

Research Paper

The Effect of a Body-Mass-Based PAPE Protocol on Intersegmental Coordination, Coordination Variability, And Knee Valgus Angle in Young Basketball Players: A Marker-Based Motion Analysis Study

* Hossein babaei pour¹ , Iman Sahraei Dehmajnooni² 

1. Assistant Prof, Department of Sport Injuries and Corrective Exercises, Faculty of Sport Sciences, Vali-e-Asr University of Rafsanjan, Rafsanjan, Iran

2. MSc of Sport Biomechanics, Rafsanjan County Department of Education, Kerman Province, Iran.



Citation Babaei Pour H, Sahraei Dehmajnooni I. The Effect of a Body-Mass-Based PAPE Protocol on Intersegmental Coordination, Coordination Variability, and Knee Valgus Angle in Young Basketball Players: A Marker-Based Motion Analysis Study. (In Persian). *Journal of Biomechanics and technology in sport*. 2026;1(1):[14-26]. doi: 10.22103/jbts.2025.26320.1005

 doi: 10.22103/jbts.2025.26320.1005

Keywords

Coordination

Coordination variability

Knee valgus

Post-activation performance enhancement

Received: 2025/11/27

Accepted: 2025/12/16

Available Online: 2026/02/27

ABSTRACT

Introduction Basketball requires a combination of explosive power and precise neuromuscular control. Post-activation performance enhancement (PAPE) is a common strategy to improve explosive performance; however, its effects on movement quality and injury risk factors have been less investigated. The purpose of this study was to examine the effect of a body-mass-based PAPE protocol on intersegmental coordination, coordination variability, and dynamic knee valgus angle in young basketball players

Methods In this semi-experimental crossover study, twenty male basketball players (age: 22 ± 1 years) were randomly assigned to two conditions: PAPE and control. The experimental condition included three sets of five box jumps as the conditioning activity, while in the control condition, participants rested for four minutes. Before and after both conditions, the countermovement jump (CMJ) was recorded using a Raptor-H marker-based motion analysis system. Jump height, knee valgus angle, continuous relative phase (CRP) between hip-knee and knee-ankle joints (as an indicator of coordination), and its standard deviation (as an indicator of coordination variability) were calculated.

Results The findings showed that the PAPE protocol significantly increased jump height ($p < 0.05$). Intersegmental coordination also showed a significant change in the PAPE condition compared to control, indicating a more efficient movement pattern ($p < 0.05$). However, coordination variability and maximum dynamic knee valgus angle did not differ significantly between conditions ($p > 0.05$).

Conclusion It appears that a short, body-mass-based PAPE protocol not only enhances explosive performance in young basketball players but also improves movement quality by optimizing coordination patterns, without increasing biomechanical injury risk (through higher knee valgus or reduced movement adaptability). Therefore, this method can be considered a practical and safe tool for warm-up before training and competition.

*Corresponding Author

Hossein babaei pour, Assistant Prof

Address: Department of Sport Injuries and Corrective Exercises, Faculty of Sport Sciences, Vali-e-Asr University of Rafsanjan, Rafsanjan, Iran

Email: Hosseinbabaei1906@yahoo.com

Extended Abstract

Introduction

Basketball is a highly dynamic sport that relies substantially on explosive lower-limb power for actions such as jumping, sprinting, and rapid changes of direction (1). These high-intensity movements, particularly during landing, impose considerable mechanical loads on the knee joint and make basketball one of the sports with a high risk of lower-limb injuries, especially anterior cruciate ligament (ACL) rupture (4). Among the biomechanical factors associated with ACL injury risk, increased dynamic knee valgus, defined as the medial displacement of the knee toward the body's midline, has been identified as one of the most important indicators during sport-specific movements (5). Landing biomechanics in basketball, especially under unplanned or reactive conditions, may further increase this risk by challenging neuromuscular control and joint stability (6).

To enhance explosive performance, coaches and strength and conditioning specialists increasingly use post-activation performance enhancement (PAPE) strategies. PAPE refers to a physiological phenomenon in which explosive muscular performance is temporarily improved following a brief, high-intensity conditioning activity (2). Although many studies have used heavy external loads to induce this effect, body mass-based protocols, such as box jumps or plyometric exercises, may be more practical for young athletes due to their lower equipment demands, greater field applicability, and potentially lower injury risk (3,7).

However, most PAPE studies have focused primarily on quantitative performance outcomes, such as jump height or movement speed, while movement quality has received less attention. Movement quality can be evaluated through biomechanical concepts such as inter-segmental coordination and coordination variability, both of which are essential for stable performance and injury prevention (8). Coordination reflects the spatiotemporal relationship between joint movements, whereas coordination variability represents natural fluctuations in these patterns across repeated trials. Insufficient variability may indicate a rigid motor system, while excessive variability may reflect poor movement stability (8). Since knee valgus control is strongly influenced by hip muscle strength and activation, particularly the abductors and external rotators, weakness in these muscles may compromise pelvic stability and increase knee valgus during landing (9,10). Therefore, an important research gap remains regarding whether body mass-based PAPE protocols merely enhance performance or can also improve movement quality without compromising knee joint stability. Accordingly, this study aimed to investigate the effects of a body mass-based PAPE protocol on inter-segmental coordination, coordination variability, and knee valgus angle in young basketball players.

Method

This study was designed as a quasi-experimental crossover trial, in which each participant completed both the post-activation performance enhancement (PAPE) and control conditions. The order of conditions was randomized, and a minimum 48-hour interval was considered between sessions to minimize residual fatigue. Twenty young male basketball players participated voluntarily in the study (age: 22 ± 1 years; height: 188 ± 5 cm; body mass: 82 ± 7 kg), all with at least three years of competitive experience. Participants had no history of severe lower-limb injury during the previous six months or chronic musculoskeletal disorders, and all provided written informed consent.

Three-dimensional kinematic data were recorded using a marker-based Raptor-H motion analysis system at 200 Hz. Reflective markers were placed on anatomical landmarks of the pelvis, thigh, knee, shank, and ankle according to the Plug-in Gait protocol, as marker-based systems are considered a standard approach for accurate three-dimensional kinematic assessment (11). After marker placement, participants completed a standardized 10-minute warm-up, followed by three maximal countermovement jumps as the pre-test. In the PAPE condition, participants performed three sets of five maximal 40-cm box jumps with two minutes of rest between sets (3,7), followed by a four-minute recovery period to allow the PAPE effect to emerge (2). In the control condition, participants remained seated for four minutes. After each condition, three post-test countermovement jumps were performed.

Raw kinematic data were processed in MATLAB R2022a and filtered using a fourth-order Butterworth low-pass filter (12). Jump height, maximum dynamic knee valgus during landing, inter-segmental coordination using continuous relative phase (CRP), and coordination variability were calculated (8,13). Data normality was assessed using the Shapiro–Wilk test. Paired-samples t-tests and repeated-measures ANOVA were used, with significance set at $p < 0.05$.

Result

The results showed a significant increase in jump height following the PAPE protocol ($\Delta = +3.3$ cm, $p = 0.001$), whereas no significant change was observed in the control condition ($p = 0.45$). Inter-segmental coordination patterns changed significantly after the PAPE condition compared with the control condition ($p < 0.05$). However, coordination variability (CRP-SD) did not change significantly in either condition ($p > 0.05$). Dynamic knee valgus showed a small, non-significant decrease following the PAPE protocol ($p = 0.52$), while no significant changes were observed in the control condition ($p = 0.61$).

Conclusion

The findings of this study indicate that a bodyweight-based PAPE protocol can enhance explosive performance while promoting favorable neuromuscular adaptations in young basketball players. The significant improvement in jump height suggests that the conditioning activity effectively increased the athletes' readiness for explosive actions. In addition, changes in inter-segmental coordination patterns indicate a more efficient movement strategy during the propulsion phase of the jump, which may reflect improved neuromuscular organization. Importantly, coordination variability remained unchanged following the PAPE protocol, suggesting that movement flexibility was preserved despite the observed enhancement in performance. From a dynamical systems perspective, maintaining an optimal level of variability is essential for adaptable and stable motor behavior. Furthermore, the absence of a significant increase in dynamic knee valgus indicates that the performance gains were not accompanied by adverse biomechanical changes associated with injury risk. Overall, these findings suggest that bodyweight-based PAPE is a practical and safe strategy for improving explosive performance in young basketball players. The protocol appears to enhance movement quality and neuromuscular efficiency without compromising movement adaptability or knee joint safety, supporting its application as part of pre-training and pre-competition warm-up routines.

Ethical Considerations

Compliance with ethical guidelines

The study was carried out in accordance with established ethical standards for research involving human participants. Before taking part in the study, all participants received clear information about the aims, procedures, and requirements of the research, and voluntarily provided written informed consent. The study protocol was also designed with careful consideration of participant safety and welfare, and no significant risks or adverse effects were expected.

Funding

This study received no financial support or funding from any public, commercial, or non-profit organization.

Authors' contributions

All authors contributed equally to the study design, data collection and analysis, interpretation of the results, and drafting of the manuscript.

Conflict of interest

The authors declare that the research was conducted in the absence of any commercial or financial relationships that could be construed as a potential conflict of interest.

مقاله پژوهشی

اثر PAPE مبتنی بر جرم بدن بر هماهنگی بین‌بخشی، تغییر پذیری هماهنگی و زاویه والگوس زانو در بسکتبالیست‌های جوان: یک مطالعه تحلیل حرکتی مبتنی بر نشانگر

* حسین بابایی پور^۱ ID، ایمان صحرایی ده مجنونی^۲ ID

۱. استادیار، گروه علوم ورزشی، آسیب شناسی و حرکات اصلاحی، دانشکده علوم انسانی، دانشگاه ولی عصر (عج) رفسنجان، ایران
 ۲. کارشناس ارشد بیومکانیک ورزشی، اداره آموزش و پرورش شهرستان رفسنجان، کرمان، ایران



Citation Babaei Pour H, Sahraei Dehmajnooni I. The Effect of a Body-Mass-Based PAPE Protocol on Intersegmental Coordination, Coordination Variability, and Knee Valgus Angle in Young Basketball Players: A Marker-Based Motion Analysis Study. (In Persian). *Journal of Biomechanics and technology in sport*. 2026;1(1):[14-26]. doi: 10.22103/jbts.2025.26320.1005

DOI doi: 10.22103/jbts.2025.26320.1005

چکیده

مقدمه: بسکتبال نیازمند ترکیبی از توان انفجاری و کنترل عصبی-عضلانی دقیق است. افزایش عملکرد پس از فعال‌سازی (PAPE) یک استراتژی رایج برای بهبود عملکرد انفجاری است، اما تأثیر آن بر کیفیت حرکت و عوامل خطر مصدومیت کمتر مورد بررسی قرار گرفته است. هدف از این پژوهش، بررسی اثر یک پروتکل PAPE مبتنی بر جرم بدن بر هماهنگی بین‌بخشی، تغییرپذیری هماهنگی و زاویه والگوس دینامیک زانو در بسکتبالیست‌های جوان بود.

روش پژوهش: در این مطالعه نیمه‌تجربی با طرح متقاطع، ۲۰ بسکتبالیست مرد (سن: ۱۹±۲۲ سال) به صورت تصادفی در دو شرایط آزمایش (PAPE) و کنترل شرکت کردند. شرایط آزمایش شامل اجرای ۳ ست ۵ تکرار پرش روی جعبه به عنوان فعالیت فعال‌سازی‌کننده بود، در حالی که در شرایط کنترل، ورزشکاران به مدت ۴ دقیقه استراحت کردند. قبل و بعد از هر دو شرایط، حرکت پرش اسکات (Countermovement Jump) با استفاده از سیستم تحلیل حرکت مبتنی بر نشانگر Raptor-H ثبت شد. متغیرهای قد پرش، زاویه والگوس زانو، فاز نسبی پیوسته (CRP) بین مفاصل لگن-زانو و زانو-مچ پا (به عنوان شاخص هماهنگی) و انحراف معیار آن (به عنوان شاخص تغییرپذیری هماهنگی) محاسبه شدند.

یافته‌ها: نتایج نشان داد که پروتکل PAPE باعث افزایش معناداری در قد پرش شد ($p < 0.05$). هماهنگی بین‌بخشی در شرایط PAPE تغییر معناداری را نسبت به شرایط کنترل نشان داد که بیانگر یک الگوی حرکتی کارآمدتر بود ($p < 0.05$). با این حال، تغییرپذیری هماهنگی و حداکثر زاویه والگوس دینامیک زانو در دو شرایط تفاوت معناداری نداشتند ($p > 0.05$).

نتیجه‌گیری: به نظر می‌رسد یک پروتکل PAPE کوتاه مبتنی بر جرم بدن، نه تنها عملکرد انفجاری را در بسکتبالیست‌های جوان بهبود می‌بخشد، بلکه با بهینه‌سازی الگوهای هماهنگی، کیفیت حرکت را نیز افزایش می‌دهد، بدون اینکه منجر به افزایش ریسک بیومکانیکی مصدومیت (از طریق افزایش والگوس زانو یا کاهش انعطاف‌پذیری حرکتی) شود. بنابراین، این روش می‌تواند به عنوان یک ابزار کاربردی و ایمن در گرم کردن قبل از تمرین و مسابقه مورد استفاده قرار گیرد.

کلمات کلیدی:

هماهنگی

تغییرپذیری هماهنگی

والگوس زانو

افزایش عملکرد پس از

فعال‌سازی

تاریخ دریافت: ۱۴۰۴/۰۸/۲۶

تاریخ پذیرش: ۱۴۰۴/۰۹/۲۵

تاریخ انتشار: ۱۴۰۴/۱۲/۰۸

*نویسنده مسئول:

حسین بابایی پور، استادیار

آدرس: گروه علوم ورزشی، آسیب شناسی و حرکات اصلاحی، دانشکده علوم انسانی، دانشگاه ولی عصر (عج) رفسنجان، ایران

پست الکترونیکی: Hosseinbabaei1906@yahoo.com

مقدمه

بسکتبال به عنوان یک ورزش دینامیک، به شدت به توان تولید انفجاری در اندام تحتانی برای حرکاتی مانند پرش، دویدن و تغییر مسیرهای ناگهانی وابسته است (۱). این حرکات انفجاری، به ویژه هنگام فرود، فشارهای قابل توجهی بر مفاصل زانو وارد می‌کنند و این ورزش را به یکی از پرخطرترین رشته‌ها برای مصدومیت‌های اندام تحتانی، به خصوص پارگی رباط صلیبی قدامی (ACL)، تبدیل کرده است (۴). یکی از مهم‌ترین عوامل بیومکانیکی مرتبط با ریسک این مصدومیت، افزایش زاویه والگوس دینامیک زانو (فرورفتگی زانو به سمت داخل خط میانی بدن) در حین فعالیت‌های ورزشی است (۵). بیومکانیک فرود در بسکتبال، به خصوص در شرایط برنامه‌ریزی نشده، این ریسک را افزایش می‌دهد (۶).

در تلاش برای بهبود عملکرد، مربیان و متخصصان آمادگی جسمانی به طور فزاینده‌ای از استراتژی‌های افزایش عملکرد پس از فعال‌سازی (Post-Activation Performance Enhancement-PAPE) استفاده می‌کنند. PAPE یک پدیده فیزیولوژیک است که در آن، عملکرد انفجاری عضله به طور موقت پس از انجام یک فعالیت انقباضی کوتاه و شدید (فعال‌سازی کننده) افزایش می‌یابد (۲). اگرچه بسیاری از تحقیقات از بارهای خارجی سنگین برای القای این اثر استفاده کرده‌اند، اما پروتکل‌های مبتنی بر جرم بدن (مانند پرش روی جعبه یا پرش‌های پلایومتریک) به دلیل کاربردی‌تر بودن، نیاز به تجهیزات کمتر و ریسک مصدومیت پایین‌تر، برای ورزشکاران جوان ارجح هستند (۳، ۷).

با این حال، اکثر مطالعات PAPE بر متغیرهای عملکردی کمی مانند قد پرش یا سرعت تمرکز داشته‌اند و کیفیت حرکت را نادیده گرفته‌اند. کیفیت حرکت، که می‌تواند از طریق مفاهیم بیومکانیکی مانند هماهنگی بین‌بخشی (Inter-segmental Coordination) و تغییرپذیری هماهنگی (Coordination Variability) سنجیده شود، برای عملکرد پایدار و پیشگیری از مصدومیت حیاتی است (۸). هماهنگی به الگوی زمانی-فضایی حرکت مفاصل مختلف اشاره دارد، در حالی که تغییرپذیری هماهنگی، نوسان طبیعی در این الگوها در تکرارهای مختلف یک حرکت را نشان می‌دهد. تغییرپذیری کم می‌تواند نشانه یک سیستم حرکتی خشک و مستعد مصدومیت باشد، در حالی که تغییرپذیری بیش از حد نیز می‌تواند نشان‌دهنده عدم ثبات باشد (۸).

کنترل والگوس زانو به شدت به قدرت و فعالیت عضلات لگن، به ویژه ابداکتورها و چرخاننده‌های خارجی، وابسته است (۹، ۱۰). ضعف در این عضلات می‌تواند منجر به عدم ثبات لگن و در نتیجه افزایش والگوس زانو در حین فرود شود. بنابراین، یک خلاء تحقیقاتی در مورد تأثیر پروتکل‌های PAPE مبتنی بر جرم بدن بر این شاخص‌های کیفی حرکت وجود دارد. آیا این پروتکل‌ها صرفاً قدرت را افزایش می‌دهند یا می‌توانند کیفیت حرکت را نیز بهبود بخشند؟ و مهم‌تر از آن، آیا این بهبود

عملکرد با به خطر انداختن ثبات مفصل زانو (از طریق افزایش والگوس) همراه است؟ پاسخ به این سوالات برای طراحی برنامه‌های تمرینی ایمن و مؤثر ضروری است. این پژوهش با هدف بررسی تأثیر یک پروتکل PAPE مبتنی بر جرم بدن بر هماهنگی بین‌بخشی، تغییرپذیری هماهنگی و زاویه والگوس زانو در بسکتبالیستهای جوان انجام شد.

روش‌شناسی پژوهش

شرکت‌کنندگان

شرکت‌کنندگان بیست نفر از بسکتبالیستان مرد جوان (میانگین سن 22 ± 1 سال، قد 188 ± 5 سانتی‌متر، وزن 82 ± 7 کیلوگرم) با حداقل ۳ سال سابقه بازی در لیگ‌های جوانان به‌صورت داوطلبانه در این تحقیق شرکت کردند. معیارهای ورود شامل عدم وجود سابقه مصدومیت شدید در اندام تحتانی در ۶ ماه گذشته و عدم ابتلا به بیماری‌های مزمن اسکلتی-عضلانی بود. تمام شرکت‌کنندگان فرم رضایت‌نامه آگاهانه را امضا کردند.

ابزار

۱. ثبت داده‌های سینماتیکی سه‌بعدی
برای ثبت داده‌های سینماتیکی از سیستم تحلیل حرکت سه‌بعدی مبتنی بر نشانگر Raptor-H ساخت کشور آمریکا با فرکانس نمونه‌برداری ۲۰۰ هرتز استفاده شد. این سیستم جهت ثبت دقیق حرکات بدن در طول اجرای پرش اسکات به کار رفت. مجموعه‌ای از نشانگرهای بازتاب‌دهنده بر اساس پروتکل استاندارد Plug-in Gait بر روی نقاط آناتومیکی استخوانی شامل نواحی لگن، ران، زانو، ساق و مچ پا قرار داده شد. استفاده از سیستم‌های مبتنی بر نشانگر به‌عنوان یکی از روش‌های استاندارد و دقیق برای ثبت داده‌های سینماتیکی سه‌بعدی شناخته می‌شود (۱۱).

۲. جعبه پرش برای اجرای پروتکل PAPE
برای اجرای پروتکل فعال‌سازی پس‌فعالی یا PAPE از جعبه‌های پرش با ارتفاع ۴۰ سانتی‌متر استفاده شد. شرکت‌کنندگان در شرایط PAPE سه ست پنج تکراری پرش حداکثری روی جعبه را با دو دقیقه استراحت بین ست‌ها انجام دادند. این ابزار به‌عنوان محرک انفجاری کوتاه‌مدت برای ایجاد اثر توان‌زایی پس‌فعالی و بهبود عملکرد پرش مورد استفاده قرار گرفت (۳، ۷).
۳. نرم‌افزار MATLAB برای پردازش داده‌ها

داده‌های خام حرکتی با استفاده از نرم‌افزار MATLAB نسخه R2022a پردازش شدند. برای حذف نویزهای حرکتی و آماده‌سازی داده‌ها جهت تحلیل، از فیلتر گذر پایین باتروورث مرتبه چهارم با فرکانس قطع مناسب، معمولاً بین ۶ تا ۱۲ هرتز بر اساس نوع حرکت، استفاده شد. پس از فیلتر کردن داده‌ها، متغیرهای عملکردی، بیومکانیکی و هماهنگی حرکتی برای هر تکرار پرش محاسبه شدند (۱۲).

۴. شاخص عملکردی قد پرش

قد پرش به عنوان شاخص اصلی عملکرد انفجاری ورزشکاران اندازه گیری شد. این متغیر با استفاده از حداکثر جابجایی عمودی مرکز جرم بدن در طول اجرای پرش اسکات محاسبه گردید. قد پرش برای مقایسه عملکرد شرکت کنندگان در شرایط پیش آزمون و پس آزمون و همچنین بررسی اثر پروتکل PAPE نسبت به شرایط کنترل مورد استفاده قرار گرفت.

۵. شاخص بیومکانیکی والگوس دینامیک زانو

حداکثر زاویه والگوس دینامیک زانو به عنوان یکی از شاخص های بیومکانیکی مرتبط با کیفیت حرکت و خطر بالقوه آسیب اندام تحتانی بررسی شد. این زاویه در فاز فرود پرش و بر اساس مختصات سه بعدی مفاصل لگن، زانو و مچ پا محاسبه گردید.

۶. شاخص های هماهنگی بین بخشی

برای ارزیابی هماهنگی بین بخشی از شاخص فاز نسبی پیوسته یا Continuous Relative Phase (CRP) استفاده شد. این شاخص بین جفت های مفصلی لگن-زانو و زانو-مچ پا در طول فاز برخاستن پرش محاسبه گردید CRP. به عنوان یک ابزار استاندارد برای سنجش هماهنگی دینامیک بین دو بخش حرکتی به کار می رود و امکان بررسی تغییرات الگوی هماهنگی مفاصل پس از اجرای پروتکل PAPE را فراهم می کند (۸،۱۳).

۷. تغییرپذیری هماهنگی

تغییرپذیری هماهنگی با استفاده از انحراف معیار CRP یا SD-CRP در سه تکرار انجام شده در هر شرایط محاسبه شد. این شاخص برای بررسی پایداری یا انعطاف پذیری الگوی هماهنگی حرکتی مورد استفاده قرار گرفت. مقدار SD-CRP نشان می دهد که الگوی هماهنگی بین مفاصل تا چه اندازه در تکرارهای مختلف ثابت یا متغیر بوده است (۸).

روند اجرای پژوهش

طرح تحقیق این پژوهش یک مطالعه نیمه تجربی با طرح Cross-over (مقاطع) بود که در آن هر شرکت کننده در هر دو شرایط آزمایش (PAPE) و کنترل شرکت کرد. ترتیب انجام شرایط به صورت تصادفی تعیین شد و یک فاصله حداقل ۴۸ ساعته بین دو جلسه آزمایشی در نظر گرفته شد تا از اثرات خستگی باقی مانده جلوگیری شود.

پس از ثبت اطلاعات دموگرافیک و قرار دادن نشانگرها، شرکت کنندگان یک برنامه گرم کردن استاندارد ۱۰ دقیقه ای (شامل ۵ دقیقه دویدن نرم و ۵ دقیقه حرکات کششی پویا) را انجام دادند. سپس، تست پیش آزمون شامل ۳ تکرار پرش اسکات (Countermovement Jump) با حداکثر توان انجام شد که فاصله استراحت بین هر تکرار ۳۰ ثانیه بود. بهترین تکرار برای تحلیل های بعدی انتخاب شد.

شرکت کنندگان گروه آزمایش (PAPE) ۳ ست ۵ تکرار پرش حداکثری روی جعبه را با ۲ دقیقه استراحت بین ست ها انجام دادند (۳، ۷). بلافاصله پس از آخرین ست، یک دوره استراحت ۴ دقیقه ای (زمان بهینه برای بروز اثر PAPE) به آن ها داده شد (۲). شرکت کنندگان گروه کنترل به جای پروتکل فعال سازی، به مدت ۴ دقیقه بر روی صندلی نشستند تا اثر گرم کردن عمومی یا خستگی حذف شود. پس از هر دو شرایط، تست پس آزمون مشابه پیش آزمون (۳ تکرار پرش اسکات) انجام شد.

داده‌های خام حرکتی با استفاده از نرم‌افزار MATLAB نسخه R2022a و با به کارگیری یک فیلتر گذر پایین باتروورث چهارم مرتبه (4th-order Butterworth low-pass filter) با فرکانس قطع مناسب (معمولاً بین ۶ تا ۱۲ هرتز بسته به نوع حرکت) فیلتر شدند (۱۲). برای هر تکرار پرش، متغیرهای مختلفی محاسبه گردیدند. قد پرش با استفاده از حداکثر جابجایی عمودی مرکز جرم بدن تعیین شد و حداکثر زاویه والگوس دینامیک زانو در حین فاز فرود از پرش، بر اساس مختصات سه‌بعدی مفاصل لگن، زانو و مچ پا محاسبه گردید. همچنین، هماهنگی بین‌بخشی با استفاده از شاخص فاز نسبی پیوسته (Continuous Relative Phase - CRP) بین جفت‌های مفصلی لگن-زانو و زانو-مچ پا در طول فاز برخاستن پرش ارزیابی شد (۸، ۱۳). این شاخص یک ابزار استاندارد برای سنجش هماهنگی دینامیک بین دو بخش حرکتی است. تغییرپذیری هماهنگی نیز به عنوان انحراف معیار CRP در سه تکرار انجام شده در هر شرایط محاسبه گردید (۸).

روش آماری

جهت تحلیل آماری ابتدا نرمال بودن توزیع داده‌ها با استفاده از آزمون شاپیرو-ویلک بررسی شد. برای مقایسه متغیرها بین شرایط پیش‌آزمون و پس‌آزمون در هر یک از گروه‌های PAPE و کنترل، از آزمون t-test زوجی و برای مقایسه تغییرات بین دو شرایط، از آزمون ANOVA با اندازه‌گیری‌های مکرر استفاده شد. سطح معناداری برای تمام آزمون‌ها ۰/۰۵ در نظر گرفته شد.

یافته‌ها

نتایج نشان داد که تمام داده‌ها دارای توزیع نرمال بودند ($p > 0.05$). نتایج مربوط به متغیرهای عملکردی و بیومکانیکی در جدول ۱ خلاصه شده است.

جدول ۱: مقایسه میانگین و انحراف معیار متغیرها در شرایط پیش‌آزمون و پس‌آزمون

متغیر	شرایط	پیش‌آزمون	پس‌آزمون	تغییر (Δ)	مقدار p
قد پرش (cm)	PAPE	۴۵/۲±۳/۱	۴۸/۵±۳/۴	+۳/۳	۰/۰۰۱
	کنترل	۴۵/۵±۲/۹	۴۵/۸±۳/۰	+۰/۳	۰/۴۵
والگوس زانو (درجه)	PAPE	۸/۱±۲/۵	۷/۸±۲/۷	-۰/۳	۰/۵۲
	کنترل	۸/۰±۲/۴	۸/۲±۲/۶	+۰/۲	۰/۶۱
تغییرپذیری هماهنگی (SD-CRP)	PAPE	۱۵/۲±۴/۱	۱۴/۸±۳/۹	-۰/۴	۰/۶۸
	کنترل	۱۵/۰±۳/۸	۱۵/۳±۴/۰	+۰/۳	۰/۷۱

عملکرد نتایج نشان داد که قد پرش در شرایط PAPE به طور معناداری افزایش یافت ($p=0/001$)، در حالی که در شرایط کنترل تغییر معناداری مشاهده نشد ($p=0/45$). هماهنگی و تغییرپذیری هماهنگی تحلیل الگوهای CRP نشان داد که هماهنگی بین‌بخشی در شرایط PAPE تغییر معناداری را نسبت به شرایط کنترل تجربه کرد ($p<0/05$)، که این تغییر به سمت یک الگوی هماهنگی کارآمدتر در فاز برخاستن پرش بود. با این حال، تغییرپذیری هماهنگی (SD-CRP) در هیچ‌یک از دو شرایط تغییر معناداری نداشت ($p>0/05$). زاویه والگوس زانو همانطور که در جدول ۱ مشاهده می‌شود، حداکثر زاویه والگوس دینامیک زانو در شرایط PAPE کاهش جزئی و غیرمعناداری را نشان داد ($p=0/52$) و در شرایط کنترل نیز تغییر معناداری نداشت ($p=0/61$).

بحث

مهم‌ترین یافته این پژوهش این بود که یک پروتکل کوتاه PAPE مبتنی بر جرم بدن، نه تنها عملکرد انفجاری را در بسکتبالیست‌های جوان بهبود بخشید، بلکه این بهبود عملکرد با تغییرات مثبت در کیفیت حرکت و بدون افزایش عوامل خطر بیومکانیکی مصدومیت همراه بود.

افزایش ۳/۳ سانتی‌متری قد پرش پس از پروتکل PAPE، با نتایج بسیاری از مطالعات قبلی و متاآنالیزهای اخیر همخوانی دارد (۱، ۳، ۱۴). این یافته مجدداً تأیید می‌کند که فعالیت‌های انفجاری کوتاه مانند پرش روی جعبه می‌تواند به عنوان یک محرک مؤثر برای افزایش توان تولیدی عضلات در کوتاه‌مدت عمل کنند.

یافته کلیدی و نوآورانه این تحقیق، مربوط به تغییر در هماهنگی بین‌بخشی بود. به نظر می‌رسد فعال‌سازی پیش از ماهیچه‌ها، سیستم عصبی را برای تولید نیروی بیشتر و هماهنگ‌تر آماده می‌کند (۲). این بهبود می‌تواند ناشی از سازگاری‌های عصبی باشد که نرخ فعال‌سازی واحد حرکتی را افزایش می‌دهند (۱۵). الگوی جدید CRP که پس از PAPE مشاهده شد، می‌تواند نشان‌دهنده هماهنگی بهتر بین مفاصل لگن و زانو برای تولید توان عمودی باشد که منجر به پرش بالاتر می‌شود. این یافته بر این ایده تأکید دارد که بهبود عملکرد صرفاً ناشی از افزایش "قدرت" عضلات نیست، بلکه حاصل "بهینه‌سازی" استراتژی عصبی-عضلانی برای اجرای حرکت است.

یافته‌های این پژوهش نشان دادند که یک پروتکل کوتاه PAPE مبتنی بر جرم بدن، علاوه بر افزایش عملکرد انفجاری، با تغییرات مثبت در الگوهای هماهنگی بین‌بخشی همراه بود. این تغییرات بیانگر آماده‌سازی بهتر سیستم عصبی-عضلانی برای تولید نیروی هماهنگ‌تر در مفاصل لگن و زانو هستند. نکته قابل توجه آن است که تغییرپذیری هماهنگی (SD-CRP) کاهش نیافت؛ بنابراین، سیستم حرکتی توانست الگوی هماهنگ‌تری ایجاد کند بدون آنکه انعطاف‌پذیری طبیعی خود را از دست

بدهد. چنین وضعیتی در ادبیات بیومکانیک به عنوان «بهینه‌سازی عصبی-عضلانی» شناخته می‌شود، نه خشک شدن سیستم حرکتی.

از نظر ایمنی، نتایج نشان دادند که زاویه والگوس زانو افزایش نیافت و حتی کاهش جزئی غیرمعناداری مشاهده شد. این یافته نگرانی‌ها درباره افزایش ریسک مصدومیت پس از اجرای پروتکل‌های توان‌زایی را کاهش می‌دهد و احتمالاً ناشی از فعال‌سازی بهتر عضلات پایدارکننده مفصل زانو (مانند سرینی‌ها) است.

با این حال، باید توجه داشت که داده‌های کینتیکی (نیروهای عکس‌العمل زمین، گشتاورهای مفصلی) و فعالیت الکتریکی عضلات (EMG) در این مطالعه ثبت نشدند. بنابراین، نتیجه‌گیری درباره ایمنی و کاربرد رقابتی این پروتکل باید با احتیاط صورت گیرد. یافته‌های حاضر نویدبخش هستند، اما برای تأیید کامل نیاز به مطالعات تکمیلی با ابزارهای پیشرفته‌تر وجود دارد. از نظر ایمنی حرکتی، نتایج بسیار امیدوارکننده بودند. تغییرپذیری هماهنگی در شرایط PAPE کاهش نیافت. این موضوع حائز اهمیت است، زیرا کاهش تغییرپذیری می‌تواند سیستم حرکتی را خشک و آسیب‌پذیر کند (۸). حفظ سطح طبیعی تغییرپذیری نشان می‌دهد که سیستم عصبی انعطاف‌پذیری خود را برای انطباق با شرایط حفظ کرده است.

مهم‌تر از همه، زاویه والگوس زانو افزایش نیافت. این یافته به طور مستقیم نگرانی در مورد احتمال افزایش ریسک مصدومیت پس از استفاده از تکنیک‌های توان‌زایی را رفع می‌کند (۵). ممکن است فعال‌سازی بهتر عضلات پایدارکننده مفصل زانو (مانند عضلات سرینی) به کنترل بهتر حرکت در صفحه فرونتال کمک کرده باشد (۹، ۱۰). بنابراین، این پروتکل نه تنها بی‌خطر است، بلکه ممکن است از نظر بیومکانیکی حتی مفید نیز باشد.

نتیجه‌گیری

نتایج این تحقیق نشان داد که یک پروتکل افزایش عملکرد پس از فعال‌سازی مبتنی بر جرم بدن، یک استراتژی مؤثر و ایمن برای بهبود عملکرد انفجاری در بسکتبالیست‌های جوان است. این روش علاوه بر افزایش قد پرش، با بهینه‌سازی الگوهای هماهنگی بین‌بخشی، کیفیت حرکت را نیز بهبود می‌بخشد، بدون اینکه منجر به افزایش زاویه والگوس زانو یا کاهش انعطاف‌پذیری حرکتی شود. بنابراین، مریان می‌توانند با احتیاط و با توجه به شرایط ورزشکاران، از این پروتکل به‌عنوان بخشی از برنامه گرم کردن قبل از تمرین و مسابقه استفاده کنند.

ملاحظات اخلاقی

پیروی از اصول اخلاقی

این پژوهش مطابق با استانداردهای اخلاقی پذیرفته شده در تحقیقات مربوط به مشارکت کنندگان انسانی انجام شد. پیش از ورود به مطالعه، تمامی شرکت کنندگان اطلاعات کافی و روشن درباره اهداف، روش اجرا و الزامات پژوهش دریافت کردند و رضایت نامه آگاهانه کتبی خود را به صورت داوطلبانه ارائه دادند. همچنین، پروتکل مطالعه با توجه کامل به ایمنی شرکت کنندگان طراحی شد و هیچ خطر یا اثر نامطلوب قابل توجهی برای آنان پیش بینی نمی شد.

حامی مالی

این پژوهش هیچ گونه حمایت مالی یا بودجه‌ای از سوی سازمان‌های دولتی، تجاری یا غیرانتفاعی دریافت نکرده است.

مشارکت نویسندگان

تمامی نویسندگان به طور برابر در طراحی مطالعه، گردآوری و تحلیل داده‌ها، تفسیر نتایج و تدوین پیش نویس مقاله مشارکت داشته‌اند.

تعارض منافع

نویسنده اظهار می‌دارد که این پژوهش بدون هرگونه رابطه تجاری یا مالی که بتواند به عنوان تعارض منافع احتمالی تلقی شود، انجام شده است.

منابع

1. Liu L, Niu X, Zhou Z. Acute Effects of Different Conditioning Activities on the Post-Activation Performance Enhancement in Athletes' Jumping and Sprinting Performances: A Systematic Review and Meta-Analysis. *Applied Sciences* (2076-3417). 2024;14(20).
2. Williams AM, Ford P, Reilly T, Drust B. *Science and soccer*: Routledge London, UK; 2013.
3. Liu H, Kim S-J, Kim G-B, Yoo I-Y, Kim T-G. The Effects of Different Drop Jump Training on Post-Activation Performance Enhancement in Countermovement Jump: *The Korean Society of Sports Science*; 2025. 519-34 p.
4. O'Grady CJ, Fox JL, Dalbo VJ, Scanlan AT. A systematic review of the external and internal workloads experienced during games-based drills in basketball players. *International journal of sports physiology and performance*. 2020;15(5):603-16.
5. Hewett TE, Myer GD, Ford KR, Heidt Jr RS, Colosimo AJ, McLean SG, et al. Biomechanical measures of neuromuscular control and valgus loading of the knee predict anterior cruciate ligament injury risk in female athletes: a prospective study. *The American journal of sports medicine*. 2005;33(4):492-501.
6. Mercado-Palomino E, Richards J, Molina-Molina A, Benitez JM, Espa AU. Can kinematic and kinetic differences between planned and unplanned volleyball block jump-landings be associated with injury risk factors? *Gait & Posture*. 2020;79:71-9.
7. Usta HD, Ramanli B, Öksüzoglu AY. Acute Effect of Whole Body Vibration Training on Balance, Isokinetic Strength and Jump Performance: *Marwah Infotech*; 2020.

8. Seifert L, Carmigniani R. Coordination and stroking parameters in the four swimming techniques: a narrative review. *Sports Biomechanics*. 2023;22(12):1617-33.
9. Patterson CS, Asavasopon S, Gharibvand L, Powers CM. Influence of hip and lumbar extensor strength on lumbar moments during a squat lift: An evaluation of persons with and without low back pain: Elsevier BV; 2025. 106444- p.
10. Zamankhanpour M, Sheikh Hoseini R, Letafatkar A, Piri H, Asadi Melerdi S, Abdollahi S. The effect of dual-task on jump landing kinematics and kinetics in female athletes with or without dynamic knee valgus. *Scientific reports*. 2023;13(1):14305.
11. Croushore N, Wu Y, Ji X. Validation of A Single Camera Motion Analysis System for 3D Knee Kinematics in Vertical Jump: IEOM Society International; 2025.
12. Winter DA. *Biomechanics and motor control of human movement*: John Wiley & sons; 2009.
13. Hamill J, van Emmerik RE, Heiderscheit BC, Li L. A dynamical systems approach to lower extremity running injuries. *Clinical biomechanics*. 1999;14(5):297-308.
14. Garbisu-Hualde A, Santos-Concejero J. Post-activation potentiation in strength training: A systematic review of the scientific literature. *Journal of human kinetics*. 2021;78:141.
15. Rong W, Geok SK, Samsudin S, Zhao Y, Ma H, Zhang X. Effects of strength training on neuromuscular adaptations in the development of maximal strength: a systematic review and meta-analysis: Springer Science and Business Media LLC; 2025.
16. Struzik A, Karamanidis K, Lorimer A, Keogh JW, Gajewski J. Application of leg, vertical, and joint stiffness in running performance: A literature overview. *Applied Bionics and Biomechanics*. 2021;2021(1):9914278.
17. Aoki A, Koresawa K, No Y, Sadakiyo M, Kubota S, Gamada K. Biomechanical Risk Factors for Anterior Cruciate Ligament Injury in Young Female Basketball Players: A pilot Study. *medRxiv*. 2022:2022.07. 11.22277460.