013.
6. Diaz-Curiel M. Effects of Exercise on Osteoporosis. Journal of Osteoporosis and Physical Activity Open Access. 2013;1:1-2.
7. Aguiar AF, Agati LB, Muller SS, Pereira OC,et al. Effects of physical training on the mechanical resistance of rat femur proximal thirds. Acta Trtopica. 2010;18(5):245-9.
8. Joo Y-I, Sone T, Fukunaga M, Lim S-G, Onodera S. Effects of endurance exercise on three-dimensional trabecular bone microarchitecture in young growing rats. Bone. 2020;33(4):485-93.
9. Iwamoto J, Yeh J, Aloia J. Differential effect of treadmill exercise on three cancellous bone sites in the young growing rat. Bone. 2009;24(3):163-9.
10. Dobidi Roshan va, Hemti Safarshahi I, Nuraldini H. The interactive effect of 8 weeks of endurance training and turmeric extract on the mineral density of different areas of the femur. Journal Ofoghedanesh. 2012;18(2):56-62. [Persion.[
11. Maurel DB, Boisseau N, Pallu S, Rochefort GY, Benhamou CL, Jaffre C. Regular exercise limits alcohol effects on trabecular, cortical thickness and porosity, and osteocyte apoptosis in the rat. Joint Bone Spine. 2018;80(5):492-8.
12. Chang TK, Huang CH, Huang CH, Chen HC, Cheng CK. The influence of long-term treadmill exercise on bone mass and articular cartilage in ovariectomized rats. BMC Musculoskeletal Disorders. 2013;20(11):185-192.
13. Renno AC, Silveira Gomes AR, Nascimento RB, Salvini T, Parizoto N. Effects of a progressive loading exercise program on the bone and skeletal muscle properties of female osteopenic rats. Experimental Gerontology. 2007;42(6):517-22.
14. Bolam KA, van Uffelen JG, Taaffe DR.The effect of physical exercise on bone density in middle-aged and older men: A systematic review. Osteoporosis International With other Metabolic Bone Diseases. 2013;24(1):2749−62.
15. Hagihara Y, Nakajima A, Fukuda S, Goto S, Iida H, Yamazaki M. Running exercise for short duration increases bone mineral density of loaded long bones in young growing rats.Tohoku Journal of Experimental Medicine. 2009;219(2):139-43.
16. El-Shenawy, Siham MA, Nemat AZ Yassin, Osama A. Badary, Mostafa Abd El-Moneem, and Hanan M. Al-Shafeiy. "Study of the effect of Allium porrum on osteoporosis induced in rats." 2013:188-198.
17. Wang Y, Owoc JS, Boyd SK, Videman T, Battié MC.Regional variations in trabecular architecture of the lumbar vertebra: associations with age, disc degeneration and disc space narrowing. Bone. 2013;56(2):249-54.
18. Callaci JJ, Juknelis D, Patwardhan A, Sartori M, Frost N, Wezeman FH. The effects of binge alcohol exposure on bone resorption and biomechanical and structural properties are offset by concurrent bisphosphonate treatment. Alcoholism: Clinical and Experimental Dental Research. 2004;28(1):182-91.
19. Hossini M, Piri M, Hajs S. Effect of endurance, resistance and concurrent traaining on the heart structure of the femal university students. Olympic Journal. 2009;44(4):82-95.[Persion[
20. Pinnell SR. Regulation of collagen biosynthesis by ascorbic acid: a review. Yale Journal of Biology and Medicine. 1985;58(6):553−9.
21. Zhang Y, Li Y, Gao Q, Shao B, Xiao J, Zhou H, et al. The variation of cancellous bones at lumbar vertebra, femoral neck, mandibular angle and rib in ovariectomized sheep. Archives of Oral Biology. 2014;59:663-9.
22. Martyn-St JM, Carroll S. Meta-analysis of walking for preservation of bone mineral density in postmenopausal women. Bone.

2008;43(3):521-31.
23. Silva MJ, Brodt MD, Wopenka B, et al. Decreased collagen organization and content are associated with reduced strength of demineralized and intact bone in the SAMP6 mouse. Bone and Mineral Research. 2006;21(1):78–88.
24. Isaksson H, Tolvanen V, Finnila MA, et al. Physical exercise improves properties of bone and its collagen network in growing and maturing mice. Calcified Tissue International and Musculoskeletal Research. 2009;85(3):247–56.
25. Armas LA, Recker RR. Pathophysiology of osteoporosis: new mechanistic insights. Endocrinology and Metabolism Clinics of North America. 2012;41:475-86.
26. Cassilhas RC, Reis IT, Venâncio D, Fernandes J, Tufik S, Mello MT. Animal model for progressive resistance exercise: a detailed description of model and its implications for basic research in exercise. Motriz: Revista de Educação Física. 2013;19:178-84.