Published Online: 2016.July.05

Research Article

Change of Optimum Angle for Torque Production after Repeated Bouts of Maximal Intensity Eccentric Exercises

Mandana Rezaei[1,2*], Behnoush Vassaghi-Gharamaleki[3], Ismael Ebrahimi- Takamjani[4], Ali A. Jamshidi[5], Naser Havaei[6]

1. Assistant Professor, School of Rehabilitation, Tabriz University of Medical Sciences, Tabriz, Iran
2. PhD of Physiotherapy, Physical Medicine and Rehabilitation Research Centre, Imam Reza Education and Research Centre, Tabriz University of Medical Sciences, Tabriz, Iran
3. Assistant Professor, School of Rehabilitation, Iran University of Medical Sciences, Tehran, Iran
4. Full Professor, School of Rehabilitation, Iran University of Medical Sciences, Tehran, Iran, Rehabilitation Research Center, Biomechanics Lab, Iran University of Medical Sciences, Tehran, Iran
5. Associate Professor, School of Rehabilitation, Iran University of Medical Sciences, Tehran, Iran
6. Assistant professor, department of occupational therapy, school of rehabilitation, tabriz university of medical sciences, tabriz, iran

Received: 2015. March.08 Revised: 2016. May.29 Accepted: 2016. June.13

Abstract

Background and aim: The purpose of the present study was to evaluate the effect of repeated bouts of maximal intensity eccentric exercise at knee extensors on optimum angle and eccentric exercise-induced muscle damage indicators.

Materials and Methods: A total of 15 untrained healthy females performed two bouts of maximal intensity eccentric exercises (6 sets*20 repetitions) at knee extensors with the time interval of two weeks. Isometric and concentric extensor torques, optimum torque angles, delayed onset muscle soreness, knee range of motion, and thigh circumference were measured before and immediately, 48 hours, and 5 days after two bouts of eccentric exercises.

Results: Reduction of torques and range of motion, increase in optimum angle, and delayed onset muscle soreness were significant after the first bout of eccentric exercise. After the second bout, reductions in concentric torques and range of motion were less. Optimum angle at the velocity of 60 degree per second was increased and delayed onset muscle soreness was decreased at 48 hours after the second bout compared with that after the first bout ($P<0.05$).

Conclusion: Eccentric exercise induced muscle damage was evident after the first bout of eccentric exercise. Also, repeated bout effect was observed after the second bout. A change of optimum angle indirectly indicates the roll of cellar mechanisms in adaptation process to eccentric exercises.

Keywords: Exercise; Eccentric; Eccentric exercise-induced muscle damage; Optimum angle; Repeated bout effect

Cite this article as: Mandana Rezaei, Behnoush Vassaghi-Gharamaleki, Ismael Ebrahimi- Takamjani, Ali A. Jamshidi, Naser Havaei. Change of Optimum Angle for Torque Production after Repeated Bouts of Maximal Intensity Eccentric Exercises. J Rehab Med. 2017; 6(2): 131-140.

* Corresponding Author: Mandana Rezaei. Assistant Professor, School of Rehabilitation, Tabriz University of Medical Sciences, Tabriz, Iran
E-mail: mandana.rezae@gmail.com

تغییر در زاویه بهینه تولید گشتاور اکستانسوری زانو متعاقب تکرار تمرینات اکسنتریک با شدت حداکثر

ماندانا رضایی[1و2*]، بهنوش وثاقی-قراملکی[3]، اسماعیل ابراهیمی-تکامجانی[4]، علی اشرف جمشیدی[5]، ناصر حوایی[6]

۱. استادیار، دانشکده توانبخشی، دانشگاه علوم پزشکی تبریز، تبریز، ایران
۲. دکترای تخصصی فیزیوتراپی، مرکز تحقیقات طب فیزیکی و توانبخشی، دانشگاه علوم پزشکی تبریز، تبریز، ایران
۳. استادیار، دانشکده توانبخشی، دانشگاه علوم پزشکی ایران، تهران، ایران
۴. استاد، دانشکده توانبخشی، دانشگاه علوم پزشکی ایران، تهران، ایران
۵. دانشیار، دانشکده توانبخشی، دانشگاه علوم پزشکی ایران، تهران، ایران
۶. استادیار، گروه کاردرمانی، دانشکده توانبخشی، دانشگاه علوم پزشکی تبریز، تبریز، ایران

* دریافت مقاله ۱۳۹٤/۱۲/۱۷ بازنگری مقاله ۱۳۹۵/۰۳/۰۹ پذیرش مقاله ۱۳۹۵/۰۳/۲٤ *

چکیده

زمینه و اهداف

هدف از مطالعه حاضر بررسی تغییرات در زاویه بهینه گشتاور و تظاهرات صدمه عضلانی ناشی از تکرار تمرینات اکسنتریک اکستانسوری زانو با شدت حداکثر بود.

روش بررسی

۱۵ زن تمرین نکرده سالم دو مرتبه تمرین اکسنتریک با شدت حدکثر (۶ ست * ۲۰ تکرار) را با فاصله دو هفته در اکستانسورهای زانو انجام دادند. گشتاورهای ایزومتریک و کانسنتریک اکستانسوری، زاویه بهینه گشتاورها، آزردگی عضلانی تاخیری، دامنه حرکتی زانو و محیط ران در فواصل زمانی قبل و بلافاصله ۴۸ ساعت و ۵ روز بعد از تمرینات اندازه‌گیری شد.

یافته‌ها

افت در گشتاورها و دامنه حرکتی، افزایش زاویه بهینه، آزردگی عضلانی تاخیری پس از مرتبه اول تمرین اکسنتریک مشهود بود. پس از مرتبه دوم تمرین اکسنتریک، افت گشتاورهای کانسنتریک و دامنه حرکتی کمتر شد. زاویه بهینه در سرعت ۶۰ درجه بر ثانیه افزایش یافت و آزردگی عضلانی تاخیری بعد از مرتبه دوم تمرین اکسنتریک در زمان ۴۸ ساعت به صورت معناداری کمتر از مرتبه اول بود ($P<۰/۰۵$).

نتیجه‌گیری

صدمه عضلانی ناشی از تمرین اکسنتریک پس از مرتبه اول تمرین مشهود بود. اثر تکرار تمرین در مرتبه دوم تمرین مشاهده شد. تغییرات در زاویه بهینه به صورت غیرمستقیم نشان‌دهنده نقش مکانیسم‌های سلولی در روند سازگاری به تمرینات اکسنتریک است.

کلید واژه‌ها

تمرین؛ اکسنتریک؛ صدمه عضلانی ناشی از تمرین اکسنتریک؛ زاویه بهینه؛ اثر تکرار تمرین

* **نویسنده مسئول:** ماندانا رضایی، استادیار، دانشکده توانبخشی، دانشگاه علوم پزشکی تبریز، تبریز، ایران
آدرس الکترونیکی: mandana.rezae@gmail.com

مقدمه و اهداف

تمرینات اکسنتریک با شدت بالا توسط وزنه‌برداران و بدنسازان جهت افزایش اندازه عضلات و توانایی تولید نیرو استفاده می‌شود. بسیاری از حرکات ورزشی شامل پرش، فرود و تغییرات ناگهانی مسیر حرکت نیازمند انقباض‌های اکسنتریک می‌باشد.[۱] صدمه عضلانی ناشی از تمرین اکسنتریک در افرادی که فعالیت فیزیکی غیرمعمول یا شدید اکسنتریک انجام می‌دهند، شایع است. این صدمه عضلانی به صورت میکروتروما بروز کرده و متمایز از استرین‌های حاد عضلانی در نتیجه بارگذاری بیش از حد اکسنتریک می‌باشد.[۲] صدمه عضلانی به صورت احساس کوفتگی با تظاهراتی از قبیل آزردگی عضلانی تاخیری، افت تنشن عضله، کاهش دامنه حرکتی و تورم به صورت موقت پس از اجرای تمرینات اکسنتریک بروز کرده و طی هفته‌های آتی به صورت کامل رفع می‌گردد. افت قدرت عضله از معتبرترین و تکرارپذیرترین شاخص‌های صدمه عضلانی ناشی از تمرینات اکسنتریک است.[۳] اختلال در عملکرد مزدوج شدن تحریک–انقباض (Excitation–contraction coupling) در نتیجه تغییر در نفوذپذیری غشای سارکوپلاسمی به یون‌ها[۴] مسئول بیش از ۷۵ ٪ از افت قدرت عضله است که بلافاصله بعد از قطع تمرین اکسنتریک بروز می‌کند.[۳، ۵–۷] جابه‌جایی نقطه بهینه طول عضله جهت تولید حداکثر تنشن در منحنی طول–تنشن عضله به سمت راست در نتیجه از هم گسیختگی سارکومرها به عنوان علت احتمالی دیگری برای افت قدرت عضله متعاقب این نوع انقباض مطرح می‌شود.[۶]

روند ترمیم عضله متعاقب اجرای تمرینات اکسنتریک از ساعات اولیه صدمه عضلانی شروع می‌شود[۸] و تظاهرات صدمه عضلانی در مرتبه بعدی تمرین با شدت کمتری بروز می‌کند. سازگاری پس از مرتبه اول تمرین، تحت عنوان اثر تکرار تمرین (Repeated Bout Effect) شناخته می‌شود.[۳، ۹، ۱۰] مکانیسم این اثر به صورت کامل شناخته نشده، ولی فرضیاتی در این رابطه ارائه گردیده است. محققین سازگاری در سطوح سلولی، مکانیکی و عصبی را مطرح کرده‌اند.[۳، ۵، ۹] یکی از مکانیسم‌های مفروض در سطح سلولی اضافه شدن سارکومرها به صورت سری است که سبب جابه‌جایی منحنی طول–تنشن عضله به سمت راست می‌شود و در مطالعات حیوانی تایید شده است.[۵]

اندازه‌گیری میزان تنشن یا قدرت عضله اکثرا به صورت نیرو[۱۱ و ۱۲] یا گشتاور ایزومتریک[۱۳–۲۱] در زاویه‌ای از مفصل است که انتظار می‌رود بیشترین میزان نیرو تولید شود که تحت عنوان زاویه بهینه (Optimum Angle) در مقالات به آن اشاره شده است. به نظر می‌رسد به‌دلیل انتقال نقطه حداکثر تولید تنشن به طول‌های بالاتر در اثر از هم‌گسیختگی سارکومرها متعاقب انقباض‌های اکسنتریک[۵، ۶ و ۲۲]، اندازه‌گیری گشتاور ایزومتریک در یک زاویه خاص در مطالعات انسانی نتواند تغییرات تنشن عضله را متعاقب تمرین اکسنتریک به درستی نمایان سازد.

تغییرات گشتاورهای ایزومتریک فلکسوری آرنج متعاقب اجرای تمرین اکسنتریک با شدت‌های مختلف[۲۳] و تکرارهای مختلف تمرین اکسنتریک[۲۴] در زوایای مختلف فلکشن آرنج بررسی شده است. نتایج نشان‌دهنده افت بیشتر گشتاور در زوایای کمتر فلکشن آرنج بوده است که با فرضیه جابه‌جایی رابطه طول– تنشن عضله به سمت راست هم‌خوانی دارد. هرچند با وجود بهبودی در افت قدرت بعد از تکرار تمرینات اکسنتریک، زاویه بهینه عضله برای تولید حداکثر گشتاور افزایش نیافت.[۲۳ و ۲۴] در مطالعه Chen و همکاران (۲۰۰۷)، تمرینات اکسنتریک فلکسورهای آرنج در مرتبه اول تمرین با شدت‌های مختلف در چهار گروه اجرا شدند و ۲–۳ هفته بعد مرتبه دوم تمرین اکسنتریک با شدت ۱۰۰ ٪ اجرا شد. در این مطالعه، زاویه بهینه در جلسه پیش‌آزمون قبل از اجرای مرتبه دوم تمرین اکسنتریک با شدت ۱۰۰٪ نسبت به جلسه پیش‌آزمون قبل از اجرای مرتبه اول تمرین اکسنتریک با شدت ۱۰۰٪ در حدود ۴ درجه افزایش یافت، در حالی‌که در سایر گروه‌ها تغییرات زاویه بهینه در مرتبه اول و دوم تمرین اکسنتریک با یکدیگر تفاوتی نداشت.[۲۳]

در یک مطالعه پس از اجرای تمرینات اکسنتریک در عضله همسترینگ و تکرار آنها، جابه‌جایی در زاویه بهینه مشاهده گردید که با وجود ریکاوری قدرت در روز دهم پس از تمرین، نسبت به پیش‌آزمون معنادار بود.[۲۵] در رابطه با تغییرات زاویه بهنیه در اکستانسورهای زانو نتایج متناقضی گزارش شده است. این عضلات در فعالیت‌های روزمره و خصوصا ورزشی در معرض بارگذاری اکسنتریک هستند و بررسی پاسخ‌های تطابقی آنها به تمرینات اکسنتریک جهت بهبود عملکرد عضله و جلوگیری از بروز صدمات از اهمیت ویژه‌ای برخوردار است.[۲۶ و ۲۷] در مطالعه Chen و همکاران (۲۰۱۱) چهار گروه عضلات فلکسورها و اکستانسورهای مفاصل زانو و آرنج از نظر بروز تظاهرات صدمه عضلانی ناشی از تمرینات اکسنتریک و تغییر در زاویه بهینه در انقباض‌های ایزومتریک و کانسنتریک با سرعت زاویه‌ای ۶۰ درجه بر ثانیه مقایسه شدند. در تمامی گروه‌ها زاویه بهینه غیر از اکستانسورهای زانو افزایش یافت.[۲۶] بعد از اجرای تمرین اکسنتریک به صورت بالا و پایین رفتن از پله و ایجاد کوفتگی در عضله کوادریسپس به صورت ساب ماکزیمال، با وجود عدم تغییر در قدرت عضله، زاویه بهینه افزایش

یافت.[۲۸] در مطالعه دیگری تمرینات با شدت حداکثر در عضله کوادریسپس انجام شد و زاویه بهینه افزایش یافت، هرچند پس از ۸ روز به حد پیش‌آزمون برگشت.[۲۷]

تظاهرات صدمه عضلانی متعاقب تمرینات اکسنتریک علی‌رغم یکسان بودن شدت تمرین (حداکثر یا زیر حداکثر)، در گروه‌های عضلانی مختلف متفاوت گزارش شده است.[۱۷ و ۲۶] بنابراین تعمیم نتایج گروه‌های متخلف عضلانی امکان‌پذیر نمی‌باشد. از طرفی دیگر در رابطه با پاسخ تطابقی اکستانسورهای زانو متعاقب تکرار تمرینات اکسنتریک اطلاعات محدودی موجود است.

بنابراین هدف از مطالعه حاضر بررسی تغییرات در زاویه بهینه گشتاور و تظاهرات صدمه عضلانی ناشی از تکرار تمرینات اکسنتریک اکستانسوری زانو با شدت حداکثر بود.

مواد و روش ها

در مطالعه شبه‌تجربی حاضر با اندازه‌گیری‌های مکرر ۱۵ زن تمرین نکرده سالم به صورت داوطلبانه و بعد از پر کردن فرم رضایت‌نامه اخلاقی با میانگین سن، وزن و قد به ترتیب ۲۲/۳۸±۲/۹۳ سال، ۵۷/۹۲±۵/۴۶ کیلوگرم و ۱۶۲/۲۳±۶/۲۲ سانتی‌متر در دوره وسط سیکل قائدگی در مرکز تحقیقات طب فیزیکی و توانبخشی بیمارستان امام رضای تبریز و محدوده سال‌های ۱۳۹۰-۱۳۹۱ وارد مطالعه شدند. افرادی با سطح تحرک بدنی، ورزشکاران و افرادی که برنامه تمرینات منظم تقویتی اندام تحتانی از جمله اکسنتریک و یا ایزوکینتیک را در اندام تحتانی حداقل ۶ ماه قبل از انجام مطالعه انجام می‌دادند، وارد مطالعه نشدند.[۲۹] سایر معیارهای خروج شامل مصرف مکمل‌های رژیمی[۱۶ و ۲۹] و داروهای مورد استفاده در بدنسازی حداقل ۳ ماه قبل از اجرا و در طول زمان اجرای مطالعه[۱۸ و ۲۷] و سابقه وجود ضایعات ارتوپدیک و عصبی در اندام تحتانی خصوصا مفصل زانو بود. شرکت‌کننده‌ها دو مرتبه تمرینات اکسنتریک یکسان را با فاصله دو هفته انجام دادند.[۷] قبل از اجرای آزمون، آزمودنی در یک جلسه با انقباض‌های ایزومتریک و کانسنتریک در اندام تحتانی آشنا شد.[۲۶] همچنین قبل از شروع اجرای آزمون‌ها در طی تمام جلسات ارزیابی، افراد گرم کردن را به صورت ۵ دقیقه دوچرخه زدن و حرکات کششی ملایم در عضلات اندام تحتانی انجام دادند.[۳۰-۳۳] مقایسه تظاهرات صدمه عضلانی (اندازه‌گیری حداکثر گشتاورهای عضلانی و زاویه بهینه آنها، شدت آزردگی عضلانی تاخیری، دامنه حرکتی مفصل زانو و محیط ران) قبل از اجرای مرتبه اول و دوم تمرین و در فواصل زمانی بلافاصله، ۴۸ ساعت و ۵ روز بعد از اجرای تمرینات صورت گرفت.[۳۴ و ۳۵] از افراد شرکت‌کننده در مطالعه درخواست شد که از اجرای هر گونه تمرین تقویتی و یا فعالیت فیزیکی شدید از ۴۸ ساعت قبل و در طول زمان اجرای آزمون خودداری کند[۳۶ و ۳۷] و فعالیت خود را در سطح معمول حفظ نمایند، داروهای ضدالتهابی و مکمل‌های رژیمی مصرف نکرده و نیز درمانی اعم از ماساژ و تمرینات کششی را در طول اجرای مطالعه دریافت نکنند.[۳۷]

برنامه تمرینات اکسنتریک، از طریق دستگاه ایزوکینتیک بیودکس سیستم ۴ در هر دو مرتبه به صورت یکسان در اندام غالب اجرا شد. آزمودنی در وضعیت طاقباز با زاویه ۲۵ درجه تنه از وضعیت افقی روی دستگاه قرار گرفت. لگن، ران و تنه شرکت‌کننده از طریق استرپ ثابت شد. محور دینامومتر در موازات مرکز مفصل زانو تنظیم گردید. پد مقاومتی دستگاه در بالای قوزک‌ها قرار گرفته و دامنه حرکتی اکستنشن زانو ۱۰-۹۰ درجه تنظیم گردید. تمرینات ۲۰ مرتبه در قالب ۶ ست با فاصله زمانی ۳ دقیقه بین هر ست [۱۶، ۲۹ و ۳۵] تکرار گردید. فرد می‌بایست تمامی ۶ ست را به صورت کامل و بدون بروز هر گونه درد یا ناراحتی به انجام می‌رسانید، در غیر این صورت از مطالعه حذف می‌شد(۱ نفر در مطالعه حاضر به دلیل وجود درد در حین اجرای تمرین اکسنتریک و ۱ نفر دیگر به علت عدم اجرای درست تمرین از مطالعه خارج شدند و تعداد افراد از ۱۵ به ۱۳ تقلیل یافت). فیدبک بینایی از طریق مانیتور دستگاه فراهم شد و فرد جهت اجرای انقباض با شدت حداکثر تشویق گردید.

گشتاور ایزومتریک از طریق دستگاه ایزوکینتیک بیودکس سیستم ۴ در زوایای ۳۰، ۶۰، ۹۰ و ۱۲۰ درجه از فلکشن زانو اندازه‌گیری شد. تنظیمات دستگاه و وضعیت‌دهی فرد به صورت فوق انجام شد، با این تفاوت که وضعیت تنه فرد ۹۰ درجه فلکشن بود. ثبت گشتاور در ۴ زاویه در هر بار آزمون به صورت تصادفی صورت گرفت تا از اثر خستگی بر یک زاویه خاص اجتناب گردد. فرد شرکت‌کننده ۳ تکرار انقباضی حداکثر در زمان ۵-۳ ثانیه را با فاصله زمانی ۳۰ ثانیه بین تکرارها انجام داد و از فیدبک بینایی و تشویق کلامی جهت افزایش سطح نیروی انقباضی بهره‌مند شد. ثبت گشتاور کانسنتریک ایزوکینتیک در سرعت ۶۰ و ۱۸۰ درجه بر ثانیه و با به ترتیب ۵ و ۳ تکرار و دو دقیقه استراحت بین تکرارها با تنظیمات قبلی از طریق دستگاه بیودکس صورت گرفت. مقادیر مورد نظر گشتاورها از روی خروجی فیلتر شده نرم‌افزار دستگاه با واحد نیوتن‌متر استخراج شد، میانگین ۳ تکرار حداکثری برای گشتاورهای ایزومتریک و کانسنتریک با سرعت ۶۰ درجه بر ثانیه و میانگین ۵ تکرار حداکثری برای گشتاور کانسنتریک با سرعت ۱۸۰ درجه بر ثانیه استخراج شد. مقادیر زاویه بهینه برای تولید حداکثر گشتاور نیز به این صورت استخراج گردید.[۳۵] مقادیر گشتاورها به وزن بدن نرمالیزه شدند تا تفاوت‌های بین فردی در مقادیر قبل از اجرا حذف گردد.[۲۹ و ۳۵]

شدت آزردگی عضلانی تاخیری حین فلکشن زانو از طریق مقیاس ۱۰۰ میلی‌متری شاخص دیداری درد مورد سنجش قرار گرفت که در آن ۰ معرف عدم وجود آزردگی و ۱۰۰ معرف شدیدترین آزردگی غیرقابل‌تحمل بود. شرکت‌کننده‌ها آزردگی را حین فلکشن فعال زانو در دامنه حرکتی موجود در وضعیت طاقباز روی شاخص علامت می‌زدند.

برای اندازه‌گیری دامنه حرکتی غیرفعال فلکشن زانو از طریق گونیامتر مکانیکی دستی، آزمودنی به صورت دمر با حفظ وضعیت مفصل ران در وضعیت خنثی دراز کشید. کف پا در لبه میز معاینه قرار گرفت. حوله‌ای زیر ران فرد قرار گرفت. آزمونگر فمور را با یک دست ثابت نگه داشت تا حرکتی در مفصل ران اتفاق نیفتد. نقطه اتکای گونیامتر روی کوندیل خارجی فمور قرار گرفته بازوی پروگزیمال در راستای خط وسط خارجی فمور با توجه به تروکانتر بزرگ قرار گرفت. بازوی دیستال در راستای خط وسط خارجی فیبولا با توجه به قوزک خارجی و سر فیبولا قرار داده شد. حرکات غیرفعال فلکشن توسط آزمونگر به صورت سه تکرار اندازه‌گیری شد و میانگین سه تکرار برای تجزیه و تحلیل داده‌ها مورد استفاده قرار گرفت.[۳۵]

محیط ران با استفاده از یک متر نواری حول دیستال و پروگزیمال ران در وضعیت ایستاده اندازه‌گیری شد. برای اندازه‌گیری پروگزیمال، میانه فاصله بین تروکانتر بزرگ و اپی‌کوندیل خارجی فمور و برای اندازه‌گیری دیستال از ۱۰ ٪ فاصله بین لبه فوقانی پاتلا و خار قدامی-فوقانی ایلیاک در سه تکرار اندازه‌گیری انجام شد و میانگین آنها برای تحلیل داده‌ها مورد استفاده قرار گرفت. ماژیک با جوهر دائمی برای علامت‌گذاری محل اندازه‌گیری استفاده شد.[۸-۱۰ و ۳۵]

تکرارپذیری بین دو آزمونگر و یک آزمونگر با فاصله زمانی دو هفته در مطالعه پایلوت محاسبه شد و میزان ICC از ۰/۸۸۶ تا ۰/۹۵۴ برای گشتاورهای ایزومتریک، از ۰/۸۳۲ تا ۰/۹۴۶ برای گشتاورهای کانسنتریک، از ۰/۸۸۷ تا ۰/۹۰۶ برای زاویه بهینه، برای آزردگی عضلانی تاخیری، دامنه حرکتی و محیط ران از ۰/۸۶۹ تا ۰/۹۹۴ متغیر بود.

از نرم‌افزار SPSS نسخه ۱۸ برای تجزیه و تحلیل داده‌ها استفاده شد. از آزمون کلموگراف-اسمیرنوف جهت بررسی نرمال بودن توزیع داده‌ها استفاده شد. برای بررسی اثر مرتبه تکرار تمرین اکسنتریک بر متغیرها در طول زمان از آزمون Repeated Measure ANOVA استفاده شد. مقایسه زوج متغیرها در آنالیز Post-Hoc از طریق Adjustment Bonferroni انجام شد. سطح معناداری داده‌ها، ۰/۰۵ در نظر گرفته شد.

یافته‌ها

تمامی متغیرها از توزیع نرمال برخوردار بودند. در مرتبه اول تمرین اکسنتریک، اثر اصلی زمان در رابطه با تمامی متغیرها غیر از محیط ران معنادار شد(جدول۱).

جدول ۱: اثر مرتبه اول تمرین اکسنتریک (n=۱۳)

نام متغیر	مقدار P	مقدار F
گشتاور ایزومتریک (نیوتن‌متر)	۰/۰۰۰	۱۶/۶۵۶=(۲۴ و ۳)
گشتاور کانسنتریک در سرعت ٦٠ درجه بر ثانیه (نیوتن‌متر)	۰/۰۰۰	۲۴/۶۴۵=(۲۵ و ۳)
گشتاور کانسنتریک در سرعت ۱۸۰ درجه بر ثانیه (نیوتن‌متر)	۰/۰۰۲	۶/۳۶۹=(۲۵ و ۳)
زاویه بهینه کانسنتریک در سرعت ٦٠ درجه بر ثانیه (درجه)	۰/۰۰۲	۲/۹۷۸=(۲۵ و ۳)
زاویه بهینه کانسنتریک در سرعت ۱۸۰ درجه بر ثانیه (درجه)	۰/۰۰۰	۱۴/۹۳۰=(۲۵ و ۳)

آنالیز Post-Hoc نشان داد گشتاورهای ایزومتریک و کانسنتریک در سرعت ۶۰ درجه بر ثانیه در تمامی زوایا در زمان بلافاصله نسبت به پیش‌آزمون کاهش معنادار داشت (P=۰/۰۰۰) و در زمان ۴۸ ساعت به حد پیش‌آزمون رسید (P>۰/۰۵). گشتاورهای کانسنتریک در زمان ۱۲۰ ساعت از زمان بلافاصله شدند (P< ۰/۰۵). گشتاور کانسنتریک در سرعت ۶۰ درجه بر ثانیه در زمان ۱۲۰ ساعت از زمان ۴۸ ساعت نیز بیشتر شد(P=۰/۰۰۱). زاویه‌های بهینه کانسنتریک در زمان بلافاصله و ۱۲۰ ساعت نسبت به پیش‌آزمون افزایش معنادار داشتند(P<۰/۰۱). زاویه بهینه گشتاور کانسنتریک در سرعت ۱۸۰ درجه بر ثانیه در زمان ۴۸ ساعت نسبت به پیش‌آزمون افزایش معنادار داشت (P<۰/۰۰۴) و در زمان بلافاصله از زمان ۱۲۰ ساعت نیز بیشتر بود (P=۰/۰۰۵). شدت آزردگی عضلانی تاخیری در زمان بلافاصله، ۴۸ و ۱۲۰ ساعت نسبت به پیش‌آزمون افزایش معنادار داشت (P<۰/۰۵) و در زمان ۱۲۰ ساعت نسبت به زمان بلافاصله و ۴۸ ساعت کاهش معنادار یافت (P<۰/۰۵). دامنه حرکتی غیرفعال فلکشن در زمان‌های بلافاصله و ۴۸ و ۱۲۰ ساعت نسبت به پیش‌آزمون کاهش معنادار داشت (P<۰/۰۵).

اثر تکرار تمرین برای متغیرهای حداکثر گشتاورهای کانسنتریک در سرعت ۶۰ و ۱۸۰ درجه بر ثانیه و زاویه بهینه کانسنتریک در سرعت ۶۰ درجه بر ثانیه معنادار شد. این مقادیر در مرتبه دوم تمرین اکسنتریک بیشتر از مرتبه اول بود (P<۰/۰۵) (جدول ۲).

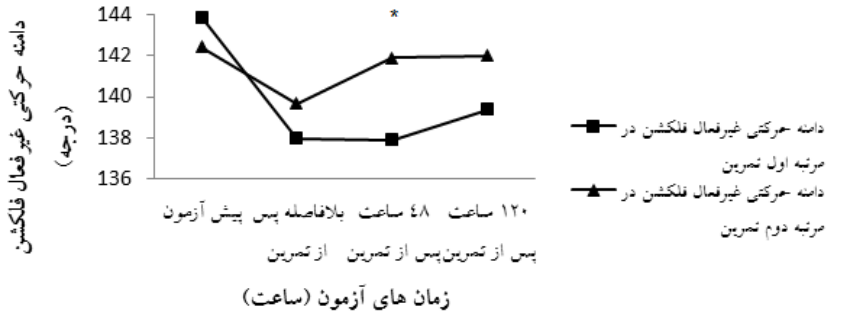
جدول ۲: اثر مرتبه دوم تمرین در متغیرهای حداکثر گشتاور کانسنتریک و زاویه آنها (n=۱۳)

نام متغیر	مقدار P	مقدار F
حداکثر گشتاور کانسنتریک در سرعت ٦٠ درجه بر ثانیه (نیوتن‌متر)	۰/۰۲۶	۶/۴۳۶=(۱۲ و ۱)
حداکثر گشتاور کانسنتریک در سرعت ۱۸۰ درجه بر ثانیه (نیوتن‌متر)	۰/۰۰۱	۲۱/۷۵۴=(۱۲ و ۱)
زاویه بهینه کانسنتریک در سرعت ٦٠ درجه بر ثانیه (درجه)	۰/۰۴۴	۵/۰۸۲=(۱۲ و ۱)

شدت آزردگی عضلانی تاخیری حین فلکشن زانو در مرتبه دوم تمرین اکسنتریک کمتر از مرتبه اول بود. تعامل زمان و مرتبه تمرین در مورد آزردگی عضلانی تاخیری معنادار شد (P=۰/۰۱۵، F(۱ و ۱۲)=۷/۹۶۰). در زمان ۴۸ ساعت، شدت آزردگی عضلانی تاخیری در مرتبه دوم به صورت معناداری کمتر از مرتبه اول بود(P< ۰/۰۵) (نمودار۱).

نمودار ۱- بررسی تغییرات در آزردگی عضلانی تاخیری پس از تکرار تمرین اکسنتریک در زمان‌های مورد بررسی؛ * نشان‌دهنده کاهش معنادار آزردگی عضلانی در مرتبه دوم تمرین اکسنتریک نسبت به مرتبه اول تمرین(P<۰/۰۵) (n=۱۳)

تعامل زمان و مرتبه تمرین در دامنه غیرفعال فلکشن زانو معنادار شد (P=۰/۰۴۳، F(۳ و ۹)=۴/۱۲۴). آنالیز Post-Hoc برای دامنه حرکتی غیرفعال فلکشن نشان داد در مرتبه اول تمرین دامنه در زمان ۴۸ ساعت به صورت معناداری کمتر از پیش‌آزمون بود (P=۰/۰۳۱) ولی در مرتبه دوم تمرین این تفاوت از بین رفت (P>۰/۰۵) (نمودار۲).



نمودار ۲- بررسی تغییرات در میانگین دامنه حرکتی غیرفعال فلکشن (درجه) پس از تکرار تمرین اکسنتریک در زمان‌های مورد بررسی؛ * نشان‌دهنده افزایش معنادار دامنه حرکتی در زمان ۴۸ ساعت نسبت به پیش‌آزمون (P<۰/۰۵) (n=۱۳)

بحث

در مرتبه اول تمرین اکسنتریک افت گشتاور، افزایش زاویه بهینه کانسنتریک، ایجاد آزردگی عضلانی تاخیری و کاهش دامنه حرکتی فلکشن مشاهده شد که نشان‌دهنده غیرمستقیم بروز صدمه عضلانی متعاقب تمرینات اکسنتریک است.[۳ و ۵] افت بلافاصله قدرت متعاقب تمرینات اکسنتریک، از معتبرترین شاخص‌های بروز صدمه عضلانی است[۳] و احتمالا با کشیدگی سارکومرها[۵ و ۶]، تغییر در نفوذپذیری یون‌ها در اثر اختلال در عملکرد تی‌توبول‌ها و در نهایت اختلال در عملکرد مزدوج شدن تحریک انقباض عضله مرتبط است.[۳۸ و ۳۹] آزردگی عضلانی در اثر تحریک شیمیایی و مکانیکی گیرنده‌های مختلف[۳ و ۵ و ۴۰ و ۴۱] طی روند التهابی متعاقب اجرای تمرینات اکسنتریک بروز می‌کند.[۴۲] علل احتمالی کاهش دامنه حرکتی می‌تواند با حضور یون کلسیم در سلول به دلیل آسیب غشای سارکوپلاسمی[۴ و ۵]، افزایش تنشن غیرفعال[۶] و یا کوتاه شدن بافت همبند [۵، ۴ و ۱۷] مرتبط باشد.

بعد از تمرین اکسنتریک، افزایش در زاویه بهینه کانسنتریک مشهود بود. افزایش زاویه بهینه گشتاور در مطالعات انسانی به صورت غیرمستقیم[۲۸] جابه‌جایی در منحنی طول–تنشن عضله را به سمت راست متعاقب تمرینات اکسنتریک شدید نشان می‌دهد. نتایج حاضر با یافته‌های مطالعات Chen و همکاران بر روی فلکسورهای آرنج (۲۰۰۷ و ۲۰۰۹) در تناقض است.[۲۳ و ۲۴] علت وجود تفاوت بین نتایج مطالعه آنها با مطالعه حاضر می‌تواند متاثر از تفاوت در پاسخ عضلات به تمرینات اکسنتریک باشد.[۲۶] این محققین در مطالعه‌ی دیگری با مقایسه تغییر در زاویه بهینه متعاقب تمرینات اکسنتریک در عضلات فلکسور و اکستانسور آرنج و زانو، عدم تغییر در زاویه بهینه ایزومتریک اکستانسورهای زانو را در کنار افزایش زاویه بهینه در بقیه گروه‌های عضلانی در پاسخ به شدت یکسانی از تمرینات گزارش کردند[۲۶] که با نتایج مطالعه حاضر هم‌خوانی دارد. در مطالعه حاضر، زاویه بهینه کانسنتریک در سرعت ۶۰ درجه بر ثانیه در زمان‌های بلافاصله و ۵ روز پس از تمرین و در سرعت ۱۸۰ درجه بر ثانیه در تمامی زمان‌ها نسبت به پیش‌آزمون افزایش معناداری داشت. نتایج مطالعه حاضر با نتایج مطالعات انجام شده بر روی اکستانسورهای زانو مطابقت دارد.[۲۷، ۲۸ و ۴۳] Yeung و همکاران (۲۰۰۸) افزایش در طول بهینه عضله کوادریسپس را متعاقب اجرای تمرین اکسنتریک با شدت زیر حداکثر به صورت پایین رفتن از پله با وجود عدم تغییر در میزان گشتاور کانسنتریک عضله در سرعت ۶۰ درجه بر ثانیه گزارش کردند. بررسی آنها تا ۴۸ ساعت پس از اجرای تمرینات اکسنتریک ادامه داشت.[۲۸] تغییرات زاویه بهینه را با ایجاد کشیدگی بیش از حد در سارکومرهای ضعیف و طویل در عضله و در نتیجه افزایش کمپلیانس سری عضله مرتبط می‌دانند که به عنوان یکی از علل احتمالی افت قدرت عضله بعد از اجرای تمرینات اکسنتریک شدید مطرح می‌شود.[۵ و ۶] در سرعت ۱۸۰ درجه بر ثانیه، تغییر زاویه بهینه در زمان ۴۸ ساعت نیز مشهود بود. عده‌ای معتقد هستند آسیب انتخابی به فیبرهای تند انقباض متعاقب اجرای تمرینات اکسنتریک وارد می‌شود[۳۸ و ۴۴] و به‌دلیل نقش این فیبرها در انقباض‌های سرعتی[۴۵]، احتمالا بهبودی در سرعت ۱۸۰ درجه بر ثانیه دیرتر رخ می‌دهد. جابه‌جایی پایدار در منحنی طول–تنشن عضله به سمت راست به‌دلیل اضافه شدن سری سارکومرها متعاقب تمرینات اکسنتریک در مطالعات حیوانی مورد تایید قرار گرفته است.[۴۶ و ۴۷] در مطالعه Brockett و همکاران (۲۰۰۱) جابه‌جایی پایدار طول بهینه به سمت راست متعاقب اجرای تمرینات اکسنتریک در عضله همسترینگ گزارش گردید[۲۵] در حالی‌که در مطالعه Phillipou و همکاران (۲۰۰۹) صرفا جابه‌جایی اولیه طول بهینه حین انقباض‌های ایزومتریک و کانسنتریک در عضله کوادریسپس مشاهده شد که بعد از ۸ روز به حد زمینه بازگشت. در مطالعه آنها بازه زمانی مورد بررسی ۱۶ روز بود. آنها نبود تغییرات سازگاری را به تفاوت عضلات مختلف از نظر طول استراحت و طول عملکردی در منحنی طول–تنشن عضله نسبت دادند.[۲۷] در مطالعه حاضر، تغییر زاویه بهینه در هر دو سرعت انقباضی کانسنتریک پس از مرتبه اول تمرین اکسنتریک تا روز ۱۴ام مشهود بود(حدود ۱۰ درجه).

با تکرار تمرینات، تظاهرات صدمه عضلانی در مرتبه بعدی تمرین کاهش می‌یابد که تحت عنوان اثر تکرار تمرین مطرح شده است. مکانیسم این اثر به صورت کامل شناخته نشده، ولی فرضیاتی در این رابطه ارائه گردیده است. سازگاری می‌تواند در سطوح سلولی، مکانیکی و عصبی رخ دهد.[۳، ۹ و ۱۰] در سطح سلولی، ایجاد سازگاری می‌تواند به صورت اضافه شدن سری سارکومرها و جابه‌جایی منحنی طول–تنشن عضله به سمت راست[۵]، به تعویق افتادن پاسخ‌های التهابی، افزایش عملکرد عوامل مکانیکی رشد[۳]، فعال شدن سلول‌های قمری[۹] و سازگاری در عملکرد مزدوج شدن تحریک انقباض[۹] ایجاد شود. کاهش در شدت آزردگی عضلانی تاخیری در مرتبه دوم تمرین در زمان ۴۸ ساعت، کاهش افت گشتاور کانسنتریک و افزایش دامنه حرکتی فلکشن اثر تکرار تمرین را تایید می‌کند[۱۶، ۲۳، ۲۴، ۲۹ و ۴۳] افزایش زاویه بهینه کانسنتریک در مرتبه دوم تمرین اکسنتریک فقط در سرعت ۶۰ درجه بر ثانیه معنادار بود. نتایج حاضر با مطالعه Brockett و همکاران (۲۰۰۴) در عضله همسترینگ هم‌خوانی داشته[۴۸] و با نتایج مقالات دیگر در فلکسورهای آنج و اکستانسورهای زانو همسو نیست. در این مقالات، عدم وابستگی اثر تکرار تمرین اکسنتریک به تغییر در طول بهینه مورد تاکید قرار گرفته است، زیرا آنها بین دو مرتبه تمرین اکسنتریک تفاوتی در طول بهینه مشاهده نکردند.[۲۳، ۲۴، ۴۳و ۴۹] در مطالعه حاضر افزایش در زاویه بهینه کانسنتریک در

سرعت ۶۰ درجه بر ثانیه مشاهده گردید که می‌تواند با فرض سازگاری سلولی به صورت سارکومرسازی سری متعاقب اجرای تمرینات اکسنتریک[۶، ۴۶ و ۴۷] آن را توجیه نمود. علت تفاوت در نتایج به‌دست‌آمده در عضله کوادریسپس با مقالات مشابه[۴۳ و ۴۹] می‌تواند متاثر از وضعیت اجرای تمرین باشد.[۳۵] متعاقب بی‌حرکت‌سازی عضله در طول بلند، سارکومرسازی سری در عضله رخ می‌دهد.[۵۰] شاید اجرای تمرین اکسنتریک در وضعیت خوابیده نسبت به نشسته [۴۳ و ۴۹] با قراردادن عضله کوادریسپس در یک وضعیت طویل، محرکی جهت سارکومرسازی سری باشد و شاید بتواند از عضله در برابر آسیب‌های احتمالی محافظت کند.[۴۸] در این مطالعه، افزایش زاویه بهینه در حدود ۱۰ درجه هم‌چنان بعد از ۲۱ روز مشهود بود. البته جهت تایید این مکانیسم به نمونه‌برداری از عضله نیاز است که در این مطالعه انجام نشد. در مطالعه حاضر، عدم مشاهده تغییرات در طول بهینه در مورد گشتاورهای ایزومتریک می‌تواند به این دلیل باشد که تنها چهار زاویه بررسی گردید و این زاویای محدود نمی‌تواند معرف رفتار کلی عضله باشد. اثر تکرار تمرین در مورد زاویه بهینه کانسنتریک با سرعت ۱۸۰ درجه بر ثانیه دیده نشد که شاید با بهبودی ناکامل فیبرهای تند انقباض در بازه زمانی مورد مطالعه مرتبط باشد، هرچند مطالعه مستقیمی در این زمینه یافت نشد. البته باید در نظر گرفت که جهت شکل‌گیری روند سازگاری باید تکرارهای بیشتری از تمرین اکسنتریک وجود داشته باشد.[۵۱] پیشنهاد می‌شود اثر تکرار تمرینات اکسنتریک در اکستانسورهای زانو با تکرارهای بیشتر و در شدت‌های مختلف انقباضی جهت بررسی دقیق‌تر روند تطابقی در مطالعات آتی مورد بررسی قرار گیرد. نتایج این مطالعات می‌تواند در طراحی برنامه‌های ورزشی مناسب به خصوص در ورزشکاران مورد استفاده قرارگیرد.

نتیجه گیری

در نتیجه، اجرای تمرینات اکسنتریک با شدت حداکثر در اکستانسورهای زانو سبب ایجاد صدمه عضلانی شد که میزان آن در مرتبه دوم تمرین کمتر از مرتبه اول بود. افزایش زاویه بهینه در مرتبه دوم تمرین نقش احتمالی مکانیسم‌های سلولی را در بروز روند سازگاری به تمرین نشان می‌دهد. بررسی این سازگاری با تکرارهای بیشتر تمرینات اکسنتریک برای طراحی برنامه‌های ورزشی در ورزشکاران و جلوگیری از وقوع استرین‌های عضلانی در عضله کوادریسپس توصیه می‌شود.

تشکر و قدردانی

مطالعه حاضر بخشی از طرح تحقیقاتی بوده و بدین‌وسیله از تمامی مسئولین مرکز تحقیقاتی طب فیزیکی و توانبخشی در بیمارستان امام رضای تبریز تقدیر به عمل می‌آید. محققین از مشارکت دانشجویان دانشکده توانبخشی تبریز در مراحل تمرینی نیز نهایت قدردانی را دارند.

منابع

1. Hedayatpour N, Falla D. Non-uniform muscle adaptations to eccentric exercise and the implications for training and sport. J Electromyogr Kinesiol 2011; 22(3): 329-333.
2. Page PH. Pathophysiology of acute exercise-induced muscular injury: cilinical implications. J Athlet Train 1995; 30(1): 29-34.
3. Clarkson PM, Hubal MJ. Exercise-Induced Muscle Damage in Humans. Am J Physic Med Rehabilitation 2002; 81(11): S52-S69.
4. Clarkson PM, Tremblay I. Exercise-induced muscle damage, repair, and adaptation in humans. J Appl Physiol 1988; 65(1):1-6.
5. Proske U, Morgan DL. Muscle damage from eccentric exercise: mechanism, mechanical signs, adaptation and clinical applications. J Physiol 2001; 537.2: 333-345.
6. Morgan D, Allen D. Early events in stretch-induced muscle damage. J Appl Physiol 1999: 87(6): 2007-2015.
7. Hortobágyi T, Houmard J, Fraser D, Dudek R, Lambert J, Tracy J. Normal forces and myofibrillar disruption after repeated eccentric exercise. J Appl Physiol 1998; 84(2): 492-498.
8. Crameri R, Aagaard P, Qvortrup K, Langberg H, Olesen J, Kjaer M. Myofibre damage in human skeletal muscle: effects of electrical stimulation versus voluntary contraction. J Physiol 2007: 583(1): 365-380.
9. McHugh MP. Recent advances in the understanding of the repeated bout effect: the protective effect against muscle damage from a single bout of eccentric exercise. Scand J Med Sci Sports 2003. 13(2): 88-97.
10. Nosaka K, Aoki MS. Repeated bout effect: research update and future perspective. Brazil J Biomotricity, 2011; (1): 5-15.
11. Black CD, McCully KK. Muscle injury after repeated bouts of voluntary and electrically stimulated exercise. Med Sci Sports Exerc 2008; 40(9): 1605-1615.
12. Nosaka K, Sakamoto K, Newton M, Sacco P. Influence of pre-exercise muscle temperature on responses to eccentric exercise. J Athlet Train, 2004. 39(2): p. 132-137.
13. Hedayatpour N, Falla D, Arendt-Nielsen L, Farina D. Effect of delayed onset muscle soreness on muscle recovery after a fatiguing isometric contraction. Scand Med Sci Sports 2010; 20(1): 145-153.

14. Hedayatpour N, Falla D, Arendt-Nielsen L, Farina D. Sensory and electromyographic mapping during delayed-onset muscle soreness. Med Sci Sports Exerc 2008a; 40(2): 326-334.
15. Hedayatpour N, Hasanlouei H, Arendt-Nielsen L, Kersting UG, Falla D. Delayed-onset muscle soreness alters the response to postural perturbations. Med Sci Sports Exerc 2011; 43(6): 1010-1016.
16. Howatson G, Van Someren K. Evidence of a contralateral repeated bout effect after maximal eccentric contractions. Eur J Appl Physiol 2007; 101(2): 207-214.
17. Jamurtas AZ, Theocharis V, Tofas T, Tsiokanos A, Yfanti C, Paschalis V, et al . Comparison between leg and arm eccentric exercises of the same relative intensity on indices of muscle damage. Eur J Appl Physiol 2005. 95(2): 179-185.
18. Howatson G. The impact of damaging exercise on electromechanical delay in biceps brachii. J Electromyogr Kinesiol 2010; 20: 477-481.
19. Barroso RBR, Roschel H, Ugrinowitsch C, Rubens A, Nosaka K, Valmor T. Effect of eccentric contraction velocity on muscle damage in repeated bouts of elbow flexor exercise. Appl Physiol Nutrition Metabolism 2010; 35(4): 534-540.
20. Chapman DW, Newton M, McGuigan M, Nosaka K. Effect of lengthening contraction velocity on muscle damage of the elbow flexors. Med Sci Sports Exerc 2008; 40(5): 926-933.
21. Prasartwuth O, Taylor J, Gandevia S. Maximal force, voluntary activation and muscle soreness after eccentric damage to human elbow flexor muscles. J Physiol 2005; 567(1): 337-348.
22. Morgan D. New insights into the behavior of muscle during active lengthening. Biophysic J 1990; 57(2): 209-221.
23. Chen TC, Nosaka K, Sacco P. Intensity of eccentric exercise, shift of optimum angle, and the magnitude of repeated-bout effect. J Appl Physiol 2007; 102(3): 992-999.
24. Chen TC, Chen HL, Lin MJ, Wu CJ, Nosaka K. Muscle damage responses of the elbow flexors to four maximal eccentric exercise bouts performed every 4 weeks. Eur J Appl Physiol 2009; 106(2): 267-275.
25. Brockett CL, Morgan DL, Proske U. Human hamstring muscles adapt to eccentric exercise by changing optimum length. Med Sci Sports Exerc 2001; 33(5): 783-790.
26. Chen TC, Lin KY, Chen HL, Lin MJ, Nosaka K. Comparison in eccentric exercise-induced muscle damage among four limb muscles. Eur J Appl Physiol 2011; 111(2): 211-223.
27. Philippou A, Maridaki M, Bogdanis G, Hlapas A, Koutsilieris M. Changes in the mechanical properties of human quadriceps muscle after eccentric exercise. In Vivo 2009; 23(5): 859-865.
28. Yeung S, Yeung E. Shift of peak torque angle after eccentric exercise. Int J Sports Med 2008; 29: 251-256.
29. Starbuck C, Eston RG. Exercise-induced muscle damage and repeated bout effect: evidence for cross transfer. Eur J Appl Physiol 2011; 112(3)- 1005-1013.
30. Paschalis V, Koutedakis Y, Baltzopoulos V, et al. Short vs. long length of rectus femoris during eccentric exercise in relation to muscle damage in healthy males. Clin Biomechanics 2005; 20: 617-622.
31. Evans RK, Knight KL, Draper DO, Pracell AC. Effects of warm-up before eccentric exercise on indirect markers of muscle damage. Med Sci Sports Exerc 2002; 34(12): 1892-1899.
32. Herbert RD, Gabriel M. Effects of stretching before and after exercising on muscle soreness and risk of injury: systematic review. Bmj 2002; 325(7362): 468.
33. Ingham SA, van Someren KA, Howatson G. Effect of a concentric warm-up exercise on eccentrically induced soreness and loss of function of the elbow flexor muscles. J Sports Sci 2010; 28(13): 1377-1382.
34. Wyse J, Mercer T. Gleeson N. Time-of-day dependence of isokinetic leg strength and associated interday variability. Br J Sports Med 1994; 28(3): 167-170.
35. Rezaei M, Ebrahimi-Takamjani E, Jamshidi AA, VassaghiGharamaleki B, Hedayatpour H, Hvaei N. Effect of eccentric exercise-induced muscle damage on electromyographyic activity of quadriceps in untrained healthy females. Med J Islam Repub Iran 2014; 28: 154.
36. Child RB, Saxton JM, Donnelly AE. Comparison of eccentric knee extensor muscle actions at two muscle lengths on indices of damage and angle specific force production in humans. J Sports Sci 1998; 16(4): 301-308.
37. Chapman DW, Newton MJ, McGuigan M, Nosaka K. Effect of slow-velocity lengthening contractions on muscle damage induced by fast-velocity lengthening contractions. J Strength Conditioning Res 2011; 25(1): 211-219.
38. Takekura H, Fujinami N, Nishizawa T, Ogasawara H, Kasuga N. Eccentric exercise-induced morphological changes in the membrane systems involved in excitation–contraction coupling in rat skeletal muscle. J Physiol 2001; 533(2): 571-583.

39. Corona BT, Balog EM, Doyle JA, Rupp JC, Luke RC, Ingalls CP. Junctophilin damage contributes to early strength deficits and EC coupling failure after eccentric contractions. Am J Physiol-Cell Physiol 2009; 298(2): C365-C376.
40. Proske U, Allen TJ. Damage to skeletal muscle from eccentric exercise. Exerc Sport Sci Reviews 2005; 33(2): 98-104.
41. Stauber WT. Delayed-onset muscle soreness. In: Z.Z. Magee DJ, Manske RC, Quillen WS, editors: The Athletic and sport issues in musculoskeletal rehabilitation. 1st edition. USA: Elsevier Saunders; 2010, 423-439.
42. Marqueste T, Dercherchi P, Messan F, Kipson, N, Grolet L, Games Y. Eccentric exercise alters muscle sensory motor control through the release of inflammatory mediators. Brain Res 2004; 1023(2): 222-230.
43. Kamandulis S, Skurvydas A, Brazaitis M, Skikas L, Duchteau J. The repeated bout effect of eccentric exercise is not associated with changes in voluntary activation. Eur J Appl Physiol 2010; 108: 1065-1074.
44. Fridén J. Changes in human skeletal muscle induced by long-term eccentric exercise. Cell Tissue Res 1984; 236(2): 365-372.
45. Thorstensson A, Grimby G. Karlsson J. Force-velocity relations and fiber composition in human knee extensor muscles. J Appl Physiol 1976; 40(1): 12-16.
46. Butterfield TA, Leonard TR, Herzog W. Differential serial sarcomere number adaptations in knee extensor muscles of rats is contraction type dependent. J Appl Physiol, 2005; 99(4): 1352-1358.
47. Lynn R, Morgan D. Decline running produces more sarcomeres in rat vastus intermedius muscle fibers than does incline running. J Appl Physiol; 1994; 77(3): 1439-1444.
48. Brockett CL, Morgan DL, Proske U. Predicting hamstring strain injury in elite athletes. Med Sci Sports Exerc 2004; 36(3): 379-385.
49. Skurvydas A, Brazaitis M. Kamandulis S. Repeated Bout Effect is not Correlated With Intraindividual Variability During Muscle-Damaging Exercise. J Strength Conditioning Res 2011; 25(4): 1004-1009.
50. Lieber R. Skeletal muscle structure function and plasticity: The physiological basis of rehabilitation. 3th edition. China: Lippincott Williams and Wilkins; 2010, 229-270.
51. Lehti TM, Kalliokoski R, Komulainen J. Repeated bout effect on the cytoskeletal proteins titin, desmin, and dystrophin in rat skeletal muscle. J Muscle Res Cell Motility 2007; 28(1): 39-47.