علوم زیستی ورزشی ـ پاییز ۱۳۹۵
دورهٔ۸، شمارهٔ ۳، ص : ۳۵۳ – ۳۶۴
تاریخ دریافت : ۱۳ / ۰۵ / ۹۲
تاریخ پذیرش : ۲۵ / ۱۲ / ۹۳

تأثیر تمرینات استقامتی و مقاومتی بر میزان فعالیت استیل‌کولین‌استراز G_4 در عضلات تند و کندانقباض موش‌های صحرایی

رضا قراخانلو*[۱] – علی گرزی[۲] - زینب نبی اللهی[۳]

۱.دانشیار گروه تربیت بدنی و علوم ورزشی دانشگاه تربیت مدرس، تهران، ایران ۲. استادیار گروه تربیت بدنی و علوم ورزشی دانشگاه زنجان، زنجان، ایران ۳. کارشناس‌ارشد فیزیولوژی ورزشی دانشگاه تربیت مدرس، تهران، ایران

چکیده

این پژوهش با هدف تعیین اثر هشت هفته تمرین استقامتی و مقاومتی بر میزان فعالیت استیل‌کولین‌استراز نوع G_4 در عضلات خم‌کنندهٔ دراز انگشت شست (FHL) و نعلی موش‌های صحرایی انجام گرفت. تعداد ۲۴ سر موش صحرایی نر ویستار (سن ۱۰ هفته و وزن ۸/۹۶۱±۱۷۱/۹۴گرم) به‌صورت تصادفی به سه گروه کنترل، تمرین استقامتی و مقاومتی تقسیم شدند. گروه تمرین استقامتی و مقاومتی به مدت هشت هفته و هفته‌ای پنج جلسه تمرینات خود را اجرا کردند. تمرینات مقاومتی شامل بالا رفتن از نردبان‌های مخصوص به ارتفاع ۱متر و ۲۶ پله با حمل یک وزنه بود. نتایج نشان داد که میزان فعالیت استیل‌کولین‌استرازG_4 در عضلات تند گروه‌های تمرین مقاومتی و استقامتی در مقایسه با گروه کنترل به‌صورت معنادار (به‌ترتیب P=۰/۰۴۵ و P=۰/۰۱۵) افزایش یافت، ولی تفاوت معناداری در میانگین میزان فعالیت استیل‌کولین‌استرازG_4 بین گروه‌های تمرین مقاومتی و استقامتی در عضلهٔ تندانقباض مشاهده نشد (P=۰/۸۳۸). در عضلات کندانقباض نیز میزان فعالیت استیل‌کولین‌استرازG_4 گروه تمرین مقاومتی به‌صورتی معناداری بالاتر از گروه‌های کنترل و تمرین استقامتی بود (به‌ترتیب P=۰/۰۰۳ و P=۰/۰۰۵)؛ ولی تفاوت معناداری بین میانگین میزان فعالیت استیل‌کولین‌استرازG_4 گروه‌های کنترل و تمرین استقامتی مشاهده نشد (P=۰/۹۵۸). به‌نظر می‌رسد تمرین مقاومتی پژوهش حاضر تأثیر بارزی در میزان فعالیت استیل‌کولین‌استرازG_4 در هر دو نوع عضله داشته است که احتمالاً حاکی از اهمیت این نوع تمرینات در سازگاری‌های این عضلات باشد. پاسخ تارهای نوع تندانقباض به هر دو نوع تمرین ممکن است به‌دلیل تأثیرپذیری بیشتر این عضلات به محرک‌های تمرینی باشد.

واژه‌های کلیدی

استیل‌کولین‌استراز، تمرینات استقامتی، تمرینات مقاومتی، عضلات FHL و نعلی.

---

* نویسندهٔ مسئول : تلفن : ۰۲۱-۸۲۸۸۴۶۴۶

Email :Ghara_re@modares.ac.ir

مقدمه

پیوندگاه عصبی- عضلانی پستانداران، قابلیت سازگاری بالایی دارد. ساختار این پیوندگاه تحت تأثیر عواملی چون فرایند رشد، ارتفاع بالا، استرس ناشی از شوک الکتریکی، استفادهٔ نامناسب و حالت‌های پاتولوژیک تغییر می‌کند (۲۱). براساس نتایج پژوهش‌ها تمرینات مقاومتی و استقامتی می‌تواند پیوندگاه عصبی- عضلانی را تحت تأثیر قرار دهد (۵، ۴). شواهد حاکی از آن است که فعالیت استقامتی، ریخت-شناسی پیوندگاه عصبی- عضلانی[1] پستانداران را تحت تأثیر قرار می‌دهد (۴). تمرین قدرتی نیز موجب تغییر در الگوی فراخوانی و همزمانی واحدهای حرکتی شده و تمرینات با وزنه سبب کاهش مهار دستگاه عصبی- عضلانی می‌شوند (۵، ۴).

زمانی که ایمپالس عصبی نورون حرکتی به انتهای اکسونی می‌رسد، انتقال ایمپالس‌های عصبی در صفحهٔ محرک انتهایی روی می‌دهد. حرکت یون‌های Ca^{2+} به داخل پایانهٔ عصبی که از طریق کانال‌های وابسته به ولتاژ کلسیمی انجام می‌گیرد، رهایی استیل‌کولین[2] توسط اگزوسیتوز[3] را تسهیل می‌کند (۲۱). گیرنده‌های نیکوتینی استیل کولین (nAChR) پروتئین‌های سراسری غشا و اعضای اصلی سرگروه کانال یونی دریچهٔ لیگاندی هستند که به اتصال استیل‌کولین پاسخ می‌دهد (۱۱). تغییر در قابلیت نفوذپذیری غشای پس‌سیناپسی در نهایت پتانسیل صفحهٔ انتهایی[4] را ایجاد می‌کند که در طول غشا منتشر می‌شود (۲۱). پس از آن استیل‌کولین رهاشده توسط استیل‌کولین‌استراز[5] موجود در NMJ برداشته می‌شود و کار انتقال تحریک در این مرحله به پایان می‌رسد.

استیل‌کولین‌استراز یکی از پروتئین‌های عملکردی کلیدی در پیوندگاه عصبی- عضلانی است که مسئولیت هیدرولیز سریع استیل‌کولین بعد از اتصال آن به گیرنده‌های پس‌سیناپسی را برعهده دارد (۳). دو نوع عمدهٔ استیل‌کولین‌استراز در پیوندگاه عصبی- عضلانی وجود دارد، نوع اول استیل‌کولین‌استراز، $A_{۱۲}$ نام دارد، این نام بدین سبب است که استیل‌کولین به شکل نامتقارن[6] است و از دوازده واحد استیل‌کولین‌استراز کروی شکل تشکیل یافته، و به‌وسیلهٔ دم کلاژنی به غشای پایه متصل شده است. نوع دوم G_4 نام دارد که آزادانه با غشای پایه ارتباط دارد و در تمام طول ناحیهٔ اطراف پیوندگاه موجود است؛

1 . Neuromuscular Junction
2. Acetylcholine
3. Exocytosis
4. End-Plate Potential
5. Acetylcholinesteras
6. Asymmetric

اگرچه استیل‌کولین‌استراز G_4، فرم اصلی در عضله نیست، اما فعالیت آن به‌طور دقیقی کنترل می‌شود. مطالعات ثابت کرده‌اند که سطح استیل‌کولین‌استراز G_4 به‌وسیلهٔ فعالیت پویای عضلهٔ اسکلتی کنترل می‌شود؛ تغییر سطح استیل‌کولین‌استراز G_4 پس از عصب‌برداری نیز نقش عصب حرکتی را در تنظیم این ایزوفرم ثابت می‌کند (۱۵، ۸، ۷).

دو تا سه هفته تحریک مستقیم پس از عصب‌برداری در عضلهٔ نعلی، فعالیت ویژهٔ استیل‌کولین‌استراز را به‌طور چشمگیری افزایش می‌دهد (۱۴) و اثر تحریک روی فرم‌های مولکولی مختلف، قویاً به الگوی تحریک بستگی دارد. افزایش مزمن سطح فعالیت طبیعی، همان‌گونه‌که از طریق یک برنامهٔ ملایم ورزشی ایجاد شده، به‌طور انتخابی ویژگی مخزن G_4 عضلات تندانقباض را تحت تأثیر قرار می‌دهد (۳). استیل‌کولین‌استراز با فعالیت عضلانی به‌صورت انتخابی تغییر می‌کند، بدین معنا که درحالی‌که عضلات کندانقباض زیاد تحت تأثیر تمرین قرار نمی‌گیرند، عضلات تندانقباض با تمرین از طریق تغییر در مخزن G_4 پاسخ می‌دهند.

شواهد بیانگر آن است که استیل‌کولین‌استراز در پایانهٔ آکســونی از جسم سلولی نورون حرکتی به‌وسیلهٔ جریان آکسوپلاسمیک منتقل می‌شود. اگرچه تار عضلانی نیز قادر به سنتز این آنزیم است، با وجود این از آزمایش‌های قطع عصب چنین برمی‌آید که اغلب این سنتز تحت کنترل تغذیه‌ای نورون حرکتی قرار دارد (۲). همان‌طورکه می‌دانیم حالت پویایی عضله نیز فعالیت استیل‌کولین‌استراز G_4 را تحت تأثیر قرار می‌دهد؛ با توجه به توزیع کولین‌استرازها در سلول‌های خونی و مغز، این پژوهش می‌تواند آغازی برای درک تأثیرات شیوه‌های مختلف تمرینی بر بهبود برخی بیماری‌ها (همانند سندروم ضعف عضلانی) نیز باشد. افزایش فعالیت استیل‌کولین‌استرازG_4 بر اثر تمرینات استقامتی در پژوهش‌های پیشین نشان داده شده است (۹).

بنابراین بررسی تأثیر تمرین مقاومتی بر فعالیت استیل‌کولین‌استرازG_4 یافته‌های جدیدی را تولید خواهد کرد که با مقایسهٔ تمرین مقاومتی و استقامتی امکان متمایز ساختن اثر این دو شیوهٔ تمرینی در عضلات تندانقباض و کندانقباض میسر خواهد شد. ازاین‌رو، سهم سازگاری‌های عصبی- عضلانی در مقابل سایر سازگاری‌ها در بهبود عملکرد ورزشی بر اثر انواع متفاوت تمرین در عضلات مختلف روشن‌تر خواهد شد. همچنین این موضوع می‌تواند مفاهیمی را در زمینهٔ استفاده از تمرینات قدرتی برای ورزشکاران استقامتی در پی داشته باشد.

روش پژوهش

با توجه به اینکه این پژوهش روی آزمودنی‌های حیوانی (موش‌های صحرایی) انجام گرفت و امکان کنترل کامل آنها وجود داشت، از نوع تجربی است.

جامعهٔ آماری و نمونهٔ پژوهش، روش و نحوهٔ گزینش نمونه‌ها: تعداد ۲۴ سر موش نر ویستار با سن پنج هفته از مؤسسهٔ سرم‌سازی رازی خریداری شد که پس از چهار هفته نگهداری (برای رسیدن به سن مورد نظر) و یک هفته عادت دادن به پروتکل‌های تمرینی (آشناسازی)، از هفتهٔ دهم تمرینات شروع شد. حیوانات در گروه‌های چهارتایی در قفس‌های مخصوص نگهداری شدند. آنها در دمای اتاق (۲۲±۱/۴ درجهٔ سانتی‌گراد) و براساس چرخهٔ ۱۲ ساعت خواب و بیداری (روشنایی و تاریکی) و با در دسترس بودن آب و غذا نگهداری و کنترل شدند. موش‌ها به‌طور تصادفی همگن شدند از نظر وزنی در سه گروه کنترل- شاهد (n=۸)، تمرین استقامتی (تداومی) (n=۸) و تمرین مقاومتی (n=۸) قرار گرفتند.

روش اجرای پژوهش: تمرینات استقامتی شامل هشت هفته و هفته‌ای پنج جلسه (۳ روز تمرین ۱ روز استراحت و ۲ روز تمرین ۱ روز استراحت) دویدن روی نوار گردان مخصوص جوندگان (ساخت ایران) بود. تمرینات در آغاز شامل هر روز ۳۰ دقیقه با سرعت ۱۰ متر در دقیقه بود و این میزان به‌صورت فزاینده به هر روز ۶۰ دقیقه روی نوار گردان و با سرعت ۳۰ متر در دقیقه (معادل ۷۰ تا ۸۰ درصد حداکثر اکسیژن مصرفی-۱۸، ۱۲) رسید (۱۶، ۱۰) (جدول ۱). قبل از هر جلسهٔ تمرینی موش‌ها وزن‌کشی می‌شدند. حیوانات در طول هفته‌های قبل از شروع تمرینات با دویدن روی نوار گردان آشنا شدند و در صورت خودداری از صعود، از شوک الکتریکی کم‌وات در انتهای نوار گردان استفاده می‌شد.

جدول ۱. برنامهٔ تمرینات استقامتی

هفته‌های تمرین	۱	۲	۳	۴	۵	۶	۷	۸
مدت تمرین (دقیقه/روز)	۳۰	۴۰	۴۵	۵۰	۵۵	۶۰	۶۰	۶۰
سرعت نوار گردان (متر/دقیقه)	۱۰	۲۰	۲۰	۲۵	۲۵	۳۰	۳۰	۳۰

تمرینات مقاومتی شامل هشت هفته و هفته‌ای پنج جلسه صعود از نردبان ۱ متری با ۲۶ پله (ساخت پژوهشگر) بود. در این تمرین، پس از بستن وزنه به دُم موش صحرایی، آنها وادار به صعود از نردبان عمود (۸۵ درجه) می‌شدند. پیش از هر جلسهٔ تمرینی موش‌ها وزن‌کشی می‌شدند. در هفتهٔ اول

میزان وزنه‌های بسته‌شده به موش‌ها ۳۰ درصد وزن بدن آنها بود که به‌تدریج افزایش یافت و به حدود ۲۰۰ درصد وزن بدن آنها در هفتهٔ پایانی رسید (جدول ۲). حیوانات در طول هفته‌های قبل از شروع تمرینات با صعود از نردبان آشنا شدند و در صورت خودداری از صعود، از شوک الکتریکی کم‌وات استفاده می‌شد. تمرینات در سه نوبت چهار تکراری انجام می‌گرفت و ۳ دقیقه استراحت بین نوبت‌ها و حدود ۱۰ ثانیه بین تکرارها در نظر گرفته شد. این شیوهٔ تمرینی با اندکی تغییرات از منابع معتبر اخذ شد. اثربخشی این نوع تمرین مقاومتی در آمادگی عضلانی در پژوهش‌های پیشین به تأیید رسیده بود (۱۳).

جدول ۲. تمرینات مقاومتی در ۳ نوبت ۴ تکراری روی نردبان ۱ متری با ۲۶ پله

هفته	اول	دوم	سوم	چهارم	پنجم	ششم	هفتم	هشتم
بار (درصدوزن‌بدن)	۳۰	۷۰-۸۰	۱۰۰	۱۲۰-۱۳۰	۱۴۰-۱۵۰	۱۷۰-۱۷۵	۱۸۰-۱۹۰	۲۰۰

گروه کنترل (شاهد) نیز به‌منظور تجربهٔ کلیهٔ شرایط موجود (صدای نوار گردان، نردبان‌ها و پژوهشگران در حین تمرین) به‌جز تمرین، در محل تمرینات حضور داشت.

آماده‌سازی بافت: ۴۸ ساعت پس از آخرین جلسهٔ تمرینی حیوانات با ترکیبی از Ketamine (۵۰-۳۰ میلی‌گرم/ کیلوگرم وزن بدن) و Xylazine (۵-۳ میلی‌گرم/ کیلوگرم وزن بدن) بی‌هوش شدند و عضلات خم‌کنندهٔ دراز انگشت شست ۱(FHL) و نعلی آنها تحت شرایط استریل از طریق شکاف روی ناحیهٔ پشتی جانبی۲ اندام پشتی تحتانی جدا شد. بافت‌های مورد نظر بلافاصله در نیتروژن مایع (دمای ۱۹۶- درجه) منجمد شده و ضمن انتقال به آزمایشگاه در دمای ۸۰- درجه تا زمان اجرای سنجش آزمایشگاهی مورد نظر نگهداری شدند. بافت‌ها هموژن شده و با استفاده از روش الکتروفورز (پلی‌اکریل-آمید ۰/۰۶ غیرتقلیبی) زیر واحدهای فرعی استیل‌کولین‌استراز در آن جداسازی شد و سپس از کیت مخصوص سنجش میزان فعالیت استیل‌کولین‌استراز به روش الایز توسط کیت محصول کمپانی بایوویژن آمریکا با حساسیت ۰/۵ mu/ml و دقت CV = ۲/۳٪ استفاده شد. برای هموژن کردن از بافر PBS (Phosphate Buffer Saline) با ترکیب آپروتینین (Aprotinin) به‌عنوان آنتی‌پروتئاز استفاده شد (1ml)

1 . Flexor Hallicus Longus
2 . Dorsolateral

و سپس با دور ۶۰۰۰ rpm به مدت ۱۵ دقیقه سانتریفیوژ شده و دو بخش محلول فوقانی Supernatant و رسوب Pellet آنها از هم جدا شد. هموژن و سانتریفیوژ در دانشگاه تربیت مدرس و آنالیز در مرکز تحقیقات غدد و متابولیسم دانشگاه علوم پزشکی شهید بهشتی انجام گرفت. بخش محلول فوقانی Supernatant برای اندازه‌گیری میزان فعالیت استیل‌کولین‌استراز نوع A۱۲ استفاده شد.

تجزیه‌وتحلیل آماری: پس از کسب اطمینان از طبیعی بودن توزیع داده‌ها با آزمون کولموگروف-اسمیرنوف، برای بررسی اثر متغیرهای مستقل بر متغیر وابسته و مقایسهٔ بین تارها از آزمون ANOVA و در صورت وجود تفاوت معنادار از آزمون تعقیبی توکی استفاده شد. تمام عملیات آماری پژوهش با استفاده از نرم‌افزار SPSS نسخهٔ ۱۸ و سطح معناداری $P < ۰/۰۵$ انجام گرفت.

یافته‌های پژوهش

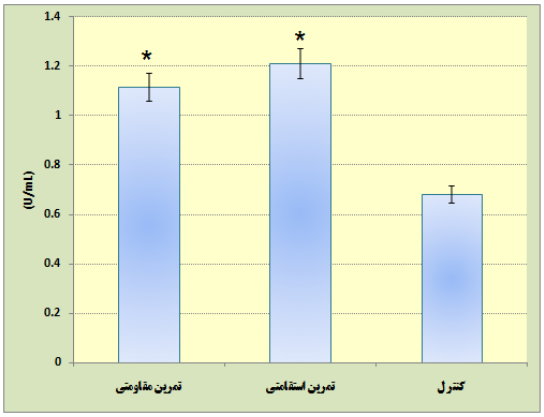
ارزیابی طبیعی بودن توزیع داده‌های مربوط به میزان فعالیت استیل‌کولین‌استراز نوع A۱۲ با استفاده از آزمون کولموگروف- اسمیرنوف در عضلات تندانقباض برای گروه کنترل ۰/۹۴۶، گروه تمرین مقاومتی ۰/۸۴۵ و تمرین استقامتی ۰/۹۲۴ و در عضلات کندانقباض برای گروه کنترل ۰/۹۶۱، گروه تمرین مقاومتی ۰/۸۸۵ و تمرین استقامتی ۰/۴۷۲ بود.

تمرینات استقامتی که پروتکل تمرینی آن از منابع معتبر اقتباس و کارایی خود در زمینهٔ

سازگاری‌های استقامتی را نشان داده بود (۱۴، ۱۰)، موجب ایجاد سازگاری‌های استقامتی در حیوانات شد، به‌طوری‌که آنها توانستند در هفته‌های پایانی با سرعت ۳۰ متر در دقیقه که معادل ۷۰ تا ۸۰ درصد حداکثر اکسیژن مصرفی (VO2max) است، به مدت ۶۰ دقیقه بدوند.

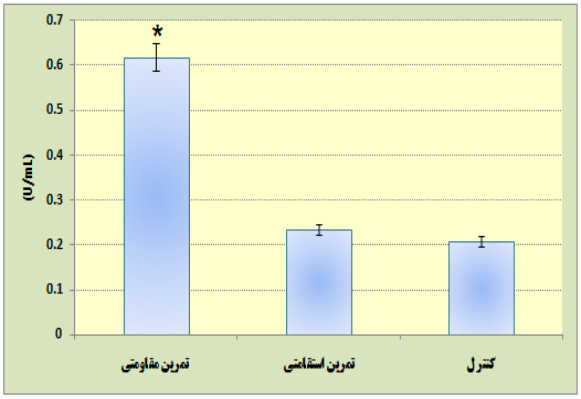
میزان فعالیت استیل‌کولین‌استرازG4 در عضلات تندانقباض (شکل ۱) گروه‌های تمرین مقاومتی (۱/۱۱۸ (U/mL)) و استقامتی (۱/۲۱۱ (U/mL)) در مقایسه با گروه کنترل (۰/۶۸۳ (U/mL)) به‌صورتی معنادار (به‌ترتیب P=۰/۰۴۵ و P=۰/۰۱۵) افزایش یافت، ولی تفاوت معناداری در میانگین میزان فعالیت استیل‌کولین‌استرازG4 بین گروه‌های تمرین مقاومتی و تمرین استقامتی در عضلهٔ تندانقباض موش‌های صحرایی مشاهده نشد (P=۰/۸۳۸).

میزان فعالیت استیل‌کولین‌استراز G_4 عضلات نعلی (شکل ۲) در گروه تمرین مقاومتی (۰/۶۱۸ (U/mL)) به‌صورتی معنادار بالاتر از گروه‌های کنترل (۰/۲۰۸ (U/mL)) و تمرین استقامتی (۰/۲۳۵ (U/mL)) بود (به‌ترتیب P=۰/۰۰۳ و P=۰/۰۰۵)؛ ولی تفاوت معناداری بین میانگین میزان فعالیت استیل‌کولین-استرازG_4 گروه‌های کنترل و تمرین استقامتی در عضلهٔ کندانقباض موش‌های صحرایی مشاهده نشد (P=۰/۹۵۸).



*معنادار بودن اختلاف میانگین با گروه کنترل

شکل ۱. میزان فعالیت استیل‌کولین‌استراز نوع G4 پس از هشت هفته تمرین متفاوت در عضلهٔ تندانقباض موش‌های صحرایی



*معنادار بودن اختلاف میانگین با دو گروه دیگر

شکل ۲. میزان فعالیت استیل‌کولین‌استراز نوع G4 پس از هشت هفته تمرین در عضلات نعلی موش‌های صحرایی

بحث و نتیجه‌گیری

با توجه به نتایج به‌نظر می‌رسد که در مورد عضلهٔ کندانقباض تنش نعلی، تمرین مقاومتی نسبت به تمرین استقامتی اثربخشی بیشتری بر فعالیت استیل‌کولین‌استراز نوع G_4 داشته است. درصورتی‌که در مورد عضلهٔ تندتنش FHL هر دو تمرین استقامتی و مقاومتی تأثیر نسبتاً مشابهی بر فعالیت استیل-کولین‌استراز نوع G_4 داشته‌اند که می‌توان این اثربخشی را به قابلیت تغییرپذیری بیشتر عضلات تندتنش نسبت به عضلات کندتنش، بالاتر بودن نسبت رونوشت‌های استیل‌کولین‌استراز نوع G_4 در عضلات تندتنش و خستگی ایجادشده بر اثر تمرین استقامتی نسبت داد (۲۰، ۱۷، ۶). در ضمن به‌نظر می‌رسد عضلات نعلی در حرکت بالا رفتن از نردبان‌های عمودی، درگیری بیشتر و فشار بیشتری را در مقایسه با دویدن معمولی داشته است. این موضوع ممکن است ناشی از انقباض‌های برون‌گرا و درون‌گرای بیشتر در جریان بالا رفتن عمودی از پله‌های نردبان عمودی در مقایسه با دویدن معمولی روی نوار گردان باشد.

توانایی جابه‌جایی وزنه‌ها و عدم تفاوت وزن حیوانات در گروه تمرین مقاومتی با گروه کنترل و استقامتی پس از هشت هفته تمرین می‌تواند حاکی از آن باشد که تمرین مقاومتی تا حد زیادی به‌طور ویژه از طریق اِعمال سازگاری‌های عصبی-عضلانی موجب بهبود قدرت شده است. پژوهش‌ها نشان دادند که تحریک ورزشی و افزایش فعالیت انتقال عصبی توأمان با تغییرات NMJ تار عضلانی صورت نمی‌گیرد و ممکن است NMJ نسبت به سایر بخش‌های عضلهٔ اسکلتی به پاسخ‌دهی سازشی حاصل از ورزش حساس‌تر باشد (۴). این پژوهشگران نشان دادند که برای افزایش سطوح صفحهٔ انتهایی حرکتی نعلی، تمرینات مقاومتی همانند تمرینات استقامتی، کارامدی لازم را دارد (۴).

در پژوهش حاضر افزایش تقریباً ۴۳ درصدی فعالیت استیل‌کولین‌استراز G_4 در عضلات تندانقباض گروه تمرین استقامتی مشاهده شد. عضلات تندانقباض و کندانقباض موش‌های صحرایی همچنین از نظر بیان استیل‌کولین‌استراز با هم تفاوت دارند (۱۹). بنابراین بروز پاسخ‌های متفاوت دور از انتظار نیست. عضلهٔ تندانقباض FHL از طریق تغییر در میزان فعالیت استیل‌کولین‌استراز G_4 به افزایش در فعالیت عصبی- عضلانی ایجادشده از طریق ورزش یا تحریک الکتریکی پاسخ می‌دهد. نشان داده شده که اگرچه عضلات تندتنش از نظر عملکردی و معماری داخلی با هم فرق دارند، پاسخ استیل‌کولین - استراز G_4 آنها با سطح فعالیتشان همبستگی دارد (۶).

در پژوهش حاضر تمرین مقاومتی در مقایسه با گروه کنترل افزایش تقریباً ۶۶ درصدی در فعالیت ایزوفرم استیل‌کولین‌استراز G_4 عضلهٔ کندانقباض و افزایش تقریباً ۳۹ درصدی در فعالیت ایزوفرم استیل‌کولین‌استراز G_4 عضلات تندانقباض ایجاد کرد. این امر نشان‌دهندهٔ درگیر بودن این عضلات در این پروتکل تمرینی است که در پژوهش‌های دیگر نیز نشان داده شده است (۱۳). همچنین سازگارپذیر بودن پیوندگاه عصبی-عضلانی بر اثر تمرینات ورزشی، که در پژوهش‌های پیشین بدان اشاره شده است، تأیید شد (۱۶). بنائی‌فر و همکاران نیز افزایش شایان توجهی را در میزان فعالیت ایزوفرم A12 استیل-کولین‌استراز در عضلات تندانقباض موش‌های صحرایی بر اثر تمرینات مقاومتی مشابه به‌دست آوردند (۱). همچنین در هر سه گروه تمرین مقاومتی، استقامتی و کنترل میزان فعالیت ایزوفرم استیل‌کولین-استراز G_4 عضلهٔ FHL در مقایسه با عضلهٔ نعلی بیشتر بود که با پژوهش‌های مشابه در این زمینه همخوانی دارد (۹، ۳). علت افزایش میزان فعالیت استیل‌کولین‌استراز G_4 در عضلهٔ FHL بر اثر هر دو نوع تمرین ممکن است ناشی از پاسخ‌پذیری بیشتر این عضله به محرک‌های تمرینی در مقایسه با عضلات کندانقباض باشد. همچنین همان‌طورکه جاسمین و گسیگر عنوان کرده‌اند (۹)، نوع تحریک

واردشده به عضله (تدامی یا تناوبی) نیز می‌تواند این پاسخ‌پذیری را تحت تأثیر قرار دهد. در پژوهش حاضر نیز تمرین مقاومتی که شکل تقریباً تناوبی داشت، بر هر دو نوع عضله تأثیر معناداری گذاشت.

در مجموع و با در نظر گرفتن یافته‌های پژوهش حاضر، نتیجه گرفته می‌شود که تمرینات مقاومتی نیز می‌تواند همانند تمرینات استقامتی به افزایش میزان فعالیت استیل‌کولین‌استراز نوع G_4 در عضلات تندتنش منجر شود و بروز خستگی را به تعویق بیندازند. در مورد عضلات کندتنش انجام پژوهش‌های دیگر با شدت‌ها و مدت‌های بالاتر و متغیرهای وسیع‌تر به‌منظور نتیجه‌گیری قاطع در زمینهٔ سازوکار بهبود رهایش استیل‌کولین بر اثر تمرینات ورزشی استقامتی ضروری است. با این حال، به‌نظر می‌رسد که در مورد عضلهٔ کندتنش تمرین مقاومتی تأثیر بیشتری در میزان فعالیت استیل‌کولین‌استراز نوع G_4 داشته است. این موضوع می‌تواند ناشی از تفاوت در میزان یا الگوی فشار وارده توسط انواع تمرین در پژوهش حاضر نیز باشد. همچنین با توجه به به‌کار نگرفتن عضلات تندتنش در فعالیت‌های روزمره، ظرفیت ابتدایی بیشتر این نوع عضلات برای پاسخ‌دهی بیشتر و سازگاری‌های وسیع‌تر در مقایسه با عضلاتی که پیوسته در حال فعالیت‌اند (همانند عضلات نعلی در حفظ قامت بدن) دور از انتظار نیست.

با توجه به نقش حیاتی و ویژهٔ عضلات تونیک کندانقباض در سلامت و پیشگیری از خستگی عصبی-عضلانی در فعالیت‌های ورزشی طولانی‌مدت، این امر اهمیت روزافزون تمرینات مقاومتی را بارزتر می‌سازد. ازاین‌رو، نتایج پژوهش حاضر تا حدودی به‌کارگیری تمرینات مقاومتی برای ورزشکاران استقامتی به‌منظور به تعویق انداختن خستگی در پیوندگاه عصبی عضلانی را آشکار می‌کند.

منابع و مآخذ

۱. بنائی فر، عبدالعلی؛ گُرزی، علی؛ هدایتی، مهدی؛ نبی‌اللهی، زینب (۱۳۹۰). اثر ۸ هفته تمرین مقاومتی بر فعالیت استیل کولین استراز در عضلات موش صحرایی، مجلهٔ فیض، ج ۱۵ ش ۴، ص ۳۱۶ - ۳۲۱.

۲. مکینتاش، برایان آر؛ گاردینر، فیلیپ اف؛ و مک کومز، الان جی (۱۳۹۱). ساختار و عملکرد عضلهٔ اسکلتی، ترجمهٔ رضا قراخانلو، احمد آزاد و علی گرزی، تهران، سمت، ص ۹۵ - ۹۰.

3. Crne-Finderle, N., Pregelj, P., Sketelj, J. (2005). "Junctional and extrajunctional acetylcholinesterase in skeletal muscle fibers".Chem Biol Interact., Vol.157-158, PP: 23-27.

4. Deschenes, M.R., Judelson, D.A., Kraemer, W.J., Meskaitis, V.J., Volek, J.S., Nindl, B.C., Harman, F.S., Deaver, D.R. (2000). "Effects of resistance training on neuromuscular junction morphology". Muscle Nerve., Vol.23, No.10, PP: 1576-1581.
5. Fahim, M.A. (1997). "Endurance exercise modulates neuromuscular junction of C57BL/6NNia aging mice". J Appl Physiol., Vol.83, No.1, PP: 59–66.
6. Gisiger, V., Bélisle, M., Gardiner, P.F. (1994). "Acetylcholinesterase adaptation to voluntary wheel running is proportional to the volume of activity in fast, but not slow, rat hindlimb muscles". Eur J Neurosci., Vol.6, No.5, PP: 673-680.
7. Gregory, E.J., Hodges-Savola, C.A., Fernandez, H.L. (1989). "Selective increase of tetrameric (G4) acetylcholinesterase Activity in rat hindlimb skeletal muscle following short-term denervation". J Neurochem., Vol.53, No.5, PP: 1411-1418.
8. Hodges-Savola, C. A., and Fernandez, H. L. (199l). "A role for acetylcholine-nicotinic receptor interactions in the selective increase of rat skeletal muscle G4 acetylcholinesterase following short-term denervation". J Neurochem., Vol.56, No.4, PP: 1423-1431.
9. Jasmin, B.J., Gisiger, V. (1990). "Regulation by exercise of the pool of G4 acetylcholinesterase characterizing fast muscles: opposite effect of running training in antagonist muscles". J Neurosci., Vol.10, No.5, PP: 1444-1454.
10. Joo YI, Sone T, Fukunaga M, Lim SG, Onodera S. (2003). "Effects of endurance exercise on three-dimensional trabecular bone microarchitecture in young growing rats". Bone., Vol.33, No.4, PP: 485-493.
11. Kalamida, D., Poulas, K., Avramopoulou, V., Fostieri, E., Lagoumintzis, G., Lazaridis, K., Sideri, A., Zouridakis, M., Tzartos, S.J. (2007). "Muscle and neuronal nicotinic acetylcholine receptors. Structure, function and pathogenicity". FEBS J., Vol.274, No.15, PP: 3799-3845.
12. Kowalchuk H., Noble E. (2013). The effects of acute high- and low-intensity exercise on Hsp70 and Hsp90 accumulation in rat skeletal myofibres and vasculature. University of Western Ontario. Thesis, 1- 57. p 42.
13. Lee, S., Farrar, R.P. (2003). "Resistance training induces muscle-specific changes in muscle mass and function in rat". JEPonline., Vol.6, No.2, PP: 80-87.
14. Lømo, T., Massoulie´, J., Vigny, M. (1985). "Stimulation of denervated rat soleus muscle with fast and slow activity patterns induces different expression of acetylcholinesterase molecular forms". J Neurosci., Vol.5, No.5, PP: 1180-1187.
15. Massoulié, J. (2002). "The origin of the molecular diversity and functional anchoring of cholinesterases". Neurosignals., Vol.11, No.3, PP: 130-143.
16. Parnow A, Gharakhanlou R, Gorginkaraji Z, Rajabi S, Eslami R, Hedayati M and Mahdian R. (2012). Effects of Endurance and Resistance Training on Calcitonin Gene-Related Peptide and Acetylcholine Receptor at Slow and Fast Twitch Skeletal Muscles and Sciatic Nerve in Male Wistar Rats. International Journal of Peptides. 2012:1-8.

17. Prakash, Y.S., Smithson, K.G., and Sieck, G.C. (1995). "Growth-related alterations in motor endplates of type-identified diaphragm muscle fibres". J Neurocytol., Vol.24, No.3, PP: 225-235.
18. Rodrigues B, Figueroa D.M, Mostarda C.T, Heeren M.V, Irigoyen M.C and Angelis K.D. Maximal exercise test is a useful method for physical capacity and oxygen consumption determination in streptozotocin-diabetic rats. Cardiovascular Diabetology 2007, 6:38.
19. Sketelj J, Crne-Finderle N, Ribaric S, Brzin M. (1991). "Interactions between intrinsic regulation and neural modulation of acetylcholinesterase in fast and slow skeletal muscles". Cell Mol Neurobiol., Vol.11, No.1, PP: 35-54.
20. Waerhaug, O., Dahl, H.A., and Kardel, K. (1992). "Different effects of physical training on the morphology of motor nerve terminals in the rat extensor digitorum longus and soleus muscles". Anat Embryol (Berl)., Vol.186, No.2, PP: 125-128.
21. Wilson, M.H., Deschenes, M.R. (2005). "The neuromuscular junction: anatomical features and adaptations to various forms of increased, or decreased neuromuscular activity". Int J Neurosci., Vol.115, No.6, PP: 803-828.