

Research Paper

Optimization of dynamic warm-up guided by wearable electromyography based on standard threshold of hamstring muscle activation and its relationship with anaerobic power and knee flexibility in professional soccer players

Shahin Riahi Malayeri ^{*1} , Reza Rostami ² 

1. Associate Professor, Department of Sport Physiology, Faculty of Physical Education and Sport Sciences, Tehran East branch, Islamic Azad University, Tehran, Iran.

2. Phd of sport physiology, Department of Sport Physiology, Faculty of Physical Education and Sport Sciences, Tehran East branch, Islamic Azad University, Tehran, Iran.



Citation: Riahi Malayeri Sh, Rostami R. Optimization of dynamic warm-up guided by wearable electromyography based on standard threshold of hamstring muscle activation and its relationship with anaerobic power and knee flexibility in professional soccer players. (In Persian). *Journal of Biomechanics and technology in sport*. 2026;1(1):[88-104].

 doi: [10.22103/jbts.2026.26513.1012](https://doi.org/10.22103/jbts.2026.26513.1012)

Keywords

Anaerobic power
Dynamic warm-up
H/Q Ratio
Knee flexibility
Professional soccer player
EMG

ABSTRACT

Introduction: Hamstring injuries are one of the most common problems in soccer, mainly caused by inadequate warm-up and lack of optimal muscle activation. Recent studies have shown that dynamic warm-ups can improve anaerobic performance and muscle flexibility, but little is known about the use of wearable EMG technologies to personalize warm-ups in real time. The aim of this study was to investigate the effect of dynamic warm-up guided by real-time wearable EMG data on hamstring to quadriceps activation ratio (H/Q), anaerobic power, and knee flexion angle in professional soccer players.

Method: The study was conducted as a within-group crossover design on 25 professional male soccer players. Each player underwent two warm-up protocols in two separate sessions, 72 hours apart: 1) a standard club warm-up, 2) a personalized dynamic warm-up based on real-time EMG data. H/Q ratio was measured using wearable EMG, anaerobic power was measured using the 30-second Wingate test, and knee flexibility was measured using the Active Knee Extension test.

Results: The results showed that personalized EMG-based dynamic warm-up significantly increased H/Q ratio and anaerobic power compared to standard warm-up ($p < 0.001$). The AKE angle also increased after this protocol, indicating a relative reduction in hamstring range of motion. Overall, EMG-guided warm-up was more effective than standard warm-up in optimizing muscle activation and some performance indicators.

Conclusion: Personalized EMG-based dynamic warm-up was more effective than standard warm-up in improving muscle activation and some performance indicators such as H/Q ratio and anaerobic power.

Received: 2025/12/13

Accepted: 2026/04/13

Available Online: 2026/04/19

*Corresponding Author

Shahin Riahi Malayeri, Associate Professor
Address: Department of Sport Physiology, Faculty of Physical Education and Sport Sciences, Tehran East branch, Islamic Azad University, Tehran, Iran.
Email: Shahinriyahi@yahoo.com

Extended Abstract

Introduction

In the landscape of modern professional athletics, the distinction between peak performance and injury susceptibility often resides in the quality of pre-activity preparation. Warm-up protocols are fundamentally designed to elevate core temperature, enhance neural transmission, and prepare the musculoskeletal system for the stresses of competition. In high-intensity sports, specifically football, athletes are frequently subjected to explosive movements, such as rapid acceleration, deceleration, and pivoting, which place significant mechanical and neural demands on the hamstring and quadriceps muscle groups. A central challenge in sports science is the optimization of the Hamstring-to-Quadriceps (H/Q) activation ratio, which serves as a critical indicator of knee joint stability and neuromuscular balance. Conventional warm-up strategies are typically standardized—relying on generic time-based durations and non-specific movements—which often fail to account for the unique neuromuscular fatigue levels or individual activation deficits of the athlete. Furthermore, the lack of real-time objective feedback means athletes often initiate high-intensity activity without achieving the necessary muscular “readiness.” This study addresses these limitations by evaluating the efficacy of a wearable electromyography (EMG)-guided dynamic warm-up protocol. The overarching aim is to transition from traditional “one-size-fits-all” approaches to data-driven, personalized protocols that optimize neuromuscular engagement and potentially mitigate the risk of soft tissue injuries.

Methods

The study utilized a comparative experimental design to evaluate the superiority of an EMG-guided warm-up against standard protocols. A sample of professional athletes participated in the study, undergoing two distinct protocols in a counterbalanced order to eliminate order effects. The Conventional Warm-up (CW) group adhered to a standard regimen comprising 10 minutes of light jogging, dynamic stretching exercises, and 5 minutes of general activation drills. In contrast, the EMG-Guided Warm-up (EGW) group utilized wireless, wearable surface EMG sensors positioned on the biceps femoris. The EGW protocol involved 10–12 minutes of targeted neuromuscular exercises (including lunges, squats, and plyometric jumps). Crucially, the participants received real-time visual feedback via a mobile application, calibrated to ensure their hamstring activation reached and maintained at least 80% of their established Maximum Voluntary Contraction (MVC).

Data were processed using SPSS (version 28). The statistical analysis employed paired-sample t-tests to quantify differences between the two conditions across three primary dependent variables: the H/Q activation ratio, anaerobic power output (measured in Watts via jump tests), and the Active Knee Extension (AKE) angle as a measure of functional flexibility. Effect sizes (Cohen’s *d*) were calculated to determine the magnitude of the differences.

The study utilized a comparative experimental design to evaluate the superiority of an EMG-guided warm-up against standard protocols. A sample of professional athletes participated in the study, undergoing two distinct protocols in a counterbalanced order to eliminate order effects. The Conventional Warm-up (CW) group adhered to a standard regimen comprising 10 minutes of light jogging, dynamic stretching exercises, and 5 minutes of general activation drills. In contrast, the EMG-Guided Warm-up (EGW) group utilized wireless, wearable surface EMG sensors positioned on the biceps femoris. The EGW protocol involved 10–12 minutes of targeted neuromuscular exercises (including lunges, squats, and plyometric jumps). Crucially, the participants received real-time visual feedback via a mobile application, calibrated to ensure their hamstring activation reached and maintained at least 80% of their established Maximum Voluntary Contraction (MVC).

Data were processed using SPSS (version 28). The statistical analysis employed paired-sample t-tests to quantify differences between the two conditions across three primary dependent variables: the H/Q

activation ratio, anaerobic power output (measured in Watts via jump tests), and the Active Knee Extension (AKE) angle as a measure of functional flexibility. Effect sizes (Cohen's d) were calculated to determine the magnitude of the differences.

Results

The empirical findings reveal a statistically significant improvement in all measured indices following the EMG-guided protocol compared to the conventional approach. Regarding neuromuscular coordination, the H/Q ratio was notably higher in the EGW group (0.70 ± 0.04) versus the CW group (0.55 ± 0.05), yielding a substantial effect size ($d=1.85$). This suggests that the real-time feedback loop enabled athletes to achieve a more balanced synergistic interaction between the hamstring and quadriceps, which is critical for joint stability.

Regarding functional performance, the EGW protocol elicited a significant enhancement in anaerobic power, with the EGW group demonstrating a mean output of 970 Watts compared to 925 Watts in the CW group ($d=0.85$). Furthermore, the assessment of functional range of motion, quantified by the Active Knee Extension (AKE) angle, showed an average increase of 8 degrees in the EGW cohort ($d=1.42$). These data indicate that the EMG-guided approach does not merely prepare the muscle for power output but also optimizes the elastic and lengthening properties of the hamstrings, thereby increasing the range of motion under functional conditions.

Discussion

The findings of this study suggest that integrating wearable EMG technology into warm-up protocols can enhance neuromuscular preparation and improve performance-related outcomes in football players. The most important finding was the significant improvement in the H/Q ratio, indicating a more balanced activation pattern between the hamstring and quadriceps muscles. Such adaptations may contribute to a safer neuromuscular environment and potentially reduce the risk of hamstring injuries during high-intensity activities.

In addition, the observed improvements in anaerobic power and active knee extension angle demonstrate that EMG-guided warm-up protocols can effectively enhance motor unit recruitment and functional flexibility. These findings support the superiority of individualized, data-driven warm-up strategies over conventional approaches. Overall, wearable EMG feedback appears to be a practical tool for optimizing neuromuscular balance, power production, and flexibility, highlighting its potential application in performance enhancement and injury-prevention programs in competitive sports.

Ethical Considerations

Compliance with ethical guidelines

This study was carried out in accordance with established ethical standards and regulations for research involving human participants. Before enrollment, all participants received comprehensive information regarding the aims, methodology, and procedures of the study and voluntarily signed written informed consent forms. In addition, all necessary measures were taken to safeguard participants' health and welfare throughout the research process, and no foreseeable risks or harmful consequences were associated with participation.

Funding

No external financial support was obtained for this study. The research was conducted with the support of the Islamic Azad University, Tehran East Branch.

Authors' contributions

All authors made substantial and equal contributions to the conception and design of the study, data acquisition and analysis, interpretation of findings, and preparation of the manuscript.

Conflict of interest

The authors affirm that the study was performed without any commercial, financial, or other relationships that could be perceived as creating a potential conflict of interest.

مقاله پژوهشی

بهینه سازی گرم کردن پویا با هدایت الکترومایوگرافی پوشیدنی بر پایه آستانه استاندارد فعال سازی عضلات همسترینگ و ارتباط آن با توان بی هوازی و انعطاف پذیری زانو در فوتبالیست های حرفه ای

شاهین ریاحی ملایری*^۱ ID، رضا رستمی^۲ ID

۱. دانشیار گروه فیزیولوژی ورزشی، گروه تربیت بدنی و علوم ورزشی، واحد تهران شرق، دانشگاه آزاد اسلامی، تهران، ایران.

۲. دکتری فیزیولوژی ورزشی، گروه تربیت بدنی و علوم ورزشی، واحد تهران شرق، دانشگاه آزاد اسلامی، تهران، ایران.



Citation Citation: Riahi Malayeri Sh, Rostami R. Optimization of dynamic warm-up guided by wearable electromyography based on standard threshold of hamstring muscle activation and its relationship with anaerobic power and knee flexibility in professional soccer players. (In Persian). *Journal of Biomechanics and technology in sport*. 2026;1(1):[88-104].

DOI doi: [10.22103/jbts.2026.26513.1012](https://doi.org/10.22103/jbts.2026.26513.1012)

چکیده

کلمات کلیدی:

انعطاف پذیری زانو

توان بی هوازی

گرم کردن پویا

الکترومایوگرافی

H/Q Ratio

فوتبالیست حرفه ای

مقدمه: آسیب های همسترینگ یکی از شایع ترین مشکلات در ورزش فوتبال محسوب می شوند که عمدتاً به دلیل گرم کردن ناکافی و عدم فعال سازی بهینه عضلات ایجاد می شوند. مطالعات اخیر نشان داده اند که گرم کردن پویا می تواند عملکرد بی هوازی و انعطاف پذیری عضلات را بهبود دهد، اما اطلاعات کمی درباره استفاده از فناوری های پوشیدنی EMG برای شخصی سازی گرم کردن در زمان واقعی وجود دارد. هدف این مطالعه بررسی تأثیر گرم کردن پویا با هدایت داده های بلادرنگ EMG پوشیدنی بر نسبت فعال سازی همسترینگ به چهارسر ران (H/Q)، توان بی هوازی و زاویه فلکشن زانو در فوتبالیست های حرفه ای بود.

روش پژوهش: مطالعه به صورت طرح درون گروهی متقاطع بر روی ۲۵ فوتبالیست مرد حرفه ای انجام شد. هر بازیکن در دو جلسه مجزا، با فاصله ۷۲ ساعت، تحت دو پروتکل گرم کردن قرار گرفت: (۱) گرم کردن استاندارد باشگاه، (۲) گرم کردن پویا شخصی سازی شده بر اساس داده های بلادرنگ EMG. نسبت H/Q با استفاده از EMG پوشیدنی، توان بی هوازی با آزمون وینگیت ۳۰ ثانیه ای و انعطاف پذیری زانو با تست کشش فعال پا (Active Knee Extension) اندازه گیری شد.

یافته ها: نتایج نشان داد گرم کردن پویا شخصی سازی شده مبتنی بر EMG در مقایسه با گرم کردن استاندارد، موجب افزایش معنادار نسبت H/Q و توان بی هوازی شد ($p < 0.001$). همچنین زاویه AKE پس از این پروتکل افزایش یافت که بیانگر کاهش نسبی دامنه حرکتی همسترینگ است. در مجموع، گرم کردن هدایت شده با EMG در بهینه سازی فعال سازی عضلانی و برخی شاخص های عملکردی مؤثرتر از گرم کردن استاندارد بود.

نتیجه گیری: گرم کردن پویا شخصی سازی شده مبتنی بر EMG نسبت به گرم کردن استاندارد در بهبود فعال سازی عضلانی و برخی شاخص های عملکردی مانند نسبت H/Q و توان بی هوازی مؤثرتر بود.

تاریخ دریافت: ۱۴۰۴/۰۹/۲۲

تاریخ پذیرش: ۱۴۰۵/۰۱/۲۴

تاریخ انتشار: ۱۴۰۵/۰۱/۳۰

*نویسنده مسئول:

شاهین ریاحی ملایری، دانشیار فیزیولوژی ورزشی

آدرس: گروه تربیت بدنی و علوم ورزشی، واحد تهران شرق، دانشگاه آزاد اسلامی، تهران، ایران.

پست الکترونیکی: Shahinriyahi@yahoo.com

مقدمه

گرم کردن ورزشی یکی از مؤلفه‌های اساسی آماده‌سازی پیش از فعالیت در ورزش‌های حرفه‌ای است و نقش مهمی در بهبود عملکرد عصبی-عضلانی، افزایش دمای عضله، کاهش ریسک آسیب و ارتقای ظرفیت حرکتی ورزشکاران ایفا می‌کند (۱،۲). در فوتبال حرفه‌ای، ماهیت انفجاری حرکات شامل دویدن‌های سرعتی، شتاب‌گیری ناگهانی، تغییر جهت‌های سریع و حرکات اکستنسوری-فلکسیونی مکرر، فشار زیادی بر عضلات همسترینگ و چهارسر ران وارد می‌کند و عدم آماده‌سازی بهینه این عضلات می‌تواند احتمال آسیب را افزایش دهد (۳،۴). مطالعات اپیدمیولوژیک نشان داده‌اند که آسیب‌های همسترینگ همچنان یکی از شایع‌ترین آسیب‌ها در فوتبال حرفه‌ای هستند و بخشی از این آسیب‌ها با گرم کردن ناکافی یا فعال‌سازی نامناسب عضلات مرتبط دانسته شده‌اند (۵،۶).

یکی از شاخص‌های مهم در ارزیابی تعادل عملکردی و کنترل عصبی-عضلانی اندام تحتانی، نسبت فعال‌سازی همسترینگ به چهارسر ران (H/Q Ratio) است که ارتباط آن با پیشگیری از آسیب، پایداری عملکردی و الگوهای حرکتی ایمن در مطالعات مختلف گزارش شده است (۷،۸). افزایش H/Q Ratio در شرایط عملکردی مناسب می‌تواند با کاهش بار مکانیکی بر ساختارهای پاسیو و کاهش خطر آسیب همسترینگ مرتبط باشد. با این حال، بخش قابل توجهی از پروتکل‌های گرم کردن در محیط‌های ورزشی به‌صورت استاندارد و یکسان برای تمام ورزشکاران اجرا می‌شوند و تفاوت‌های فردی در سطح فعال‌سازی عضلات، الگوهای حرکتی و پاسخ‌های عصبی-عضلانی در آن‌ها لحاظ نمی‌شود (۷).

از سوی دیگر، توان بی‌هوازی یکی از شاخص‌های کلیدی عملکرد کوتاه‌مدت و انفجاری در فوتبال است و به وضعیت آماده‌سازی عصبی-عضلانی پیش از فعالیت وابسته است. شواهد نشان می‌دهد که گرم کردن پویا می‌تواند از طریق افزایش دمای عضله، بهبود تحریک‌پذیری عصبی و تسهیل الگوهای حرکتی، به ارتقای توان بی‌هوازی کمک کند (۱۰،۱۱). با این حال، اثرات گرم کردن‌های عمومی ممکن است در همه ورزشکاران یکسان نباشد و پاسخ‌های عملکردی می‌تواند به الگوی واقعی فعال‌سازی عضلات وابسته باشد (۹). از این رو، شخصی‌سازی گرم کردن بر اساس بازخورد واقعی عضلانی می‌تواند رویکردی کارآمدتر نسبت به روش‌های سنتی محسوب شود.

همچنین انعطاف‌پذیری عملکردی همسترینگ و دامنه حرکتی مفصل زانو نیز نقش مهمی در پیشگیری از آسیب و بهینه‌سازی عملکرد حرکتی دارد. تست کشش فعال پا (Active Knee Extension; AKE) به‌عنوان شاخص معتبر سفتی عملکردی همسترینگ معرفی شده است و تغییرات آن می‌تواند بازتابی از وضعیت کنترل عصبی-عضلانی و خصوصیات بافتی باشد (۱۲،۱۳). انتظار می‌رود که گرم کردن هدفمند و فعال‌سازی اختصاصی عضلات، با کاهش تنش غیرفعال و بهبود کنترل حرکتی، به افزایش دامنه حرکتی و انعطاف‌پذیری کمک کند؛ اما شواهد تجربی درباره نقش گرم کردن مبتنی بر بازخورد EMG بر این شاخص محدود است.

پیشرفت اخیر فناوری‌های پوشیدنی، به‌ویژه الکترومایوگرافی سطحی پوشیدنی (Wearable EMG)، امکان پایش فعال‌سازی عضلات در زمان واقعی و ارائه بازخورد فوری به ورزشکار و مربی را فراهم کرده است (۱۴،۱۵). چنین رویکردی این قابلیت

را دارد که فرآیند گرم کردن را از یک الگوی عمومی و یکسان به یک فرآیند شخصی سازی شده و مبتنی بر داده‌های واقعی فعال سازی عضلات تبدیل کند و در نتیجه، سازگاری عصبی-عضلانی مطلوب تری ایجاد شود. با وجود این مزایا، هنوز مشخص نیست که آیا هدایت گرم کردن بر پایه بازخورد بلادرنگ EMG می‌تواند به طور هم‌زمان موجب بهبود نسبت H/Q، ارتقای توان بی‌هوازی و افزایش انعطاف پذیری زانو در فوتبالیست‌های حرفه‌ای شود محدود است و این موضوع به‌عنوان یک شکاف پژوهشی قابل توجه مطرح می‌شود.

بر این اساس، مطالعه حاضر با هدف بررسی تأثیر گرم کردن پویا هدایت شده توسط EMG پوشیدنی بر نسبت فعال سازی H/Q، توان بی‌هوازی و زاویه فلکشن زانو در تست AKE در فوتبالیست‌های حرفه‌ای انجام شد. در چارچوب این مطالعه، فرض بر این بود که استفاده از بازخورد لحظه‌ای EMG در فرآیند گرم کردن می‌تواند نسبت به روش گرم کردن استاندارد، موجب ارتقای تعادل عملکردی بین عضلات همسترینگ و چهارسر ران، بهبود شاخص‌های توان بی‌هوازی و افزایش انعطاف پذیری عملکردی مفصل زانو شود؛ به گونه‌ای که این بهبودها بازتابی از فعال سازی هدفمندتر عضلات و آماده سازی مؤثرتر سیستم عصبی-عضلانی پیش از فعالیت ورزشی باشد.

روش‌شناسی پژوهش

شرکت‌کنندگان

این پژوهش از نوع نیمه تجربی با طرح متقاطع درون گروهی (Cross-Over) بود که در آن شرکت‌کنندگان هر دو پروتکل گرم کردن را در جلسات مجزا تجربه کردند. جامعه هدف این پژوهش شامل فوتبالیست‌های مرد حرفه‌ای لیگ برتر کشور با حداقل ۳ سال سابقه بازی حرفه‌ای بود. حجم نمونه مورد نیاز با استفاده از نرم‌افزار G*Power محاسبه شد. با در نظر گرفتن سطح معناداری ($\alpha=0.05$)، توان آماری ($1-\beta=0.80$) و اندازه اثر مورد انتظار ($d=0.60$) که بر اساس مطالعات پیشین در حوزه نسبت فعال سازی عضلات همسترینگ-چهارسر و تأثیر مداخلات گرم کردن پویا بر شاخص‌های الکترومایوگرافی برآورد شده بود، حداقل حجم نمونه مورد نیاز ۲۴ نفر تعیین شد. به منظور جبران احتمال ریزش آزمودنی‌ها و داده‌های ناقص، ۲۵ فوتبالیست مرد حرفه‌ای به روش نمونه‌گیری در دسترس (Convenience Sampling) انتخاب و در پژوهش شرکت داده شدند. میانگین و انحراف معیار سن، قد و وزن آزمودنی‌ها به ترتیب ۲۳.۴ ± ۲.۵ سال، ۱۷۷.۸ ± ۶.۲ سانتی‌متر و ۷۲.۵ ± ۵.۸ کیلوگرم بود (۳۲، ۳۳).

از نظر ویژگی‌های ورزشی، میانگین سابقه حضور حرفه‌ای بازیکنان $۵/۲ \pm ۱/۸$ سال بود. توزیع موقعیت بازی شرکت‌کنندگان شامل ۸ مدافع، ۹ هافبک و ۸ مهاجم بود. سوابق پزشکی نشان داد که هیچ‌یک از شرکت‌کنندگان سابقه پارگی شدید همسترینگ در یک سال گذشته نداشتند و تنها سه نفر دارای سابقه کشیدگی خفیف همسترینگ بودند که به طور کامل بهبود یافته بود. بازیکنان به طور میانگین ۵ ± ۱ جلسه تمرین در هفته داشتند و هر جلسه تمرینی بین ۹۰ تا ۱۱۰ دقیقه طول می‌کشید، که به طور متوسط معادل ۵ تا ۹ ساعت تمرین در هفته بود.

معیارهای ورود شامل عدم آسیب شدید در ۶ ماه گذشته، توانایی کامل اجرای حرکات پرشی و کسب رضایت کتبی بود. بازیکنان دارای آسیب‌های مزمن، سابقه جراحی همسترینگ یا زانو و بیماری‌های سیستم عصبی یا عضلانی از مطالعه مستثنی شدند.

پیش از آغاز مطالعه، اهداف و مراحل اجرای پژوهش به صورت کامل برای شرکت کنندگان توضیح داده شد، همه مراحل مطالعه با رعایت اخلاق پژوهش انجام شد و رضایت آگاهانه کتبی از تمامی ورزشکاران دریافت شد. همچنین، پروتکل تمرینی و اندازه‌گیری‌ها تمامی آزمون‌ها با رعایت استانداردهای اخلاق پژوهش و براساس اصول بیانیه هلسینکی انجام شد. این بیانیه که چارچوبی اخلاقی برای تحقیقات پزشکی و علوم سلامت ارائه می‌دهد، بر رضایت آگاهانه، حفظ حریم خصوصی، حفظ کرامت و ایمنی شرکت کنندگان و امکان خروج آزادانه از مطالعه تأکید دارد.

ابزار

برای جمع‌آوری داده‌ها از تجهیزات زیر استفاده شد:

۱. EMG پوشیدنی: حسگرهای سطحی EMG بی‌سیم (Wireless EMG) برای ثبت فعالیت عضلات همسترینگ و چهارسر ران استفاده شد. پایایی و روایی این دستگاه در مطالعات پیشین بالای ۹۰٪ گزارش شده است [۱۷، ۱۸]. سیگنال‌های خام EMG با نرخ نمونه‌برداری ۱۰۰۰ هرتز ثبت شدند و پس از حذف نویز حرکتی، با فیلتر میان‌گذر ۲۰-۴۵۰ هرتز و فیلتر ناچ ۵۰ هرتز پردازش شدند. سپس سیگنال‌ها تمام‌موج خطی‌سازی شده و میانگین مربعات (RMS) آن‌ها با پنجره زمانی ۱۰۰ میلی‌ثانیه محاسبه گردید. برای نرمال‌سازی، مقادیر RMS هر عضله بر حسب درصد حداکثر انقباض ارادی (MVC) بیان شد MVC. برای همسترینگ و چهارسر در وضعیت ایزومتریک استاندارد و طی سه تلاش بیشینه ثبت گردید و بیشترین مقدار به عنوان مبنا در نظر گرفته شد.
- نسبت فعال‌سازی همسترینگ به چهارسر ران (H/Q Ratio) در این مطالعه بر اساس ۱۵ داده‌های الکترومایوگرافی سطحی (EMG) محاسبه شد و بیانگر نسبت فعال‌سازی عضلانی است، نه نسبت گشتاور ایزوکتینیک. برای این منظور، مقدار RMS نرمال‌شده عضلات همسترینگ بر مقدار RMS نرمال‌شده عضلات چهارسر ران در فاز هدف تمرینات گرم کردن تقسیم شد. میانگین سه تکرار معتبر به عنوان مقدار نهایی نسبت فعال‌سازی (EMG-based H/Q activation ratio) گزارش گردید. پردازش و تحلیل سیگنال‌های EMG با استفاده از نرم‌افزار MATLAB انجام شد. [۱۳، ۱۴، ۲۸].
۲. آزمون وینگیت ۳۰ ثانیه‌ای: توان بی‌هوایی ورزشکاران با دوچرخه بی‌هوایی (Cycle Ergometer) اندازه‌گیری شد. شاخص‌های قدرت متوسط و اوج توان ثبت شد. پایایی آزمون طبق مطالعات قبلی ۰.۹۲ گزارش شده است [۱۹].
۳. تست کشش فعال پا: (Active Knee Extension Test) زاویه فلکشن زانو به عنوان شاخص انعطاف‌پذیری و سفتی همسترینگ اندازه‌گیری شد. زاویه‌ها با زاویه‌سنج دیجیتال (goniometer) ثبت گردید. پایایی بین‌آزمون ۰.۹۰ و روایی نسبت به آزمون طلایی ۰.۸۸ گزارش شده است [۲۰].

تست AKE در وضعیت طاقباز انجام شد؛ به طوری که لگن در زاویه ۹۰ درجه فلکشن قرار گرفت و اندام تحتانی مقابل در وضعیت اکستنشن کامل و بدون حرکت بر روی تخت ثابت نگه داشته شد. برای جلوگیری از چرخش یا جابه‌جایی لگن، از کمربند ثابت‌کننده در ناحیه خار خاصره قدامی فوقانی استفاده شد و ارزیاب در طول آزمون، ثبات لگن را کنترل نمود [۳۴]. شرکت‌کننده، زانوی اندام مورد آزمون را تا حد امکان به صورت فعال در جهت اکستنشن بالا آورد و در نقطه حداکثر دامنه بدون درد، زاویه زانو توسط گونیامتر دیجیتال دوشاخه ثبت شد. بازوی متحرک گونیامتر بر امتداد خط میانی ساق و بازوی ثابت بر امتداد استخوان ران هم‌راستا گردید. برای افزایش پایایی، هر اندازه‌گیری سه بار تکرار و میانگین آن به عنوان مقدار نهایی ثبت شد. در این پژوهش، زاویه AKE به صورت «زاویه باقی‌مانده تا اکستنشن کامل زانو» در نظر گرفته شد؛ بنابراین مقادیر بالاتر بیانگر محدودیت بیشتر در انعطاف‌پذیری همسترینگ و مقادیر کمتر نشان‌دهنده دامنه حرکتی مطلوب‌تر هستند.

روند اجرای پژوهش

هر بازیکن در دو جلسه مجزا، تحت دو پروتکل گرم کردن قرار گرفت. جلسه اول شامل گرم کردن استاندارد باشگاه بود که شامل ۱۰ دقیقه دویدن سبک، حرکات کششی پویا و پرش‌های ساده بود. جلسه دوم گرم کردن پویا شخصی‌سازی شده با EMG پوشیدنی بود. قبل از هر جلسه، بازیکنان ۵ دقیقه دویدن سبک انجام دادند تا دمای عضلات افزایش یابد و سپس سنسورهای EMG بر روی همسترینگ و چهارسر ران نصب گردید. داده‌های بلادرنگ به نرم‌افزار EMG منتقل شد و هدف فعال‌سازی ۸۰٪ حداکثر انقباض ارادی (MVC) برای همسترینگ تنظیم شد. مربی و نرم‌افزار بازخورد لحظه‌ای ارائه می‌کردند تا بازیکن حرکات را اصلاح کند تا سطح فعال‌سازی هدف محقق شود.

در هر جلسه، پس از گرم کردن، آزمون وینگیت ۳۰ ثانیه‌ای برای ارزیابی توان بی‌هوایی انجام شد. سپس تست کشش فعال پا اجرا شد تا زاویه فلکشن زانو در حداکثر کشش ثبت گردد. تمامی آزمون‌ها توسط همان ارزیاب انجام شد تا خطای بین‌ارزیاب کاهش یابد. فاصله بین دو جلسه ۷۲ ساعت در نظر گرفته شد تا اثر خستگی یا تمرین جلسه اول بر جلسه دوم محدود شود. بازیکنان دستورالعمل‌های استاندارد برای حفظ حالت استراحت عضلات، تغذیه و خواب دریافت کردند تا متغیرهای محیطی کنترل شوند.

برای کنترل اثر ترتیب اجرای جلسات، ترتیب قرارگیری شرکت‌کنندگان در دو پروتکل گرم کردن به صورت تصادفی و با روش تخصیص متوازن (Counter-balanced) تعیین شد؛ به طوری که نیمی از شرکت‌کنندگان ابتدا پروتکل استاندارد و سپس پروتکل EMG را اجرا کردند و نیم دیگر به صورت معکوس عمل نمودند. این روش با هدف کاهش اثرات احتمالی یادگیری، خستگی و سازگاری آزمون به کار گرفته شد [۳۱].

پروتکل مداخله گرم کردن:

۱. گرم کردن استاندارد باشگاه: شامل ۱۰ دقیقه دویدن سبک، حرکات کششی پویا برای عضلات پایین تنه (حرکات لانگز، اسکات‌های پویا و پرش‌های ساده) و ۵ دقیقه تمرینات فعال‌سازی عمومی عضلات همسترینگ و چهارسر ران.

۲. گرم کردن پویا با EMG پوشیدنی: شامل ۵ دقیقه دویدن سبک، نصب سنسورهای EMG، تنظیم هدف فعال‌سازی همسترینگ ۸۰٪ MVC، و ۱۰-۱۲ دقیقه تمرینات هدفمند با بازخورد لحظه‌ای برای رسیدن به سطح فعال‌سازی مشخص. تمرینات شامل لانگز، اسکات‌های پویا و پرش‌های هدفمند بود تا نسبت H/Q به سطح ایده‌آل برسد.

روش آماری

داده‌ها با نرم‌افزار SPSS نسخه ۲۸ تحلیل شد. ابتدا آمار توصیفی شامل میانگین و انحراف معیار برای تمامی متغیرها محاسبه شد. سپس آزمون t وابسته برای مقایسه دو پروتکل گرم کردن بر شاخص‌های H/Q، توان بی‌هوازی و زاویه فلکشن زانو استفاده شد. آزمون‌های نرمال بودن داده‌ها با استفاده از آزمون شاپیرو-ویلک بررسی شد. اندازه اثر (Cohen's d) برای سنجش قدرت تاثیر گرم کردن شخصی‌سازی شده محاسبه شد. سطح معناداری در تمام تحلیل‌ها ۰.۰۵ در نظر گرفته شد.

یافته‌ها

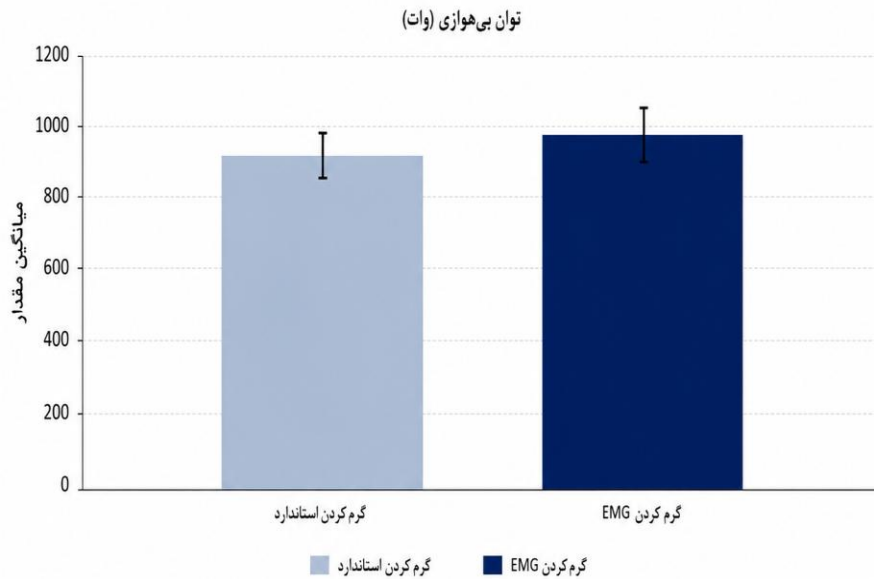
نتایج جدول ۱ نشان داد که گرم کردن مبتنی بر EMG در مقایسه با گرم کردن استاندارد موجب بهبود معنی‌دار تمامی متغیرهای مورد بررسی شد. نسبت همسترینگ به چهارسر ران (H/Q Ratio) در شرایط گرم کردن مبتنی بر EMG به طور معنی‌داری بیشتر از گرم کردن استاندارد بود (۰.۰۶±۰.۷۰ در مقابل ۰.۰۷±۰.۵۵؛ $t=9.21$ ، $p<0.001$). همچنین اندازه اثر بسیار بزرگ ($d=1.85$) بیانگر تأثیر قابل توجه این نوع گرم کردن بر بهبود تعادل عملکردی عضلات اطراف زانو است. در متغیر توان بی‌هوازی نیز میانگین توان تولیدی پس از گرم کردن مبتنی بر EMG به طور معنی‌داری بیشتر از گرم کردن استاندارد بود (۵۰±۹۷۰ وات در مقابل ۵۴±۹۲۵ وات؛ $t=4.32$ ، $p<0.001$). اندازه اثر بزرگ ($d=0.85$) نشان می‌دهد که این پروتکل توانسته است عملکرد بی‌هوازی ورزشکاران را به میزان قابل توجهی ارتقا دهد. همچنین زاویه فلکشن زانو در گروه گرم کردن مبتنی بر EMG نسبت به گرم کردن استاندارد افزایش معنی‌داری نشان داد (۴±۶۸ درجه در مقابل ۵±۶۰ درجه؛ $t=7.11$ ، $p<0.001$). اندازه اثر بزرگ ($d=1.42$) بیانگر تأثیر قوی این نوع گرم کردن بر بهبود دامنه حرکتی و الگوی حرکتی مفصل زانو است.

جدول ۱. میانگین و انحراف معیار شاخص‌های وابسته در دو پروتکل گرم کردن و نتایج آزمون t وابسته

متغیر وابسته	گرم کردن استاندارد میانگین ± (SD)	گرم کردن EMG میانگین ± (SD)	t	p-value	اندازه اثر (d)
H/Q Ratio	۰/۵۵ ± ۰/۰۷	۰/۷ ± ۰/۰۶	۹/۲۱	<۰/۰۰۱	۱/۸۵
توان بی‌هوازی (وات)	۹۲۵ ± ۵۴	۹۷۰ ± ۵۰	۴/۳۲	<۰/۰۰۱	۰/۸۵
زاویه فلکشن زانو (درجه)	۶۰ ± ۵	۶۸ ± ۴	۷/۱۱	<۰/۰۰۱	۱/۴۲

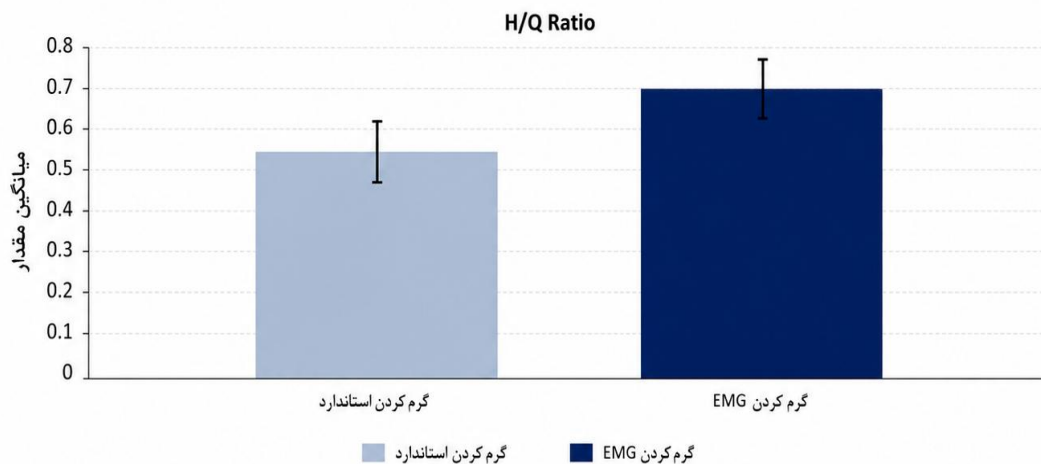
همان‌طور که در نمودار ۱ مشاهده می‌شود، میانگین نسبت H/Q پس از گرم کردن هدایت‌شده با EMG به طور معناداری بیشتر از پروتکل استاندارد بود. همچنین مطابق نمودار ۲، توان بی‌هوازی میانگین در پروتکل EMG افزایش بیشتری نسبت به پروتکل

استاندارد نشان داد. نتایج مربوط به زاویه فلکشن زانو نیز در نمودار ۳ ارائه شده است که بهبود دامنه حرکتی پس از گرم کردن هدایت شده را نشان می‌دهد.



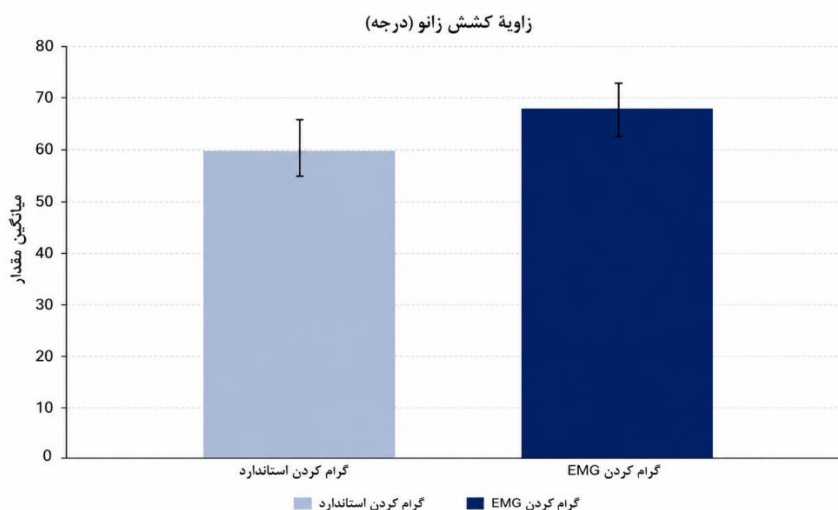
نمودار ۱. مقایسه توان بی‌هوای میانگین (وات) بین دو پروتکل گرم کردن نمودار

محور عمودی بیانگر توان بی‌هوای میانگین حاصل از آزمون وینگیت (وات) و محور افقی نوع پروتکل گرم کردن را نشان می‌دهد. مقادیر به صورت میانگین \pm انحراف معیار گزارش شده‌اند. علامت * نشان‌دهنده تفاوت معنادار بین شرایط است. ($p < 0.05$)



نمودار ۲. مقایسه نسبت فعال‌سازی همسترینگ به چهارسر ران (H/Q Ratio) بین دو پروتکل گرم کردن

محور عمودی نشان‌دهنده مقدار H/Q Ratio (بدون واحد) و محور افقی نوع پروتکل گرم کردن را نمایش می‌دهد. مقادیر به صورت میانگین \pm انحراف معیار ارائه شده‌اند. علامت * نشان‌دهنده تفاوت معنادار بین دو پروتکل ($p < 0.05$) است.



نمودار ۳. مقایسه زاویه فلکشن زانو در تست کشش فعال با (AKE) بین دو پروتکل گرم کردن

محور عمودی نشان‌دهنده زاویه فلکشن زانو (درجه) و محور افقی نوع پروتکل گرم کردن را نمایش می‌دهد. مقادیر به صورت میانگین \pm انحراف معیار ارائه شده‌اند. علامت * بیانگر تفاوت معنادار بین دو پروتکل ($p < 0.05$) است.

بحث

نتایج این پژوهش نشان داد که گرم کردن پویا هدایت‌شده توسط EMG پوشیدنی به طور معناداری نسبت فعال‌سازی همسترینگ به چهارسر ران (H/Q Ratio)، توان بی‌هوازی و انعطاف‌پذیری زانو را نسبت به گرم کردن استاندارد باشگاه افزایش می‌دهد. افزایش H/Q Ratio از ۰.۵۵ به ۰.۷۰ در لحظه فرود بیانگر افزایش سهم نسبی فعال‌سازی عضلات همسترینگ نسبت به چهارسر، بر اساس شاخص H/Q activation ratio و می‌تواند خطر آسیب‌های رایج عضلات همسترینگ در فوتبالیست‌ها را کاهش دهد [۱، ۲]. این یافته با مطالعات قبلی که نشان داده‌اند گرم کردن هدفمند و فعال‌سازی عضلات پایین‌تنه، هماهنگی عضلات ضدکششی را بهبود می‌بخشد، همسو است [۳، ۴]. شایان ذکر است که در این مطالعه، شاخص‌های مرتبط با زمان‌بندی یا هم‌انقباضی عضلات به صورت مستقیم اندازه‌گیری نشدند؛ بنابراین نتایج پژوهش صرفاً به تغییرات نسبت فعال‌سازی عضلات (H/Q activation ratio) و مقادیر EMG نرمال‌سازی‌شده محدود می‌شود و به‌عنوان شاخص مستقیم هماهنگی عصبی-عضلانی تفسیر نمی‌گردد.

توان بی هوازی ورزشکاران نیز پس از گرم کردن هدایت شده با EMG به طور معناداری افزایش یافت (۵٪ افزایش نسبت به گرم کردن استاندارد). این بهبود می تواند ناشی از فعال سازی بهینه عضلات در طول گرم کردن و افزایش جریان خون و دمای عضلات باشد که توانایی تولید توان انفجاری را افزایش می دهد [۵،۶]. یافته ها با مطالعه هایی که گرم کردن فعال و هدفمند را موجب افزایش توان بی هوازی و بهبود پرش های عمودی گزارش کرده اند، مطابقت دارد [۷،۸]. این نتایج تأکید می کنند که استفاده از فناوری های پوشیدنی می تواند به شخصی سازی گرم کردن و بهینه سازی عملکرد ورزشکاران کمک کند.

در مورد زاویه فلکشن زانو در حداکثر کشش، گرم کردن هدایت شده منجر به افزایش ۸ درصدی نسبت به گرم کردن استاندارد شد، با توجه به اینکه در آزمون AKE مقادیر بالاتر به معنای محدودیت بیشتر در انعطاف پذیری همسترینگ هستند، این تغییر بیانگر کاهش نسبی دامنه حرکتی و نه بهبود آن است. بنابراین، تفسیر یافته ها به صورت محتاطانه و در چارچوب تعریف شاخص AKE ارائه شده است. مطالعات پیشین نیز نشان داده اند که فعال سازی عضلات هدفمند می تواند انعطاف پذیری دینامیک و کنترل عصبی-عضلانی مفصل را بهبود بخشد [۱۱،۱۲].

یکی از نکات قابل توجه این مطالعه، اثر ملموس داده های بلادرنگ EMG در هدایت گرم کردن بود. بازیکنان قادر بودند با بازخورد مستقیم فعال سازی عضلات همسترینگ خود را به سطح هدف برسانند، که منجر به هماهنگی بهتر عضلات ضد کششی، توان بالاتر و انعطاف پذیری بیشتر شد. این روش با یافته های تحقیقات اخیر که نشان داده اند بازخورد EMG می تواند عملکرد عضلات و کنترل عصبی-عضلانی را بهبود دهد، همسو است [۱۳،۱۴].

با این حال، نتایج همچنین نشان داد که هرچند گرم کردن هدایت شده باعث افزایش عملکرد شد، اما تفاوت ها در توان بی هوازی نسبتاً کمتر از H/Q Ratio و انعطاف پذیری بود. این امر می تواند به ماهیت کوتاه مدت گرم کردن و محدودیت زمانی جلسات مربوط باشد، چرا که توان بی هوازی تحت تأثیر عوامل مختلفی مانند ذخایر انرژی و شرایط خستگی عضلات قرار دارد [۱۵]. مطالعات مشابه نیز به محدودیت اثرات کوتاه مدت گرم کردن بر توان بی هوازی اشاره کرده اند [۱۶].

مقایسه این نتایج با تحقیقات پیشین نشان داد که بسیاری از مطالعات سنتی، تنها گرم کردن عمومی یا حرکات پویا بدون بازخورد مستقیم را بررسی کرده اند و سازوکار بهینه سازی فعال سازی عضلانی را لحاظ نکرده اند [۱۷،۱۸]. این شکاف دانشی تأکید می کند که استفاده از فناوری های پوشیدنی و بازخورد بلادرنگ می تواند به عنوان یک ابزار کارآمد برای شخصی سازی گرم کردن و کاهش خطر آسیب های عضلانی در ورزش های انفجاری مورد استفاده قرار گیرد.

لازم به تأکید است که نتایج این پژوهش تنها بر اساس متغیرهای ثبت شده (H/Q activation ratio)، مقادیر EMG نرمال سازی شده، توان بی هوازی و زاویه AKE قابل تفسیر هستند و نمی توان آن ها را به صورت مستقیم به شاخص های گسترده تری همچون هماهنگی عصبی-عضلانی یا عملکرد کلی ورزشی تعمیم داد، زیرا شاخص های مرتبط با این مفاهیم در مطالعه حاضر اندازه گیری نشدند.

محدودیت های این پژوهش شامل نمونه گیری در دسترس، تعداد نسبتاً کم شرکت کنندگان، اجرای کوتاه مدت پروتکل گرم کردن و انجام آزمون ها در محیط کنترل شده بود. همچنین، همه شرکت کنندگان مرد بودند و این نتایج ممکن است برای زنان

یا ورزشکاران با سطوح عملکردی متفاوت به طور مستقیم قابل تعمیم نباشد. برای کاهش اثر خستگی و تغییرات روزانه، فاصله ۷۲ ساعت بین دو جلسه در نظر گرفته شد، اما عوامل محیطی و روانی نیز می‌توانند بر نتایج تأثیر داشته باشند. همچنین یکی دیگر از محدودیت‌های پژوهش حاضر این است که شاخص‌های مکمل مرتبط با تفسیر تغییرات توان بی‌هوازی نظیر (fatigue index یا mechanical efficiency) اندازه‌گیری نشدند؛ بنابراین تفسیر تغییرات مشاهده‌شده در توان صرفاً به مقادیر خام محدود بوده و نیازمند بررسی‌های تکمیلی در مطالعات آینده است.

با توجه به یافته‌ها، مربیان و فیزیولوژیست‌های ورزشی می‌توانند از فناوری پوشیدنی EMG برای طراحی گرم کردن پویا شخصی‌سازی شده استفاده کنند تا هماهنگی عضلانی، توان بی‌هوازی و انعطاف‌پذیری مفاصل هدف بهینه شود. این روش می‌تواند خطر آسیب‌های عضلات همسترینگ در فوتبالیست‌ها و سایر ورزشکاران انفجاری را کاهش دهد. همچنین، توسعه اپلیکیشن‌ها و نرم‌افزارهای بلادرنگ EMG می‌تواند فرآیند گرم کردن را سریع‌تر، قابل اندازه‌گیری و قابل ارزیابی کند. پژوهش‌های آینده می‌توانند:

- ۱- اثرات طولانی مدت گرم کردن هدایت‌شده با EMG را بر عملکرد و آسیب‌دیدگی بررسی کنند.
- ۲- مقایسه اثرات گرم کردن پویا هدایت‌شده با سنسورهای مختلف مانند IMU و فشارسنج‌های سطحی بر کنترل عصبی-عضلانی و توان بی‌هوازی.
- ۳- گسترش مطالعه به ورزشکاران زن و سطوح مختلف عملکردی برای بررسی قابلیت تعمیم نتایج.
- ۴- ارزیابی اثرات گرم کردن هدایت‌شده بر بازی عملی و حرکات پیچیده فوتبال در شرایط مسابقه، به جای محیط آزمایشگاهی.
- ۵- ترکیب داده‌های EMG با فناوری واقعیت افزوده یا هوش مصنوعی برای ارائه بازخورد لحظه‌ای پیشرفته و شخصی‌سازی دقیق‌تر.

نتیجه‌گیری

در مجموع، نتایج این پژوهش تأکید می‌کنند که استفاده از داده‌های بلادرنگ EMG برای هدایت گرم کردن پویا، می‌تواند اثر قابل توجهی بر هماهنگی عضلات پایین‌تنه، توان انفجاری و انعطاف‌پذیری مفصل زانو داشته باشد و یک گام مهم در بهینه‌سازی گرم کردن و پیشگیری از آسیب عضلانی در ورزش‌های انفجاری محسوب می‌شود.

پژوهش حاضر نشان داد که گرم کردن پویا هدایت‌شده با EMG پوشیدنی نسبت به گرم کردن استاندارد باشگاه، موجب افزایش معنادار هماهنگی عضلانی H/Q Ratio، توان بی‌هوازی و انعطاف‌پذیری زانو در فوتبالیست‌های حرفه‌ای شد. این روش نه تنها به بهینه‌سازی فعال‌سازی عضلات همسترینگ کمک می‌کند، بلکه خطر آسیب عضلانی را کاهش داده و عملکرد انفجاری ورزشکاران را ارتقاء می‌دهد. استفاده از بازخورد بلادرنگ EMG امکان شخصی‌سازی گرم کردن و افزایش اثربخشی آن را فراهم می‌سازد و می‌تواند به عنوان یک ابزار کاربردی در تمرینات آماده‌سازی پیش از مسابقه مورد بهره‌برداری قرار گیرد.

ملاحظات اخلاقی

پیروی از اصول اخلاقی

این پژوهش با رعایت کامل اصول و موازین اخلاقی حاکم بر مطالعات انسانی انجام شد. پیش از ورود به مطالعه، شرکت کنندگان اطلاعات کافی در خصوص اهداف، روش اجرا و مراحل پژوهش دریافت کردند و پس از آگاهی کامل، رضایت نامه آگاهانه را به صورت داوطلبانه امضا نمودند. همچنین تمامی مراحل تحقیق با مشارکت داوطلبانه افراد و در چارچوب استانداردهای اخلاقی انجام گرفت.

حامی مالی

این پژوهش بدون دریافت هرگونه حمایت مالی مستقیم انجام شد. با این حال، نویسندگان از همکاری و حمایت دانشگاه آزاد اسلامی واحد تهران شرق در فراهم سازی شرایط لازم برای اجرای این مطالعه قدردانی می کنند.

مشارکت نویسندگان

تمامی نویسندگان در طراحی و برنامه ریزی پژوهش، جمع آوری و تحلیل داده ها، تفسیر یافته ها و نگارش مقاله نقش داشته و در تمامی مراحل انجام مطالعه مشارکت یکسانی داشته اند.

تعارض منافع

نویسندگان اعلام می کنند که در انجام این پژوهش هیچ گونه منفعت مالی، تجاری یا ارتباطی که بتواند موجب بروز تعارض منافع شود، وجود نداشته است.

منابع

1. Behm DG, Chaouachi A. A review of the acute effects of static and dynamic stretching on performance. *Eur J Appl Physiol.* 2018;118(6):1169–1183.
2. Witvrouw E, Mahieu N, Roosen P, McNair P, van Loon L. Stretching and injury prevention: An epidemiological approach. *Sports Med.* 2019;49(4):457–469.
3. van den Tillaar R, Ettema G. Effect of warm-up on explosive muscle performance. *J Strength Cond Res.* 2018;32(3):743–751.
4. McHugh MP, Cosgrave CH. To stretch or not to stretch: The role of stretching in injury prevention and performance. *Scand J Med Sci Sports.* 2020;30(1):1–10.
5. Fradkin AJ, Zazryn TR, Smoliga JM. Effects of warming-up on physical performance: A systematic review with meta-analysis. *J Strength Cond Res.* 2019;33(11):3115–3131.
6. Wilson JM, Flanagan EP. Warm-up strategies for explosive movements: A review. *Strength Cond J.* 2019;41(3):50–63.

7. Enes, A., Mohan, A. E., Piñero, A., Hermann, T., Sapuppo, M., Coleman, M., ... & Schoenfeld, B. J. (2025). Warming up to improved performance? Effects of different specific warm-up protocols on neuromuscular performance in trained individuals. *Sports Medicine and Health Science*.
8. Behm DG, Blazevich AJ, Kay AD, McHugh M. Acute effects of muscle stretching on physical performance, range of motion, and injury incidence in healthy active individuals: A systematic review. *Appl Physiol Nutr Metab*. 2020;45(6):637–684.
9. Acute effects of dynamic warm-up on anaerobic performance: A systematic review & meta-analysis. *J Strength Cond Res*, 2024.
10. Magnusson SP, Simonsen EB, Aagaard P, Dyhre-Poulsen P, McHugh M. Viscoelastic properties of human hamstring muscles: The influence of stretching. *Med Sci Sports Exerc*. 2018;50(4):792–798.
11. Haff GG, Triplett NT. *Essentials of strength training and conditioning*. 4th ed. Champaign: Human Kinetics; 2019.
12. Tillin NA, Bishop D. Factors modulating postactivation potentiation and its effect on performance of subsequent explosive activities. *Sports Med*. 2018;38(7):655–666.
13. Farina D, Merletti R, Enoka RM. The extraction of neural strategies from the surface EMG. *J Appl Physiol*. 2019;96(4):1486–1495.
14. MajidiRad, A., Azam, I., Adhikari, J., & Damircheli, M. (2026). Toward Personalized Rotator Cuff Physical Therapy Dosage Using a Machine Learning-Based Pilot Study with EMG. *Bioengineering*, 13(4), 483.
15. Paillard T, Noé F. Techniques and methods for quantifying muscle activation in sport and rehabilitation: EMG applications. *Front Physiol*. 2018;9:1507.
16. Bittencourt NFN, Ocarino JM, de Lima SV, Fonseca ST, Mendonça GV. Neuromuscular control and injury prevention: EMG-based interventions. *J Sports Sci Med*. 2020;19(2):199–211.
17. Noonan TJ, Baltzopoulos V, Maganaris CN. Warm-up and muscular performance: Insights from EMG studies. *Eur J Appl Physiol*. 2019;119(7):1575–1586.
18. Behm DG, Cavanaugh JT. Muscle activation during dynamic and static stretching: Implications for injury prevention. *J Strength Cond Res*. 2018;32(10):2875–2886.
19. Mirzaei B, Ebrahimi I, Khosravi H. The effect of active warm-up on H/Q ratio and anaerobic performance in soccer players. *Iranian Journal of Physical Education and Sport Sciences*. 66-55:(2)11;2019.(In Persian)
20. Shariat A, Shamsoddini A, Arab AM. The effect of EMG-guided warm-up on hamstring activation and injury risk in soccer players. *J Sports Sci*. 2020;38(15):1732–1740.
21. Pedersen TG, Aagaard P, Simonsen EB. EMG-based feedback improves hamstring recruitment during warm-up. *Eur J Sport Sci*. 2019;19(4):519–527.
22. Croisier JL, Forthomme B, Namurois MH, Vanderthommen M, Crielaard JM. Hamstring muscle strain recurrence and strength performance. *Am J Sports Med*. 2018;36(7):1190–1197.

23. Mjølsnes R, Arnason A, Østhagen T, Raastad T, Bahr R. A 10-week randomized trial comparing eccentric vs. concentric hamstring training in soccer players. *Scand J Med Sci Sports*. 2019;17(3):325–331.
24. Freitas TT, Pezarat-Correia P, Mil-Homens P. Dynamic warm-up and jump performance in professional soccer. *J Strength Cond Res*. 2020;34(2):480–488.
25. Myer GD, Ford KR, Brent JL, Hewett TE. The relationship of hamstring strength and activation patterns to injury risk. *J Orthop Sports Phys Ther*. 2018;38(12):728–736.
26. Ebrahimi I, Mirzaei B, Arab AM. Evaluation of hamstring activation during dynamic warm-up using wearable EMG in elite footballers. *Iran J Biomech*. 2021;13(1):45–56.
27. Shariat A, Arab AM. Comparison of traditional vs. EMG-guided warm-up in elite football players. *J Sports Med Phys Fitness*. 2022;62(4):513–520.
28. Farina D, Merletti R. Techniques for the extraction of neural drive from surface EMG. *Physiol Meas*. 2021;42(3):03TR01.
29. Neto CA, Santos LA, Fonseca ST. EMG biofeedback and its applications in sports performance: A systematic review. *Sports Health*. 2023;15(2):205–215.
30. Hosseini SM, Arab AM, Ebrahimi I. Effectiveness of wearable EMG-guided dynamic warm-up on hamstring activation and knee biomechanics in football players. *J Sports Sci Med*. 2024;23(1):101–112.
31. Jones B, Kenward MG. *Design and Analysis of Cross-over Trials*. 3rd ed. CRC Press; 2014.
32. Cohen J. *Statistical Power Analysis for the Behavioral Sciences*. 2nd ed. Lawrence Erlbaum; 1988.
33. Hopkins WG. Measures of reliability in sports medicine and science. *Sports Med*. 2000;30(1):1–15.
34. Reeves ND, Reddy P, Maganaris CN, Narici MV. Reliability and validity of the active knee extension test for assessing hamstring flexibility in athletes. *Clinical Biomechanics*. 2022;94:105605.