

## **Investigating and comparing the lower body muscle strength and activity of active and inactive multiple sclerosis patients during walking**

**Seyed Amirhossein Hosseini Athar<sup>1</sup> - Ziya Fallah Mohammadi<sup>\*2</sup> - Vahid Talebi<sup>3</sup>**

**1.Masters in Exercise Physiology, Department of Exercise Physiology, Faculty of Sports Sciences, University of Mazandaran, Babolsar, Iran 2.Professor of Exercise Physiology, Department of Exercise Physiology, Faculty of Sports Sciences, University of Mazandaran, Babolsar, Iran 3.Assistant Professor in Sports Physiology, Department of Sports Sciences, Faculty of Humanities, University of Maragheh, Maragheh, Iran**

**(Received:2025/05/30; Accepted:2025/11/03)**

### **Abstract**

Multiple sclerosis (MS) is a chronic, autoimmune disease of the central nervous system that is often disabling and currently has no cure. This study aimed to compare the strength and activity of lower limb muscles in active and inactive MS patients during walking. A total of 35 MS patients from Mazandaran province participated voluntarily and were divided into two groups based on physical activity level: active MS (n = 20) and inactive MS (n = 15). Maximum quadriceps strength was measured using the Brzycki formula, and muscle activity and co-contraction were assessed via electromyographic (EMG) signal recordings. Data were analyzed using independent samples t-tests in SPSS software (version 22), with a significance level set at  $p < 0.05$ . Results showed significant differences in muscle strength and electrical activity between groups ( $p < 0.001$ ). The active MS group exhibited lower mean and maximum muscle electrical activity ( $p = 0.001$ ) but higher muscle strength ( $p = 0.001$ ) compared to the inactive group. However, muscle co-contraction did not differ significantly between groups ( $p > 0.05$ ). In conclusion, long-term exercise training enhances muscle strength and reduces the need for high levels of electrical signaling in active MS patients. Variations in activity intensity may influence electrical activity, warranting further investigation in future studies.

### **Keywords:**

Electromyography Activity, Lower Limb, MS Disease, Muscle Strength.

---

\* Corresponding author email: [zia-falm@umz.ac.ir](mailto:zia-falm@umz.ac.ir)

## بررسی و مقایسه قدرت و فعالیت عضلات پایین تنه بیماران اسکروز متعدد فعال و غیرفعال حین فعالیت راه رفتن

سید امیرحسین حسینی اطهر<sup>۱</sup> - ضیاء فلاح محمدی<sup>۲\*</sup> - وحید طالبی<sup>۳</sup>

۱. کارشناس ارشد فیزیولوژی ورزشی، گروه فیزیولوژی ورزشی، دانشکده علوم ورزشی، دانشگاه مازندران، بابلسر،

ایران. ۲. استاد فیزیولوژی ورزشی، گروه فیزیولوژی ورزشی، دانشکده علوم ورزشی، دانشگاه مازندران، بابلسر، ایران

۳. استادیار فیزیولوژی ورزشی، گروه علوم ورزشی، دانشکده علوم انسانی، دانشگاه مراغه، مراغه، ایران

(تاریخ دریافت: ۱۴۰۴/۰۳/۱۰؛ تاریخ پذیرش: ۱۴۰۴/۰۸/۱۳)

### چکیده

اسکروز متعدد (MS) یک بیماری شایع، جسمی مزمن، خود ایمنی و بیشتر وقت‌ها ناتوان‌کننده سیستم عصبی مرکزی با عدم وجود درمان است. لذا هدف از این پژوهش بررسی و مقایسه قدرت و فعالیت عضلات پایین تنه بیماران اسکروز متعدد فعال و غیرفعال حین فعالیت راه رفتن بود. در این پژوهش، ۳۵ فرد مبتلا به بیماری MS از استان مازندران به صورت داوطلبانه شرکت کردند و بر اساس سطح فعالیت بدنی به دو گروه MS فعال (۲۰ نفر) و MS غیرفعال (۱۵ نفر) تقسیم شدند. قدرت بیشینه عضلات چهار سر با استفاده از فرمول برزیسکی و فعالیت عضلانی و هم‌انقباضی عضلات اندام تحتانی با ثبت سیگنال‌های الکترومیوگرافی ارزیابی شد. داده‌ها با آزمون تی و نرم‌افزار SPSS نسخه ۲۲ در سطح معناداری ۰/۰۵ تحلیل گردید. این پژوهش نشان داد تفاوت معناداری بین قدرت و فعالیت الکتریکی عضلات گروه‌های فعال و غیرفعال، MS وجود داشت ( $P > 0/001$ ). به طوری که میانگین فعالیت الکتریکی عضلات ( $P = 0/001$ )، بیشینه فعالیت الکتریکی عضلات ( $P = 0/001$ ) در گروه MS فعال کمتر بود اما قدرت عضلانی ( $P = 0/001$ ) در گروه MS فعال نسبت به گروه MS غیرفعال بیشتر بود. از طرفی هم انقباضی در گروه MS فعال نسبت به گروه MS غیرفعال تفاوتی نداشت ( $P < 0/05$ ). تمرینات ورزشی طولانی مدت تأثیر مثبتی بر قدرت عضلات و کاهش نیاز به ارسال سیگنال‌های الکتریکی در بیماران فعال دارد. همچنین، تغییرات در شدت فعالیت می‌تواند نیاز به فعالیت الکتریکی را تحت تأثیر قرار دهد و مطالعات آینده می‌توانند این فرضیه را بیشتر بررسی کنند.

### واژه‌های کلیدی

قدرت عضلانی، فعالیت الکترومیوگرافی، اندام تحتانی، بیماری MS.

## مقدمه

از سویی دیگر، نقش اولیه هم‌انقباضی، افزایش ثبات و افزایش سختی ظاهری در مفصل فرض می‌شود؛ اما، افزایش بار در مفصل بیماران باعث صدمه غضروف مفصلی و بیشتر شدن درد می‌شود (۱۳). سیستم عصبی مرکزی با کمک تنظیم هم‌انقباضی جفت عضلات عمل کننده در مفاصل اصلی پاسچرال می‌تواند مقابله خاصیت ارتجاعی محیطی با تنش را تعدیل نماید. اگر فردی بخواهد از انحرافات مفصلی عمده در شرایط اختلال غیرمنتظره دوری کند، این هم-انقباضی می‌تواند سودمند باشد؛ برای اینکه هم‌انقباضی، موجب افزایش سختی ظاهری مفصل می‌شود. نقص وابسته به سن در پاسخ‌های بازتابی، پاسخ‌های از پیش برنامه‌ریزی شده و تعدیل وضعیت پیش‌بینی کننده<sup>۲</sup> (APA) موجب می‌شود هم‌انقباضی عضلانی به عنوان یکی از محدود راهکارهای مانده برای کم کردن اختلالات دور از پیش‌بینی در نظر گرفته شود (۱۴). در حالی که یکی از عوارض بیماری MS عدم تعادل است. یکی از احتمالات برای جبران این عارضه، افزایش فعالیت هم‌انقباضی عضلانی هنگام گام برداشتن، افزایش حمایت اندام تحتانی در برابر نیروهای وارده است. در مقابل، افرادی که به تازگی در حال کسب یک مهارت حرکتی تازه هستند، اکثراً سطوح هم-انقباضی بالاتری از سطح بهینه را نشان می‌دهند که به نظر می‌آید پایداری را افزایش، و احتمال خطا پایین می‌آورد. این هم‌انقباضی بالا، پس از آن که مهارت به درستی فرا گرفته شد، محو می‌شود (۱۵). با وجود شواهد فزاینده مبنی بر تأثیر مثبت فعالیت بدنی بر بهبود عملکرد بیماران مبتلا به MS، مطالعات محدودی به بررسی تفاوت‌های تطبیقی بین بیماران فعال و غیرفعال MS در حین فعالیت‌های روزمره مانند راه رفتن پرداخته‌اند. به‌ویژه،

اسکروز متعدد<sup>۱</sup> (MS) یک بیماری شایع، جسمی مزمن، خود ایمنی و بیشتر وقت‌ها ناتوان‌کننده سیستم عصبی مرکزی با عدم وجود درمان است (۱، ۲). در این بیماری دستگاه ایمنی بدن به سوی غلاف میلین سلول‌های عصبی، الیگودندروسیت‌ها و آکسون‌های حسی و حرکتی در مغز و نخاع نشانه رفته، آن‌ها را دچار التهاب و تخریب می‌کند که کاهش سرعت هدایت آکسون، کاهش کارایی بخشی از عضلات بدن و همچنین به خطر انداختن عملکرد فیبر عصبی را به دنبال دارد (۳). این بیماری غیرقابل پیش‌بینی تمام زوایای زندگی فرد را تحت تأثیر قرار می‌دهد، به تدریج به سمت کاهش کیفیت زندگی و ناتوانی پیش می‌برد بر همین اساس این بیماری را به شدت ناتوان‌کننده می‌نامند (۴). این بیماری موجب پیامدهای شایعی مانند: اختلال در تعادل، اسپاسم، ضعف حرکتی، اختلال در عملکرد عضلانی (۵)، خستگی و ضعف عضلانی می‌شود (۶). این امر منجر به کاهش تحرک و آتروفی تارهای عضلانی نوع اول خواهد شد (۷). این پیامدها که همراه با سطح پایین آمادگی عضلانی است بر روی کارهای روزمره و عملکرد مبتلایان اثر منفی می‌گذارد (۴). این کسری ناشی از کمبود پارامترهای مکانیکی عضلانی مربوط به هر دو مکانیسم عصبی (۸) و ساختاری (۹) می‌شود. در واقع، پژوهش‌های قبلی از دست دادن توده عضلانی، توزیع غیر نرمال انواع فیبر عضلانی، کاهش توانایی به‌طور کامل فعال کردن واحدهای حرکتی و کاهش سرعت توسعه نیرو در بیماران مبتلا به MS را نسبت به گروه کنترل نشان داده‌اند (۱۰، ۱۱). در حال حاضر برای بیماری MS درمان قطعی وجود ندارد ولی برای کاهش علائم و روند بیماری موجود است (۱۲).

2. Anticipatory Postural Adjustments.

1. Multiple Sclerosis (MS)

حرکتی، نقش کلیدی در کنترل عضلات و بهبود عملکرد حرکتی ایفا می‌کند (۲۰). در بیماران MS، اختلال در عملکرد CNS ممکن است منجر به کاهش هماهنگی عضلانی و هم‌انقباضی غیر بهینه شود. فعالیت بدنی منظم می‌تواند با تقویت مسیرهای عصبی-عضلانی و بهبود کنترل حرکتی، به افزایش قدرت و کارایی عضلات پایین‌تنه و بهینه‌سازی الگوهای هم‌انقباضی در حین راه رفتن کمک کند. علاوه بر این، تئوری سازگاری عمومی Selye نیز می‌تواند چارچوب مناسبی ارائه دهد (۲۱). بر اساس این تئوری، فعالیت بدنی به‌عنوان یک استرس مثبت<sup>۳</sup> عمل کرده و با تحریک سازگاری‌های فیزیولوژیکی، مانند افزایش قدرت عضلانی و بهبود تعادل، به کاهش اثرات منفی بیماری MS کمک می‌کند (۲۱، ۲۲). استفاده از این مدل‌های تئوریک، امکان تحلیل دقیق‌تر مکانیسم‌های اثر فعالیت بدنی بر بیماران MS را فراهم می‌آورد و به استدلال علمی پژوهش قوت می‌بخشد. در نتیجه سؤالی که مطالعه حاضر در پی یافتن پاسخ آن بود این است که آیا بین قدرت و فعالیت عضلانی پاهای بیماران مبتلا به MS فعال و غیرفعال در فعالیت راه رفتن تفاوت وجود دارد؟ آیا هم-انقباضی عضلات مسئول در راه رفتن بیماران در شرایط فعال بودن یا نبودن متفاوت است؟ بنابراین هدف از این پژوهش با آگاهی از افت و کاهش فعالیت عضلانی در بیماران MS، بررسی و مقایسه قدرت، فعالیت و هم‌انقباضی عضلات پایین‌تنه در گروه‌های فعال و غیرفعال مبتلا به بیماری MS بود.

### روش‌شناسی پژوهش

داده‌های دقیق الکترومیوگرافی<sup>۱</sup> (EMG) برای تحلیل الگوهای فعالیت عضلانی و هم‌انقباضی در فازهای مختلف گام‌برداری (مانند فاز ایستادن، نوسان و تماس با زمین) در این بیماران به‌طور قابل‌توجهی کمیاب است. این کمبود اطلاعات، درک جامعی از چگونگی تأثیر فعالیت بدنی بر مکانیسم‌های عصبی-عضلانی و تعادل پویا در بیماران MS را محدود کرده و نیاز به تحقیقات هدفمند در این حوزه را برجسته می‌سازد.

این در حالی است که یکی از شیوه‌های مؤثر، کنترل‌کننده و کم‌هزینه در بهبود علائم بیماری MS، فعالیت ورزشی است (۱۶). متأسفانه، علی‌رغم مزایای آموزش ورزش، بیشتر افراد مبتلا به MS از نظر جسمی بی‌تحرك هستند. مطالعات مقایسه مستقیم الگوهای فعالیت بدنی افراد مبتلا به MS، افراد فاقد MS و سایر بیماران مزمن نشان می‌دهد که افراد مبتلا به MS ممکن است در پایین‌ترین طیف مشارکت در فعالیت‌های بدنی باشند (۱۷، ۱۸). همان‌طور که یافته‌های جعفری و همکاران (۱۳۹۶) نشان داد، بیماران MS تمرین کرده در مقایسه با گروه کنترل در قدرت عضلانی و دامنه حرکتی مفاصل پیشرفت قابل قبولی مشاهده کرده‌اند. همچنین، طالبی و همکاران (۱۳۹۹) نشان دادند تعادل افراد فعال مبتلا به MS نسبت به گروه غیرفعال نزدیک به گروه‌های سالم است (۱۹). لذا آگاهی داشتن از وضعیت بیماری نسبت به مزیت‌های فعالیت بدنی می‌تواند به کاهش اثرات بیماری، کاهش هزینه‌ها، کاهش استرس، انتخاب بهترین نوع فعالیت بدنی و ورزش کمک کند. برای تحلیل این موضوع، می‌توان از مدل تئوریک کنترل حرکتی سیستم عصبی مرکزی<sup>۲</sup> (CNS) استفاده کرد. این مدل بیان می‌کند که CNS از طریق هماهنگی و تنظیم الگوهای

<sup>۳</sup>Eustress

<sup>۱</sup>Electromyography (EMG)

<sup>۲</sup>Central Nervous System (CNS)

ارزیابی قرار گرفت. اندازه گیری قدرت بیشینه عضلات چهار سر از طریق فرمول برزیسکی محاسبه شد (۲۳).

$$1 \text{ rep max} = \frac{\text{وزنه جابجا شده}}{(\text{تعداد تکرار} \times 0.278) - 1}$$

در محاسبه قدرت بیشینه چهارسر، افراد پس از کشش مختصر در بخش پاها روی دستگاه جلوپا<sup>۱</sup> می نشست. زانو و ران در یک زاویه ۹۰ درجه تنظیم و فرد مفصل زانو را باز می کرد. آزمودنی وزنه ای را که از نظر خود فرد می توانست بدون خستگی حداکثر یک بار تکرار کنند، انتخاب کرده و تا زمانی که توانایی تکرار صحیح حرکت بدون اعمال فشار از طریق دست یا بلند کردن باسن را داشت، تکرار می کردند. وزنه انتخاب شده توسط افراد به نحوی بود که حداکثر ۱۰ تکرار یا کمتر بتوانند انجام دهند در غیر این صورت پس از استراحت چند دقیقه ای فرد با انتخاب وزنه بالاتر حرکت را دوباره اجرا می کرد. آزمون گیرنده نیز مقدار وزنه انتخاب شده و تعداد تکرارها را ثبت می کرد.

در این مطالعه، فعالیت ۴ عضله ساقی قدامی (TA)،<sup>۴</sup> دوقلو داخلی<sup>۳</sup> (Gas)، نازک نئی بلند<sup>۴</sup> (PL) و نعلی<sup>۵</sup> (Sol) از پای راست مورد بررسی قرار گرفت. ابتدا نقطه مورد نظر برای نصب الکترولیت ها با ژیلت تمیز گردید و سپس با الکل سفید شستشو داده شد و با استفاده از سایت راهنمای پروتکل اروپایی (SENIAM) الکترودها بر روی عضلات نصب شد. (فاصله مرکز تا مرکز الکترودها ۲ سانتی متر بود و الکتروده زمین روی استخوان درشتنی نصب شد فرکانس نمونه برداری ۱۰۰۰ هرتز در نظر گرفته شد). فعالیت عضلات توسط دستگاه الکترومیوگرافی (Biovision) ساخت کشور آلمان ضبط و توسط نرم افزار DasyLab نسخه ۱۰ ثبت شد. فعالیت عضلانی در طی

این تحقیق از نوع علی پس از وقوع - مقایسه ای و کاربردی با کد اخلاق IR.UZM.REC.1397.017 است. جامعه آماری این پژوهش را زنان و مردان سالم و مبتلا به بیماری MS استان مازندران تشکیل دادند. پس از تهیه فهرست افراد عضو انجمن MS استان مازندران و تأیید پزشک متخصص، روند پژوهش و ساعت حضور در آزمایشگاه علوم ورزشی دانشگاه مازندران با افرادی که معیار ورود به تحقیق داشتند (۴۰ نفر)، هماهنگ شد. در این پژوهش افراد شرکت کننده به تفکیک جنسیت، ۳۰ نفر زن بیمار و ۱۰ مرد بیمار شامل شد. آزمودنی ها به دو گروه MS فعال (۲۰ نفر) و MS غیر فعال (۲۰ نفر) تقسیم شدند. سابقه فعالیت ورزشی آزمودنی ها از طریق پرسشنامه و اظهارات خود آزمودنی ها مشخص شد. نوع فعالیت عمدتاً شامل تمرینات پیلاتس، یوگا و تمرین با وزنه بود.

معیارهای ورود به این مطالعه شامل: امتیاز EDSS زیر ۴، توانایی ایستادن و گام برداری و عدم بیماری عصبی یا معلولیت جسمی دیگر بود. چنانچه هر یک از بیماران در طول ارزیابی ها تمایل به ادامه همکاری نداشتند از مطالعه خارج می شدند. پس از حضور آزمودنی ها در آزمایشگاه دانشکده علوم ورزشی و اخذ رضایت نامه شرکت در پژوهش و توضیح مراحل انجام ارزیابی با دریافت یک کد اختصاصی به منظور حفظ اطلاعات شخصی و محرمانه بودن نتایج، روند ارزیابی ها شروع می شد. آزمودنی ها ابتدا از نظر قد و وزن، مورد بررسی قرار گرفتند. در این مطالعه، برای اندازه گیری قد و وزن آزمودنی ها از دستگاه قد وزن سنج Seca مدل HalkeVogel & ساخت کشور آلمان با دقت اندازه گیری یک دهم گرم برای وزن و یک میلی متر برای قد استفاده شد. در ادامه فعالیت عضلانی با استفاده از الکترومیوگرافی و در نهایت قدرت چهارسر رانی مورد

4. Peroneus Longus Muscle.

5. Soleus Muscle.

1. Leg Extension.

2. Tibialis Anterior Muscle.

3. Medial Gastrocnemius Muscle.

و ساقی قدامی با عضله نعلی نیز از طریق فرمول زیر محاسبه شد (۲۵). همه این محاسبات در محیط متلب انجام شد.

$$COI\% = 2 \times \frac{A \& B \text{ ناحیه مشترک}}{A \text{ ناحیه} + B \text{ ناحیه}} \times 100$$

در بخش آمار توصیفی از شاخص‌های پراکندگی انحراف معیار، میانگین و نمودار و در بخش آمار استنباطی جهت تعیین نرمال بودن توزیع داده‌ها از آزمون شاپیرو ویلک<sup>۲</sup> استفاده شد. همچنین همسان بودن واریانس‌ها با آزمون لون<sup>۳</sup> بررسی شد. در ادامه برای مقایسه بین گروهی داده‌ها با استفاده از آزمون تی- تست دو نمونه مستقل انجام شد. جهت تجزیه و تحلیل داده‌ها از نرم افزار SPSS نسخه ۲۲ استفاده و سطح معنی داری  $P \leq 0.05$  در نظر گرفته شد.

### یافته‌ها

جدول ۱ میانگین و شاخص‌های پراکندگی ویژگی‌های دموگرافیک و آنتروپومتریکی آزمودنی‌های شرکت کننده را در دو گروه پژوهش حاضر نشان می‌دهد.

یک مرحله گام برداری از مرحله تماس پاشنه تا جدا شدن انگشتان از زمین ثبت گردید. فرکانس نمونه برداری ۲۰۰۰ هرتز در نظر گرفته شد. جهت نرمالایز کردن فعالیت عضلانی ثبت شده از روش RVC استفاده شد. در حالت اول، فرد با نگه داشتن وزنه ۲/۵ کیلوگرمی در مقابل سینه بر روی انگشتان پا بلند می‌شد. این حرکت برای بررسی فعالیت عضلات دوقلو داخلی و عضله نعلی بود. برای ثبت RVC عضلات ساقی قدامی و عضله نازکنی بلند، فرد روی صندلی نشسته و کف پاها عمود بر زمین قرار می‌گرفت سپس با قرار گرفتن وزنه ۲/۵ کیلوگرمی روی انگشتان آزمودنی حرکت دورسی فلکشن اجرا می‌شد هر دو حالت به مدت ۸ ثانیه انجام شد (۲۴). پس از استخراج داده‌های خام با استفاده از نرم‌افزار MATLAB (نسخه ۲۰۱۶) فیلتر پایین گذر ۵۰۰ و فیلتر بالا گذر ۱۰ هرتز اعمال شد. سپس این مقدار بر ۳ ثانیه وسط RVC که اوج انقباض ارادی است، نرمالایز شد. مقدار به دست آمده در عدد ۱۰۰ ضرب و درصدی از فعالیت عضلات به دست آمد (۲۴). سپس اوج و میانگین فعالیت عضلات و همچنین هم انقباضی عضلات به دست آمد. هم انقباضی عضلات ساقی قدامی با عضله نازکنی بلند، ساقی قدامی با دوقلو داخلی

جدول ۱. مشخصات آزمودنی‌ها در گروه‌های پژوهش بر اساس فعال و غیرفعال بودن

گروه*	سن (سال)	وزن (kg)	قد (cm)	مدت بیماری (سال)
MS غیرفعال	۳۷/۱۰ ± ۷/۴۳	۷۱/۶۲ ± ۹/۳۰	۱۶۴/۰۵ ± ۶/۲۲	۲/۵۰ ± ۱/۲۷
MS فعال	۳۳/۷۸ ± ۸/۴۶	۷۵/۵۴ ± ۱۵/۶۹	۱۶۵/۸۹ ± ۱۰/۷۳	۳/۶۳ ± ۲/۱۳

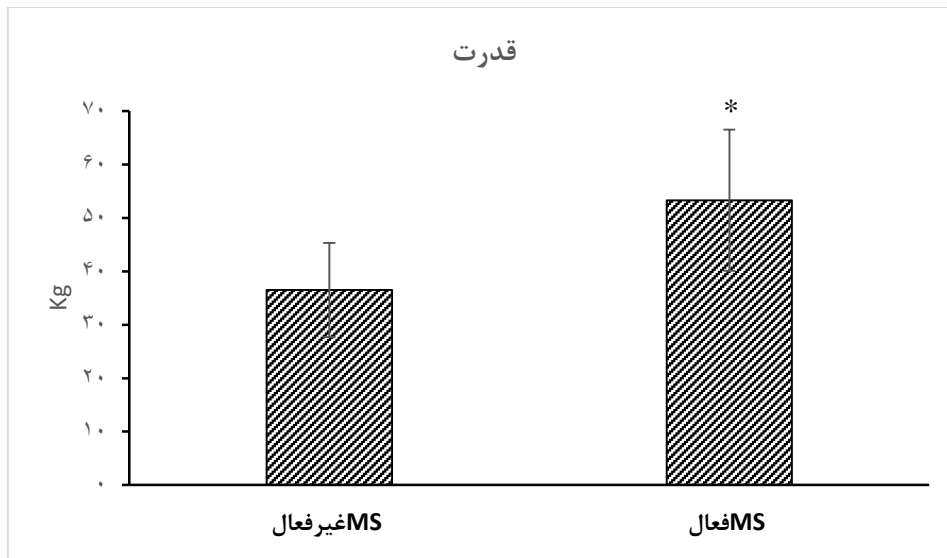
\* MS غیرفعال (۲۰ نفر)، MS فعال (۲۰ نفر)

نتایج حاصل از آزمون تی- تست نشان داد قدرت عضلات اندام تحتانی بین دو گروه پژوهش تفاوت معناداری دارد ( $t = -4.508, P = 0.001$ ).

<sup>3</sup>. Leven.

<sup>1</sup>. Reference Voluntary Contraction.

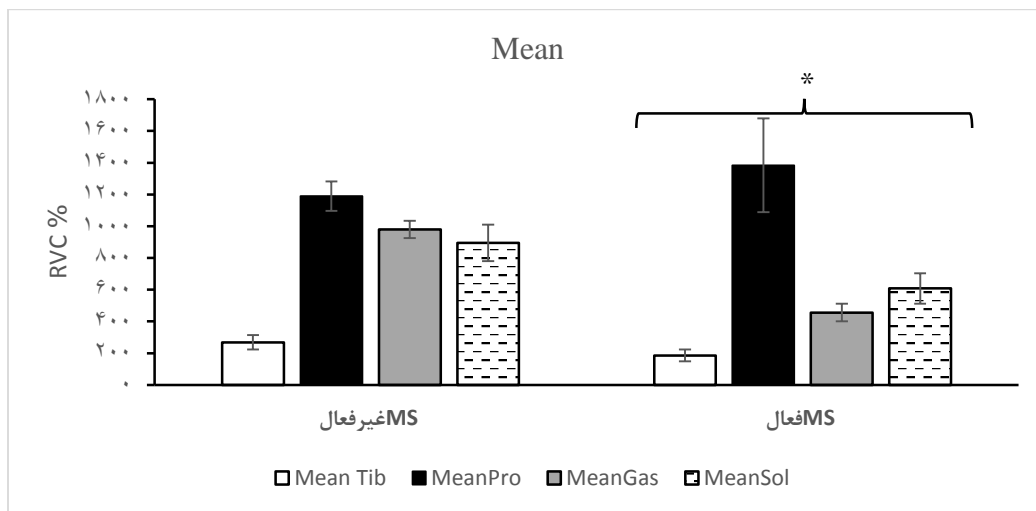
<sup>2</sup>. Shapiro-Wilk Test.



نمودار ۱. میانگین تغییرات قدرت در گروه‌های پژوهش. \* تفاوت معنادار نسبت به گروه غیرفعال

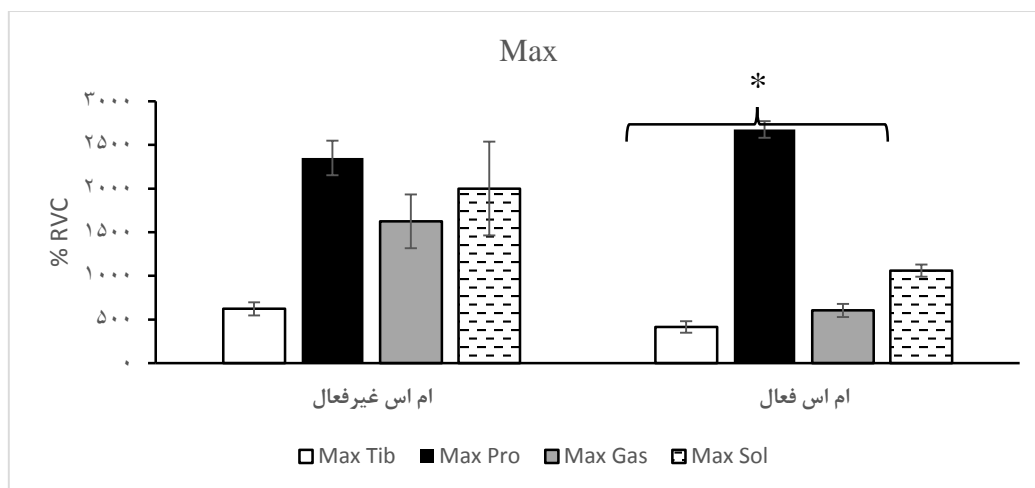
میانگین فعالیت عضله Gas ( $t= ۳۵/۷۷۳$ ,  $P=۰/۰۰۱$ )  
کاهش و میانگین فعالیت عضله Sol ( $t= ۸/۰۵۲$ ,  $P=۰/۰۰۱$ )  
کاهش معناداری داشت (نمودار ۲).

نتایج حاصل از آزمون تی- تست نشان داد میانگین  
فعالیت عضله Tib ( $t= ۵/۹۶۷$ ,  $P= ۰/۰۰۱$ )، میانگین  
فعالیت عضله Pro ( $t= -۲/۷۷$ ,  $P= ۰/۰۱۱$ ) افزایش،



نمودار ۲. میانگین تغییرات چهار عضله اندازه‌گیری شده در گروه‌های پژوهش. \* تفاوت معنادار با گروه غیرفعال

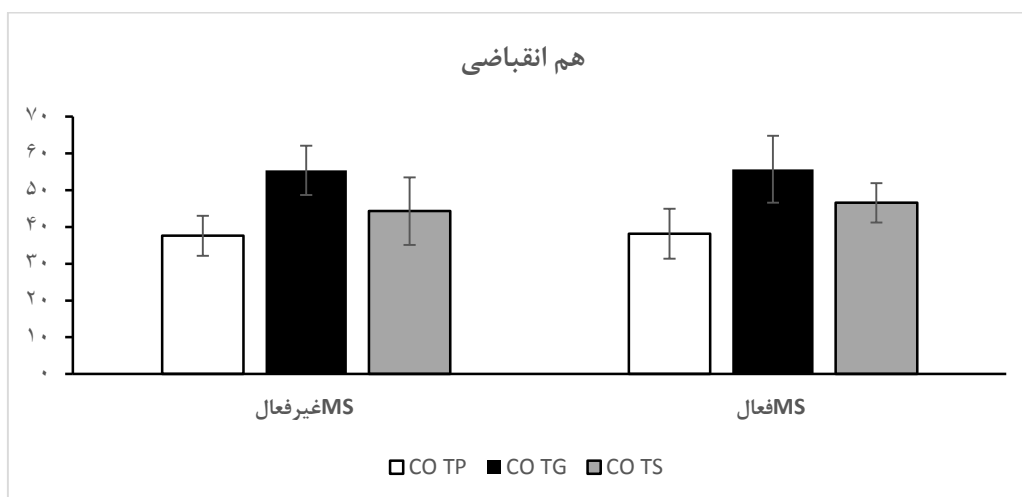
نتایج حاصل از آزمون تی- تست نشان داد بیشینه  
فعالیت عضله Tib ( $t= ۸/۲۲۵$ ,  $P=۰/۰۰۱$ )، بیشینه  
فعالیت عضله Pro ( $t= -۴/۸۱۸$ ,  $P=۰/۰۰۱$ )، بیشینه  
فعالیت عضله Gas ( $t=۱۲/۵۴۴$ ,  $P=۰/۰۰۱$ ) و بیشینه  
فعالیت عضله Sol ( $t= ۶/۷۲۹$ ,  $P=۰/۰۰۱$ ) بین گروه‌های  
پژوهش تفاوت معناداری وجود دارد (نمودار ۳).



نمودار ۳. میانگین تغییرات Max Tib در گروه‌های پژوهش. \* تفاوت معنادار با گروه غیرفعال

نتایج حاصل از آزمون تی- تست نشان داد هم انقباضی دو عضله Tib (با Pro) CoTP ( $P=0/792$ ,  $t=-0/266$ ), هم انقباضی دو عضله Tib (با Sol) CoTS ( $P=0/929$ ,  $t=-0/090$ ) بین گروه‌های پژوهش تفاوت معناداری وجود ندارد (نمودار ۴).

نتایج حاصل از آزمون تی- تست نشان داد هم انقباضی دو عضله Tib (با Tib) CoTP ( $P=0/792$ ,  $t=-0/266$ ), هم انقباضی دو عضله Tib (با Tib) CoTS ( $P=0/929$ ,  $t=-0/090$ ) بین گروه‌های پژوهش تفاوت معناداری وجود ندارد (نمودار ۴).



نمودار ۴. میانگین تغییرات هم انقباضی عضلات در گروه‌های پژوهش. تفاوت معناداری بین گروه‌های پژوهش مشاهده نشد.

نتایج پژوهش‌های داگلاس و همکاران (۲۶)، دیبولت و مک‌کوبین (۲۷)، کورکماز و همکاران (۲۸) و وایت و همکاران (۲۹) همخوانی دارد که اثر تمرینات مقاومتی را بر افزایش قدرت عضلانی در بیماران MS تأیید کرده‌اند. با این حال، نتایج پژوهش حاضر با مطالعه حسینی و رجبی (۳۰) که اثر تمرینات یوگا را بررسی کرده بودند، همسو نبود. همچنین، هاروی و همکاران (۳۱) بهبود معناداری در قدرت عضلات بازکننده زانو گزارش نکردند که احتمالاً به

#### بحث و نتیجه‌گیری

هدف از پژوهش حاضر، بررسی و مقایسه قدرت و فعالیت الکتریکی عضلات پایین‌تنه بیماران مبتلا به MS فعال و غیرفعال طی فعالیت راه رفتن بود. یافته‌های مطالعه نشان داد که قدرت عضلات چهارسر ران در گروه MS فعال به‌طور معناداری بیشتر از گروه غیرفعال بود. همچنین، میانگین و بیشینه فعالیت الکتریکی عضلات اندام تحتانی در گروه فعال کمتر از گروه غیرفعال بود. این یافته‌ها با

می‌کند. در بیماران MS، بی‌حرکی منجر به آتروفی عضلانی و کاهش کارایی متابولیکی عضلات می‌شود (۳۳). (۳۴). تمرینات منظم، همان‌طور که در گروه MS فعال مشاهده شد، با افزایش خون‌رسانی و اکسیژن‌رسانی به عضلات، متابولیسم را بهبود می‌بخشد و خستگی عضلانی را کاهش می‌دهد (۳۵). این سازگاری‌ها می‌توانند توضیح‌دهنده کاهش فعالیت الکتریکی عضلات در گروه فعال باشند، زیرا عضلات کارآمدتر نیروی موردنیاز برای راه رفتن را تولید می‌کنند و نیاز به فعال‌سازی بیش‌ازحد واحدهای حرکتی کاهش می‌یابد. از منظر نوروفیزیولوژیکی، کاهش فعالیت الکتریکی در گروه MS فعال ممکن است به بهبود فرآیندهای مهاری و تسهیل‌کننده در CNS مرتبط باشد. در بیماران MS، تخریب میلین باعث افزایش زمان هدایت عصبی و کاهش هماهنگی بین سیگنال‌های قشر حرکتی و عضلات می‌شود (۳۶). تمرینات ورزشی منظم می‌توانند با تقویت پلاستیسیته عصبی و بهبود هماهنگی سیناپسی، کارایی هدایت عصبی را افزایش دهند. نشان داد شده است فعالیت بدنی منظم در بیماران MS با بهبود پردازش عصبی و کاهش هزینه انرژی حرکتی مرتبط است (۳۷، ۳۸). این امر می‌تواند توضیح دهد که چرا گروه فعال در پژوهش حاضر با فعالیت الکتریکی کمتر، عملکرد حرکتی مشابه یا بهتری نسبت به گروه غیرفعال داشتند. علاوه بر این، کاهش هم‌انقباضی<sup>۱</sup> غیرضروری عضلات در گروه فعال، که ممکن است نتیجه بهینه‌سازی الگوهای حرکتی باشد، به کاهش مصرف انرژی و افزایش کارایی حرکتی کمک کرده است. در مقابل، گروه غیرفعال به دلیل بی‌حرکی با آتروفی عضلانی و کاهش کارایی متابولیکی مواجه بودند، که منجر به افزایش فعالیت الکتریکی برای جبران ضعف عضلانی و ناکارآمدی عصبی-عضلانی می‌شود. این موضوع با یافته‌های Dalgas و همکاران (۲۰۱۰)

دلیل تعداد کم آزمودنی‌ها (۷ نفر) و ضعف آماری بود (۳۲). برای تحلیل عمیق‌تر این یافته‌ها، می‌توان از مدل کنترل حرکتی CNS استفاده کرد. این مدل بیان می‌کند که CNS از طریق هماهنگی و تنظیم الگوهای حرکتی، نقش کلیدی در کنترل عضلات و بهبود عملکرد حرکتی ایفا می‌کند. در بیماران MS، تخریب میلین در مسیرهای عصبی منجر به کاهش نرخ شلیک واحدهای حرکتی، اختلال در استخدام واحدهای حرکتی و افزایش زمان هدایت حرکتی مرکزی می‌شود (۹). این اختلالات باعث ناکارآمدی در الگوهای انقباضی عضلات و افزایش EMG برای انجام حرکات مشابه در مقایسه با افراد سالم می‌شوند. یافته پژوهش حاضر که نشان‌دهنده کاهش فعالیت الکتریکی عضلات در گروه MS فعال است، می‌تواند به بهبود کارایی عصبی-عضلانی ناشی از تمرینات ورزشی منظم نسبت داده شود. تمرینات مقاومتی و فعالیت‌های بدنی مانند پیلاتس و یوگا، از طریق تقویت مسیرهای عصبی-عضلانی و بهبود هماهنگی بین عضلات آگونیست و آنتاگونیست، به بهینه‌سازی الگوهای کنترل حرکتی کمک می‌کنند. این امر منجر به کاهش نیاز به فعالیت الکتریکی بیش‌ازحد برای تولید نیروی مشابه در حین راه رفتن می‌شود، که نشان‌دهنده کارایی بالاتر سیستم عصبی-عضلانی در گروه فعال است (۱۸). علاوه بر این، تئوری سازگاری عمومی Selye چارچوب مناسبی برای تبیین سازگاری‌های فیزیولوژیکی ناشی از فعالیت بدنی ارائه می‌دهد. بر اساس این تئوری، تمرینات ورزشی به‌عنوان یک استرس مثبت عمل کرده و با تحریک سازگاری‌های فیزیولوژیکی، مانند افزایش سطح مقطع تارهای عضلانی، بهبود توزیع نوع تارهای عضلانی (به‌ویژه تارهای نوع I مقاوم به خستگی) و تقویت فرآیندهای اتصال عصبی-عضلانی، به کاهش آتروفی عضلانی و بهبود عملکرد عضلات کمک

<sup>۱</sup>. Co-Contraction

همخوانی دارد که نشان دادند تمرینات مقاومتی می‌توانند آتروفی عضلانی را کاهش داده و عملکرد عضلانی را بهبود بخشند (۳۹). بنابراین، کاهش فعالیت الکتریکی در گروه فعال نه تنها نشان‌دهنده بهبود قدرت عضلانی است، بلکه بیانگر سازگاری‌های نوروفیزیولوژیکی در سطح CNS و عضلات محیطی است که به بهینه‌سازی الگوهای حرکتی و کاهش هزینه انرژی منجر شده است.

بیماران MS فعال در مقایسه با گروه غیرفعال، فعالیت الکتریکی کمتری در عضلات پلانتارفلکسور مچ پا نشان دادند. این کاهش به بهبود سازوکارهای انقباضی در عضلات اسکلتی نسبت داده می‌شود. در بیماری MS، اعصاب محیطی تحت تأثیر قرار نمی‌گیرند و پتانسیل‌های عمل در آکسون‌های محیطی بدون تغییر باقی می‌مانند (۴۰). با این حال، تخریب میلین در CNS هدایت سیگنال‌های حرکتی را مختل می‌کند. بر اساس مدل کنترل حرکتی CNS، تمرینات ورزشی منظم هماهنگی عصبی-عضلانی را بهبود می‌بخشند. این بهبود با تقویت پلاستیسیته عصبی و کاهش نیاز به شلیک بیش‌ازحد واحدهای حرکتی همراه است (۱۸). همچنین، تئوری سازگاری عمومی Selye توضیح می‌دهد که فعالیت بدنی به‌عنوان استرس مثبت، سطح مقطع تارهای عضلانی را افزایش داده و آتروفی عضلانی را کاهش می‌دهد. این سازگاری‌ها کارایی متابولیکی عضلات را بهبود می‌بخشند (۳۹). کاهش فعالیت الکتریکی در عضلات پلانتارفلکسور مچ پا در گروه MS فعال نشان‌دهنده کارایی بالاتر در راه رفتن است. بیماران فعال نیروی موردنیاز برای گام‌برداری را با فعالیت عضلانی کمتری تولید می‌کنند. این کارایی به بهینه‌سازی الگوهای حرکتی و کاهش هم‌انقباضی غیرضروری عضلات نسبت داده می‌شود. گیرنده‌های عمقی، مانند دوک‌های عضلانی (پایانه‌های نوع Ia و II)، بازخوردهای حسی را به نورون‌های حرکتی نخاعی

منتقل می‌کنند. این بازخوردها در بیماران فعال شلیک پتانسیل‌های عمل را کاهش می‌دهند و به هماهنگی بهتر عضلات کمک می‌کنند (۳۸). در مقابل، گروه غیرفعال به دلیل آتروفی عضلانی و ناکارآمدی عصبی-عضلانی، فعالیت الکتریکی بیشتری برای جبران ضعف تولید می‌کنند. این یافته با مطالعات داگلاس و همکاران (۲۶) و وایت و همکاران (۲۹) همخوانی دارد که بهبود قدرت عضلانی را در بیماران MS فعال گزارش کردند. تمرینات ورزشی منظم، مانند پیلاتس و یوگا، قدرت عضلات بازکننده زانو و کارایی حرکتی را در بیماران MS افزایش می‌دهند. این بهبود خطر سقوط را کاهش می‌دهد، زیرا نیروی پلانتارفلکسور مچ پا، که عامل کلیدی در نقص راه رفتن است، تقویت می‌شود (۴۰، ۴۱). کاهش فعالیت الکتریکی در بیماران فعال نشان‌دهنده کاهش هزینه انرژی در فعالیت‌های روزمره است. این امر کیفیت زندگی و استقلال عملکردی بیماران را بهبود می‌بخشد. پیشنهاد می‌شود برنامه‌های ورزشی طولانی‌مدت در توان‌بخشی بیماران MS گنجانده شود. مطالعات آینده می‌توانند اثر شدت‌های مختلف فعالیت (مانند فعالیت حداکثری) را بر الگوهای حرکتی و فعالیت عصبی-عضلانی بررسی کنند.

کنترل حرکتی طبیعی<sup>۱</sup> شامل فعال شدن هم‌زمان عضلات آگونیست و آنتاگونیست است. در طول راه رفتن، سفتی مفاصل و ثبات وضعیتی توسط تغییرات در نیروهای تولیدشده توسط انقباض هم‌زمان عضلات متضاد انجام تحتانی تنظیم می‌شود. با این حال، نقش عملکردی هم‌زمان فعال‌سازی نامشخص است. فعال‌سازی نامناسب (بیش‌ازحد و/یا طولانی‌مدت) عملکرد راه رفتن را با کاهش سرعت راه رفتن و افزایش هزینه متابولیک کاهش می‌دهد (۴۲). افزایش هم‌زمانی فعالیت عضلات آگونیست و آنتاگونیست در مفاصل زانو و/یا مچ پا در حین راه رفتن یک مشکل مکرر

1. Normal Motor Control

آزمون‌های طولانی‌تر و شدت بالاتر برای بررسی این آثار ضروری است.

به‌طور کلی از پژوهش حاضر می‌توان نتیجه گرفت که مشارکت درازمدت در فعالیت ورزشی باعث افزایش معنی‌دار در قدرت باز کردن زانو، کاهش معنی‌داری میانگین و بیشینه فعالیت الکتریکی عضلات افراد MS فعال شد. همچنین در گروه‌های پژوهش تفاوت معنی‌داری در هم‌انقباضی مشاهده نشد. به دلیل اثربخشی فعالیت‌های ورزشی بر بهبود عملکرد راه رفتن و هزینه انرژی کمتر، استفاده از فعالیت‌های ورزشی در بیماران مبتلا به MS ارجحیت دارد. همچنین، با توجه به نتایج و مستندات این‌طور به نظر می‌رسد که انجام بیشتر فعالیت‌های ورزشی می‌تواند مفید باشد. لذا به متخصصین، بیماران MS و طراحان برنامه‌ی تمرینی پیشنهاد می‌شود که برای افزایش بهبود مکانیک راه رفتن، حفظ تعادل، کاهش هزینه انرژی و کاهش علائم و عوارض افراد مبتلا به MS و همچنین به‌منظور بهره‌گیری از اثرات بهتر می‌توانند فعالیت ورزشی را برای این بیماران تجویز نمایند.

**تشکر و قدردانی:** پژوهش حاضر برگرفته از پایان‌نامه کارشناسی ارشد در رشته فیزیولوژی ورزشی مصوب گروه فیزیولوژی ورزشی دانشگاه مازندران است. بدین‌وسیله از همه افرادی که در پژوهش حاضر مشارکت داشتند، تشکر و قدردانی می‌شود.

**حامی مالی:** ندارد.

**تعارض منافع:** هیچ‌گونه تعارض منافی وجود ندارد.

در بیماران مبتلا به ضایعات سیستم عصبی مرکزی ناشی از فلج مغزی، بیماری پارکینسون و آتاکسی مخچه است (۴۳). اگرچه الگوهای هم فعال‌سازی بین این آسیب‌شناسی‌ها متفاوت است، اما پیامدهای آن مشابه است. فعال شدن بیش‌ازحد هم‌زمان عضلات مچ پا در ناحیه کمتر تحت تأثیر (LA)، اندام تحتانی در طول فاز حمایت مضاعف (DS)، اولیه و حمایت مضاعف نهایی، در بیماران مبتلا به همی‌پارزی گزارش شده است. به‌نظر می‌رسد که این نشان‌دهنده یک استراتژی انطباقی و جبرانی برای اطمینان از ثبات وضعیتی، علی‌رغم از دست دادن هم‌فعال‌سازی در اندام تحتانی که بیشتر تحت تأثیر قرار گرفته است، منعکس می‌کند (۴۴).

در مطالعه حاضر هم‌انقباضی بیماران MS فعال نسبت به MS غیرفعال تفاوت نداشت. این نتایج نشان می‌دهد احتمالاً برای اینکه تعادل این بیماران به هم نخورد از این مکانسیم جبرانی در حین راه رفتن استفاده می‌کنند که موجب افزایش هزینه انرژی و زود خسته شدن آن‌ها می‌شود. همچنین معنی‌دار نبودن تفاوت گروه‌ها نسبت به هم ممکن است به این دلیل باشد که بیماران در مرحله اولیه بیماری قرار داشتند. همچنین احتمالاً دلیل دیگر این است که در مطالعه حاضر آزمون در طول یک عمل گام برداری انجام شد. شاید اگر این آزمون در طول دو یا سه گام یا حتی بیشتر اجرا می‌شد نتایج دیگری به دست می‌آمد. از سوی دیگر خستگی نامعمول در این بیماران عاملی است که می‌تواند هم‌انقباضی را تشدید کند. در مطالعه حاضر انجام یک گام نمی‌توانسته است موجب تولید خستگی شود. به همین دلیل بهتر است آزمون‌های طولانی‌مدت مثل ۶ متر راه رفتن برای افراد MS فعال و غیرفعال انجام شده و ثبت هم‌زمان EMG صورت گیرد. مطالعات بیشتر با

## References

1. Nociti V, Romozzi M, Prosperini L, Clerici VT, Ragonese P, Gallo A, et al. Effect of autoimmune comorbidities on multiple sclerosis course: An observational multicenter study. *European Journal of Neurology*. 2025;32(1):e70019.
2. Investigators CT. Alemtuzumab vs. interferon beta-1a in early multiple sclerosis. *New England Journal of Medicine*. 2008;359(17):1786-801.
3. Dressendorfer R, Matlick D, Palmer E, Council RO. Fibromyalgia and Exercise. *Cinahl Information Systems*. 2016;1(1):1-12.
4. Pearson M, Dieberg G, Smart N. Exercise as a therapy for improvement of walking ability in adults with multiple sclerosis: a meta-analysis. *Archives of physical medicine and rehabilitation*. 2015;96(7):1339-48. e7.
5. Deckx N, Wens I, Nuyts AH, Hens N, De Winter BY, Koppen G, et al. 12 weeks of combined endurance and resistance training reduces innate markers of inflammation in a randomized controlled clinical trial in patients with multiple sclerosis. *Mediators of inflammation*. 2016;2016.
6. Attarian HP, Brown KM, Duntley SP, Carter JD, Cross AH. The relationship of sleep disturbances and fatigue in multiple sclerosis. *Archives of neurology*. 2004;61(4):525-8.
7. Annovazzi P, Tomassini V, Bodini B, Boffa L, Calabrese M, Cocco E, et al. A cross-sectional, multicentre study of the therapeutic management of multiple sclerosis relapses in Italy. *Neurological Sciences*. 2013;34(2):197-203.
8. Scott SM, Hughes AR, Galloway SD, Hunter AM. Surface EMG characteristics of people with multiple sclerosis during static contractions of the knee extensors. *Clinical physiology and functional imaging*. 2011;31(1):11-7.
9. Garner DJ, Widrick JJ. Cross-bridge mechanisms of muscle weakness in multiple sclerosis. *Muscle & Nerve: Official Journal of the American Association of Electrodiagnostic Medicine*. 2003;27(4):456-64.
10. Kjølhede T, Vissing K, de Place L, Pedersen BG, Ringgaard S, Stenager E, et al. Neuromuscular adaptations to long-term progressive resistance training translates to improved functional capacity for people with multiple sclerosis and is maintained at follow-up. *Multiple Sclerosis Journal*. 2015;21(5):599-611.
11. Chung LH, Remelius JG, Van Emmerik R, Kent-Braun JA. Leg power asymmetry and postural control in women with multiple sclerosis. *Medicine and science in sports and exercise*. 2008;40(10):1717-24.
12. D'Amico E, Haase R, Ziemssen T. Patient-reported outcomes in multiple sclerosis care. *Multiple sclerosis and related disorders*. 2019;33:61-6.

13. Hansen S, Hansen N, Christensen L, Petersen N, Nielsen J. Coupling of antagonistic ankle muscles during co-contraction in humans. *Experimental brain research*. 2002;146(3):282-92.
14. Moura J, Rocchi L, Zandi M, Balint B, Bhatia KP, Latorre A. Neurophysiological Insights into the Pathophysiology of Stiff-Person Spectrum Disorders. *Movement Disorders Clinical Practice*. 2025.
15. Latash ML. *Neurophysiological basis of movement: Human Kinetics*; 2008.
16. Learmonth YC, Paul L, McFadyen AK, Marshall-McKenna R, Mattison P, Miller L, et al. Short-term effect of aerobic exercise on symptoms in multiple sclerosis and chronic fatigue syndrome: a pilot study. *International journal of MS care*. 2014;16(2):76-82.
17. Nortvedt MW, Riise T, Maeland J. Multiple sclerosis and lifestyle factors: the Hordaland Health Study. *Neurological Sciences*. 2005;26(5):334-9.
18. Motl RW, McAuley E, Snook EM. Physical activity and multiple sclerosis: a meta-analysis. *Multiple Sclerosis Journal*. 2005;11(4):459-63.
19. talebi v, fallahmohammadi z, Saadat p, Hosseini Nejad SE. A Comparison of the Strength, Range of Motion and Balance in Active and Inactive Groups with Multiple Sclerosis. *Journal of Sport Biosciences*. 2020;12(3):263-76.
20. Cano-De-La-Cuerda R, Molero-Sánchez A, Carratalá-Tejada M, Alguacil-Diego I, Molina-Rueda F, Miangolarra-Page J, et al. Theories and control models and motor learning: clinical applications in neurorehabilitation. *Neurología (English Edition)*. 2015;30(1):32-41.
21. Fang P. General Adaptation Syndrome. *The ECPH Encyclopedia of Psychology: Springer*; 2025. p. 564-5.
22. Ovsianikova Y, Pokhilko D, Kerdyvar V, Krasnokutsky M, Kosolapov O. Peculiarities of the impact of stress on physical and psychological health. *Multidisciplinary Science Journal*. 2024;6.
23. Mannion A, Adams M, Cooper R, Dolan P. Prediction of maximal back muscle strength from indices of body mass and fat-free body mass. *Rheumatology (Oxford, England)*. 1999;38(7):652-5.
24. Lee D-K, Kim J-S, Kim T-H, Oh J-S. Comparison of the electromyographic activity of the tibialis anterior and gastrocnemius in stroke patients and healthy subjects during squat exercise. *Journal of physical therapy science*. 2015;27(1):247-9.
25. Cofré Lizama LE, Khan F, Lee PV, Galea MP. The use of laboratory gait analysis for understanding gait deterioration in people with multiple sclerosis. *Multiple Sclerosis Journal*. 2016;22(14):1768-76.

26. Dalgas U, Stenager E, Lund C, Rasmussen C, Petersen T, Sørensen H, et al. Neural drive increases following resistance training in patients with multiple sclerosis. *Journal of neurology*. 2013;260(7):1822-32.
27. DeBolt LS, McCubbin JA. The effects of home-based resistance exercise on balance, power, and mobility in adults with multiple sclerosis. *Archives of physical medicine and rehabilitation*. 2004;85(2):290-7.
28. Korkmaz NC, Kirdi N, Temucin CM, Armutlu K, Yakut Y, Karabudak R. Improvement of muscle strength and fatigue with high voltage pulsed galvanic stimulation in multiple sclerosis patients—a non-randomized controlled trial. *JPMA-Journal of the Pakistan Medical Association*. 2011;61(8):736.
29. White L, McCoy S, Castellano V, Gutierrez G, Stevens J, Walter G, et al. Resistance training improves strength and functional capacity in persons with multiple sclerosis. *Multiple Sclerosis Journal*. 2004;10(6):668-74.
30. Hoseini S, Rajabi H. The effects of 8 weeks home-based yoga and resistance training on the power of leg extensors, motor capacity and balance in patient with multiple sclerosis: MA Thesis of Physical Education an Science Faculty of KHarazmi University ...; 2012.
31. Harvey L, Smith AD, Jones R. The effect of weighted leg raises on quadriceps strength, EMG parameters and functional activities in people with multiple sclerosis. *Physiotherapy*. 1999;85(3):154-61.
32. Dodd KJ, Taylor N, Shields N, Prasad D, McDonald E, Gillon A. Progressive resistance training did not improve walking but can improve muscle performance, quality of life and fatigue in adults with multiple sclerosis: a randomized controlled trial. *Multiple Sclerosis Journal*. 2011;17(11):1362-74.
33. Yin L, Li N, Jia W, Wang N, Liang M, Yang X, et al. Skeletal muscle atrophy: From mechanisms to treatments. *Pharmacological Research*. 2021;172:105807.
34. Sartori R, Romanello V, Sandri M. Mechanisms of muscle atrophy and hypertrophy: Implications in health and disease. *Nature communications*. 2021;12(1):1-12.
35. Tofighi A, Saki Y, Razmjoo K. Effect of 12-week progressive resistance training on balance, fatigue and disability in women with MS. *Jundishapur Scientific Medical Journal*. 2013;12(2):159-67.
36. Thruue C, Hvid LG, Diechmann M, Gaemelke T, Stenager E, Dalgas U, et al. Early phase multiple sclerosis patients present substantial deficits in physical-, cognitive-, and patient-reported outcomes compared to matched healthy controls. *Neurorehabilitation and Neural Repair*. 2025;39(5):377-85.

37. Motl RW, Sandroff BM, Benedict RH, Aldunate R, Cutter G, Barron E. Internet-delivered lifestyle physical activity intervention for cognitive processing speed in multiple sclerosis. *Contemporary clinical trials*. 2024;138:107446.
38. Sandroff BM, Dlugonski D, Pilutti LA, Pula JH, Benedict RH, Motl RW. Physical activity is associated with cognitive processing speed in persons with multiple sclerosis. *Multiple Sclerosis and Related Disorders*. 2014;3(1):123-8.
39. Dalgas U, Stenager E, Jakobsen J, Petersen T, Hansen HJ, Knudsen C, et al. Resistance training improves muscle strength and functional capacity in multiple sclerosis. *Neurology*. 2009;73(18):1478-84.
40. Davies BL, Hoffman RM, Kurz MJ. Individuals with multiple sclerosis redistribute positive mechanical work from the ankle to the hip during walking. *Gait & posture*. 2016;49:329-33.
41. Peebles AT, Reinholdt A, Bruetsch AP, Lynch SG, Huisinga JM. Dynamic margin of stability during gait is altered in persons with multiple sclerosis. *Journal of biomechanics*. 2016;49(16):3949-55.
42. Peterson DS, Martin PE. Effects of age and walking speed on coactivation and cost of walking in healthy adults. *Gait & posture*. 2010;31(3):355-9.
43. Mari S, Serrao M, Casali C, Conte C, Martino G, Ranavolo A, et al. Lower limb antagonist muscle co-activation and its relationship with gait parameters in cerebellar ataxia. *The Cerebellum*. 2014;13(2):226-36.
44. Lamontagne A, Richards CL, Malouin F. Coactivation during gait as an adaptive behavior after stroke. *Journal of Electromyography and Kinesiology*. 2000;10(6):407-15.