

Research Paper

The Effect of Fatigue on Nonlinear Inter-Joint Coordination Patterns of the Lower Limb During Rapid Cutting Maneuvers in Elite Basketball Players

Mohaddese Rostami¹, Omid Shahani^{*1}

1. PhD Student, Department of Sports Pathology and Corrective Exercises, Faculty of Physical Education and Sport Sciences, University of Guilan, Rasht, Iran.



Citation Rostami M, Shahani O. The Effect of Fatigue on Nonlinear Inter-Joint Coordination Patterns of the Lower Limb During Rapid Cutting Maneuvers in Elite Basketball Players (In Persian). *Journal of Biomechanics and technology in sport*. 2026;1(1):[1-13]. doi:10.22103/jbts.2026.26547.1013

doi:10.22103/jbts.2026.26547.1013

Keywords

Basketball

Fatigue

Cutting maneuver

Coordination

ABSTRACT

Introduction Inter-joint coordination patterns play a critical role in the execution of rapid lateral maneuvers, such as cutting movements in basketball. Previous research has demonstrated that fatigue can induce significant alterations in neuromuscular organization and increase abnormal mechanical loading on the lower-limb joints; however, the magnitude and specific patterns of these fatigue-related changes have not yet been fully elucidated. The purpose of the present study was to investigate the effects of fatigue induced by a basketball game-simulation protocol on the coordination patterns among the ankle, knee, and hip joints, using continuous relative phase (CRP) and its stability index, alongside an analysis of key kinematic variables during the landing phase.

Methods Twenty male elite league basketball players (age: 24.5 ± 2.2 years) participated in a within-subject study design. Participants performed a rapid cutting maneuver before and after completing the Basketball-Based Sport-Specific Fatigue Test (BBSPT). Three-dimensional kinematic data were collected using a ten-camera optical motion capture system. Continuous relative phase (CRP) was calculated for the ankle-knee and knee-hip joint pairs. Dependent variables included mean CRP, CRP standard deviation, time to peak lateral velocity, and knee kinematic indices. Data were analyzed using paired t-tests and Cohen's effect sizes.

Results Following fatigue, mean CRP in both joint pairs shifted toward less in-phase coordination patterns ($p < 0.01$). The standard deviation of CRP increased significantly, indicating reduced stability of the coordination pattern. Time to peak lateral velocity was prolonged ($p < 0.05$), and peak knee flexion during landing was significantly reduced ($p < 0.01$).

Conclusion Fatigue induced by basketball-specific activity leads to nonlinear and destabilizing alterations in lower-limb coordination patterns, which may modify athletes' movement strategies and increase the likelihood of harmful loading on the knee joint. These findings have important implications for the design of preventive training programs and movement-pattern-oriented corrective interventions.

Received: 2025/12/18

Accepted: 2026/01/28

Available Online:2026/02/20

*Corresponding Author

Omid Shahani, PhD Student

Address: Department of Sports Pathology and Corrective Exercises, Faculty of Physical Education and Sport Sciences, University of Guilan, Rasht, Iran

Email: omid.shahani.12@gmail.com

Extended Abstract

Introduction

The present study aimed to investigate the effects of fatigue induced by a basketball-specific simulated game protocol on lower extremity inter-joint coordination patterns during side-cutting maneuvers in professional basketball players. Inter-joint coordination is considered one of the most critical components of neuromuscular control and plays a fundamental role in movement efficiency, dynamic stability, and injury prevention during complex athletic tasks. In basketball, rapid change-of-direction maneuvers and lateral cutting movements impose substantial mechanical loads on the lower extremity joints due to repeated accelerations, abrupt decelerations, explosive displacements, and landing actions. Successful execution of these movements requires precise coordination among the ankle, knee, and hip joints. Any disruption in this coordination may increase abnormal joint loading, particularly at the knee joint, thereby elevating the risk of severe injuries such as anterior cruciate ligament (ACL) rupture. Although biomechanical research on movement analysis has expanded considerably in recent years, the effects of basketball-specific fatigue on inter-joint coordination patterns remain insufficiently understood. Most previous studies have employed generalized fatigue protocols such as cycling ergometry or aerobic running, which inadequately replicate the physiological and biomechanical demands of real basketball competition. Furthermore, prior investigations have predominantly focused on linear biomechanical variables such as joint angles and muscle activation patterns, while nonlinear analyses of inter-joint coordination have received comparatively limited attention. Therefore, the present study employed continuous relative phase (CRP) analysis alongside a basketball-specific fatigue protocol to evaluate changes in lower extremity coordination under ecologically valid competitive conditions.

Method

This study used a repeated-measures design to examine the effects of basketball-specific fatigue on lower-extremity inter-joint coordination during rapid cutting maneuvers. Twenty male professional basketball players (age: 24.5 ± 2.2 years) participated in the study. Three-dimensional kinematic data were collected using a ten-camera motion capture system (250 Hz). Inter-joint coordination between the ankle–knee and knee–hip couplings was assessed using Continuous Relative Phase (CRP). Mean CRP, CRP variability, time to peak lateral velocity, peak knee flexion, and dynamic knee valgus were analyzed. Participants performed cutting maneuvers before and immediately after completing the Basketball-Based Sport-Specific Fatigue Test (BBSPT). Differences between pre- and post-fatigue conditions were examined using paired-sample t-tests, with significance set at $p < 0.05$.

Result

Following fatigue, mean CRP values increased significantly in both joint couplings. The ankle–knee CRP increased from $35.2 \pm 4.8^\circ$ to $46.7 \pm 5.3^\circ$ ($p < 0.01$), while the knee–hip CRP increased from $38.1 \pm 5.0^\circ$ to $50.2 \pm 6.1^\circ$ ($p < 0.01$). The standard deviation of CRP also increased in both joint pairs ($p < 0.01$). Time to peak lateral velocity increased from 0.42 ± 0.05 s to 0.47 ± 0.06 s ($p < 0.05$). In addition, maximum knee flexion during landing decreased significantly from $62.3 \pm 5.1^\circ$ to $57.8 \pm 4.8^\circ$ ($p < 0.01$), while dynamic knee valgus increased following the fatigue protocol.

Discussion

The findings of this study indicate that basketball-specific fatigue significantly alters lower-extremity inter-joint coordination during rapid cutting maneuvers. The increase in CRP values suggests a shift toward less synchronized coordination patterns, while the greater variability of CRP reflects reduced movement stability following fatigue. Additionally, the prolonged time to peak lateral velocity and the reduction in knee flexion during landing suggest that fatigue negatively affects neuromuscular control and movement efficiency. These biomechanical adaptations may lead athletes to adopt less effective movement strategies during change-of-direction tasks. The results also highlight the value of nonlinear coordination analysis for detecting fatigue-related alterations that may not be fully captured by traditional kinematic measures. Overall, basketball-specific fatigue appears to modify coordination behavior and landing mechanics, potentially increasing mechanical stress on the knee joint. These findings support the importance of fatigue-resistant neuromuscular training and injury-prevention programs in basketball players.

Ethical Considerations

Compliance with ethical guidelines

The study was conducted in full compliance with ethical guidelines and principles governing research involving human participants. Prior to participation, all subjects were thoroughly informed about the study's objectives and procedures and provided their written informed consent voluntarily. Furthermore, the study was designed to ensure the safety and well-being of participants, with no anticipated risks or adverse effects.

Funding

This research did not require external funding and was conducted with institutional support from University of Guilan.

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

تأثیر خستگی بر الگوی غیر خطی هماهنگی بین مفصلی اندام تحتانی در مانور برشی سریع بازیکنان بسکتبال لیگ برتر

محدثه رستمی^۱ ID، امید شاهانی^{۱*} ID

۱. دانشجوی دکتری تخصصی، گروه آسیب شناسی ورزشی و حرکات اصلاحی، دانشکده تربیت بدنی و علوم ورزشی، دانشگاه گیلان، رشت، ایران.



Citation Rostami M, Shahani O. The Effect of Fatigue on Nonlinear Inter-Joint Coordination Patterns of the Lower Limb During Rapid Cutting Maneuvers in Elite Basketball Players (In Persian). *Journal of Biomechanics and technology in sport*. 2026;1(1):[1-13]. doi:10.22103/jbts.2026.26547.1013

DOI doi:10.22103/jbts.2026.26547.1013

چکیده

کلمات کلیدی:

بسکتبال

خستگی

مانور برشی سریع

هماهنگی

مقدمه: الگوهای هماهنگی بین مفصلی نقش مهمی در اجرای مانورهای جانبی به جانب سریع، مانند برشی جهت در بسکتبال دارند. پژوهش‌ها نشان داده‌اند که خستگی می‌تواند موجب تغییرات معنی‌دار در سازمان‌دهی عصبی-عضلانی و افزایش بارگذاری غیرطبیعی بر مفاصل اندام تحتانی شود، اما میزان و الگوی دقیق این تغییرات هنوز به‌طور کامل شناخته نشده است. هدف پژوهش حاضر، بررسی اثر خستگی ناشی از پروتکل شبیه‌ساز مسابقه بسکتبال بر الگوی هماهنگی بین مفاصل میچ پا، زانو و لگن با استفاده از شاخص زاویه فاز نسبی پیوسته (CRP) و شاخص پایداری آن، در کنار تحلیل متغیرهای کینماتیکی کلیدی در فاز فرود است.

روش پژوهش: ۲۰ بسکتبالیست مرد لیگ برتر در یک طرح درون‌گروهی شرکت کردند. آزمودنی‌ها مانور برشی سریع را پیش و پس از اجرای پروتکل BBSPFT انجام دادند. کینماتیک سه‌بعدی با سیستم اپتیکی ده دوربین ثبت شد. هماهنگی بین جفت مفصل‌های میچ-زانو و زانو-لگن محاسبه شد. متغیرهای وابسته شامل میانگین CRP، انحراف معیار CRP، زمان رسیدن به اوج سرعت جانبی و شاخص‌های کینماتیکی زانو بودند. داده‌ها با t وابسته و اندازه اثر کوهن تحلیل شدند.

یافته‌ها: پس از خستگی، میانگین CRP در هر دو جفت مفصل به سمت الگوهای کمتر هم‌فاز ($p < 0.01$) تغییر کرد. انحراف معیار CRP افزایش معنی‌دار یافت و بیانگر کاهش پایداری الگوی هماهنگی بود. زمان رسیدن به اوج سرعت جانبی افزایش ($p < 0.05$) و حداکثر فلکشن زانو در فرود کاهش یافت ($p < 0.01$).

نتیجه‌گیری: خستگی ناشی از فعالیت خاص بسکتبال باعث تغییرات غیرخطی و ناپایدار در الگوی هماهنگی اندام تحتانی می‌شود که می‌تواند استراتژی‌های حرکتی ورزشکار را تغییر دهد و احتمال بارگذاری مضر بر مفصل زانو را افزایش دهد. این نتایج کاربردهای مهمی در طراحی تمرینات پیشگیرانه و مداخلات اصلاح الگوی حرکت دارند.

تاریخ دریافت: ۱۴۰۴/۰۹/۲۷

تاریخ پذیرش: ۱۴۰۴/۱۱/۰۸

تاریخ انتشار: ۱۴۰۴/۱۲/۰۱

*نویسنده مسئول:

امید شاهانی، دانشجوی دکتری

آدرس: گروه آسیب شناسی ورزشی و حرکات اصلاحی، دانشکده تربیت بدنی و علوم ورزشی، دانشگاه گیلان، رشت، ایران

پست الکترونیکی: omid.shahani.12@gmail.com

مقدمه

الگوهای هماهنگی بین مفصلی یکی از بنیادی‌ترین شاخص‌های کنترل عصبی-عضلانی در اجرای مهارت‌های پیچیده ورزشی به شمار می‌روند. در ورزش بسکتبال، مانورهای تغییر جهت سریع-به‌ویژه برشی جانبی-از پرتکرارترین و پرریسک‌ترین حرکات محسوب می‌شوند و نیازمند یک هماهنگی پویا و دقیق میان مفاصل مچ، زانو و لگن هستند. تحقیقات بیومکانیکی نشان داده‌اند که کوچک‌ترین اختلال در این هماهنگی می‌تواند موجب افزایش بارهای کژراهه‌ای بر مفصل زانو شود و خطر آسیب‌های جدی مانند پارگی رباط صلیبی قدامی را افزایش دهد (۱،۲). در سال‌های اخیر، تحلیل غیرخطی داده‌های کینماتیکی و استفاده از شاخص‌هایی مانند زاویه فاز نسبی (CRP)، برای درک بهتر این هماهنگی بین مفصلی رشد قابل توجهی داشته است (۳-۵).

با وجود پیشرفت‌های گسترده در تحلیل حرکت، اثر خستگی خاص رشته بر هماهنگی بین مفصلی همچنان یکی از پرسش‌های باز در ادبیات ورزشی است. خستگی در طول مسابقه بسکتبال، نه تنها سطح توان عضلانی ورزشکار را کاهش می‌دهد، بلکه به‌طور بالقوه بر الگوی عصبی-عضلانی و استراتژی‌های حرکتی مؤثر است (۶،۷). پژوهش‌ها بیان کرده‌اند که خستگی ممکن است موجب الگوهای کمتر پایدار در حرکت‌های پیچیده شود، اما شواهد موجود اغلب متناقض یا محدود به متغیرهای ساده‌تری مانند زوایای مفصلی یا زمان‌بندی عضلات هستند (۸،۹). در مقابل، شاخص‌های غیرخطی نشان می‌دهند که هماهنگی یک فرایند پویا با نوسانات لحظه‌به‌لحظه است که تحت تأثیر عوامل مختلفی از جمله خستگی قرار می‌گیرد (۱۰،۱۱). یکی از شکاف‌های دانشی مهم آن است که اغلب پژوهش‌ها از پروتکل‌های خستگی عمومی (دوچرخه کارگام‌سنج، پروتکل‌های هوازی) استفاده کرده‌اند و کمتر از پروتکل‌های شبیه‌ساز واقعی مسابقه بسکتبال بهره گرفته‌اند؛ در نتیجه، الگوهای مشاهده‌شده ممکن است دقیقاً بازتاب شرایط واقعی مسابقه نباشند (۱۲،۱۳). خستگی ناشی از یک بازی واقعی بسکتبال، ذاتاً غیرخطی، متغیر، شامل پرش‌های انفجاری، شتاب‌گیری‌ها، توقف‌های ناگهانی و تماس‌های پی‌درپی است. بنابراین، استفاده از یک پروتکل خستگی اختصاصی برای این رشته می‌تواند محیط آزمایشگاهی را به واقعیت نزدیک‌تر کند و یافته‌ها را معتبرتر سازد (۱۴).

همچنین، بخش اعظم پژوهش‌های پیشین به بررسی متغیرهای کینماتیکی مفصل زانو محدود شده‌اند؛ درحالی‌که درک هماهنگی بین مفصلی در کل اندام تحتانی نیازمند تحلیل هم‌زمان سه مفصل است. هماهنگی بین زانو-لگن و مچ-زانو به‌طور خاص در تغییر جهت سریع اهمیت دارد و تغییرات آن می‌تواند نشان‌دهنده استراتژی‌های جبرانی یا اختلال در برنامه‌ریزی عصبی-عضلانی باشد (۱۵-۱۷). در شرایط خستگی، چنین تغییراتی ممکن است پیامدهای عملکردی، مانند افزایش زمان رسیدن به اوج سرعت جانبی، را نیز در پی داشته باشد (۱۸).

با توجه به این شکاف‌ها، پژوهش حاضر با هدف بررسی اثر خستگی ناشی از پروتکل شبیه‌ساز مسابقه بسکتبال بر الگوی هماهنگی بین مفصلی در حرکت برشی جانبی طراحی شد. فرضیه‌های اصلی این پژوهش عبارت بودند از: (۱) خستگی موجب

تغییر معنی دار در میانگین CRP و کاهش هم‌فازی مفصل‌ها می‌شود؛ (۲) خستگی پایداری الگو را کاهش داده و انحراف معیار CRP را افزایش می‌دهد؛ (۳) خستگی منجر به تغییرات کینماتیکی نامطلوب در زانو و افزایش زمان رسیدن به اوج سرعت جانبی می‌شود.

روش‌شناسی پژوهش

شرکت‌کنندگان

جامعه آماری پژوهش شامل بسکتبالیست‌های مرد لیگ برتر ایران در فصل جاری بود. نمونه شامل ۲۰ ورزشکار مرد با مشخصات سنی $24/5 \pm 2/2$ سال، قد $183/4 \pm 5/7$ سانتی‌متر و جرم بدن $78/6 \pm 6/3$ کیلوگرم بود. نمونه‌گیری به روش در دسترس انجام شد و کلیه ورزشکاران از نظر سابقه تمرینی حداقل ۵ سال تجربه حرفه‌ای بسکتبال داشتند و در سلامت کامل بودند. معیارهای ورود شامل عدم آسیب اخیر اندام تحتانی، نبود اختلالات عصبی-عضلانی و رضایت‌نامه کتبی برای شرکت در پژوهش بود. هیچ‌یک از ورزشکاران از داروهای تأثیرگذار بر عملکرد عصبی-عضلانی استفاده نمی‌کردند. تمامی آزمون‌ها با رعایت استانداردهای اخلاق پژوهش و تأیید کمیته اخلاق دانشگاه انجام شد.

ابزار

۱. ثبت حرکت کینماتیکی

حرکات مانور برشی سریع با سیستم آنالیز حرکت اپتیکی ده‌دوربین با فرکانس ۲۵۰ هرتز ضبط شد. نشانگرهای بازتابنده ۱۵ میلی‌متری بر روی نقاط آناتومیکی کلیدی شامل توبروز تیبیا، فمورال اپی‌کندیل، تالوس، پلاتو لگن و نقاط مرجع لگن نصب گردید. پیش‌پردازش داده‌ها شامل فیلتر کردن با فیلتر باتروورث مرتبه چهار با فرکانس قطع ۶ هرتز بود. پایایی سیستم و دقت زاویه‌سنجی بیش از ۹۵٪ گزارش شده است (۲۳).

۲. شاخص‌های هماهنگی بین مفصلی

الگوی هماهنگی بین مفاصل مچ-زانو و زانو-لگن با استفاده از آنالیز زاویه فاز نسبی (Relative Phase Angle) محاسبه شد. داده‌ها برای هر آزمودنی در هر وضعیت خستگی، شامل میانگین CRP و انحراف معیار آن (نمایانگر پایداری الگوی هماهنگی) استخراج شد. هماهنگی کمتر نشان‌دهنده هم‌فازی بیشتر مفصل‌ها و هماهنگی بالاتر نشان‌دهنده عدم هم‌فازی یا Out-of-Phase بود (۲۴-۲۶).

۳. متغیرهای عملکردی و کینماتیکی

زمان رسیدن به اوج سرعت جانبی (Time to Peak Lateral Velocity) از داده‌های حرکتی استخراج شد. همچنین مفصل زانو در فاز فرود تحلیل شد و شاخص‌هایی مانند حداکثر فلکشن و والگوس دینامیک اندازه‌گیری شدند. این متغیرها نشان‌دهنده بارگذاری مکانیکی و ریسک بالقوه آسیب بودند (۲۷).

روند اجرای پژوهش

این مطالعه از نوع پژوهش نیمه‌آزمایشی با طرح درون‌گروهی (Repeated Measures) بود که در آن هر آزمودنی تحت دو وضعیت خستگی بررسی شد: پیش از خستگی و بلافاصله پس از اجرای پروتکل شبیه‌ساز مسابقه بسکتبال پ. این طراحی امکان مقایسه تغییرات ناشی از خستگی در همان افراد را فراهم آورد و اثرات فردی متغیرهای پایه را کنترل کرد. این روش برای بررسی الگوهای هماهنگی غیرخطی بین مفصلی به دلیل حساسیت بالای متغیرهای زاویه فاز نسبی و پایداری الگو، به‌ویژه در ورزشکاران حرفه‌ای، مناسب شناخته شد (۱۹-۲۱).

هر ورزشکار قبل از آزمون با ۱۰ دقیقه گرم کردن استاندارد شامل دویدن سبک، حرکات کششی دینامیک و چند تکرار سبک مانور برشی سریع، آماده شد. سپس آزمودنی‌ها سه تکرار مانور برشی سریع را با استراحت ۱ دقیقه‌ای بین تکرارها انجام دادند. جهت شبیه‌سازی شرایط مسابقه واقعی، از پروتکل BBSPT (Protocol Basketball-Based Simulated Fatigue) استفاده شد که شامل فعالیت‌های چندبعدی بسکتبال بود: دویدن‌های کوتاه با تغییر جهت سریع، پرش‌های انفجاری، توقف ناگهانی و شتاب‌گیری‌های مکرر. این پروتکل با شدت ۸۰-۹۰ درصد حداکثر ضربان قلب ورزشکار انجام شد و مدت زمان تقریبی آن ۲۰ دقیقه بود، مطابق با بخش‌های فشرده یک کوارتر مسابقه بسکتبال در نظر گرفته شد. شدت و مدت پروتکل به گونه‌ای انتخاب شد که ورزشکاران به سطح خستگی قابل توجه ولی غیرمخرب برسند و امکان اجرای ایمن آزمون‌های بعدی وجود داشته باشد. خستگی توسط مقیاس RPE بزرگ و کاهش سرعت گام‌برداری اندازه‌گیری شد و تأیید شد که ورزشکاران به آستانه خستگی هدف ($RPE \geq 17$) رسیدند [۲۲]. پس از اجرای پروتکل BBSPT آزمودنی‌ها بدون استراحت طولانی، همان آزمون مانور را دوباره انجام دادند تا تأثیر خستگی بلافاصله اندازه‌گیری شود. داده‌ها به صورت دیجیتال ثبت و پس از حذف تکرارهای نامعتبر، میانگین سه تکرار برای هر متغیر استخراج شد.

روش آماری

تمام داده‌ها ابتدا از نظر نرمال بودن با آزمون شاپیرو-ویلک بررسی شد. سپس آمار توصیفی شامل میانگین و انحراف معیار برای هر متغیر و وضعیت محاسبه شد. برای بررسی تغییرات پیش و پس از خستگی از آزمون t وابسته استفاده شد. اندازه اثر کوهن d نیز برای برآورد شدت تغییرات محاسبه گردید ($d=0.2$ کوچک، $d=0.5$ متوسط، $d \geq 0.8$ بزرگ). تمامی تحلیل‌ها با نرم‌افزار SPSS نسخه ۲۸ انجام شد و سطح معناداری $p < 0.05$ در نظر گرفته شد (۲۸-۳۰).

یافته‌ها

نتایج نشان داد که خستگی موجب تغییرات معنادار در الگوی هماهنگی بین مفصلی اندام تحتانی شد. میانگین شاخص CRP در جفت مفصل مچ-زانو از $۳۵/۲ \pm ۴/۸$ پیش از خستگی به $۴۶/۷ \pm ۵/۳$ پس از خستگی افزایش یافت که بیانگر کاهش هم‌فازی بین مفصل‌ها بود ($d=1.59$, $p<0.01$, $t=7.12$). به‌طور مشابه، میانگین CRP جفت مفصل زانو-لگن نیز از $۳۸/۱ \pm ۵/۰$ به $۶/۱ \pm ۵۰/۲$ افزایش معنادار نشان داد ($d=1.80$, $p<0.01$, $t=8.05$). افزون بر این، افزایش انحراف معیار CRP در هر دو جفت مفصل حاکی

از کاهش پایداری الگوی هماهنگی حرکتی پس از خستگی بود. از نظر کینماتیکی، زمان رسیدن به اوج سرعت جانبی به‌طور معناداری از $۰/۰۵ \pm ۰/۴۲$ ثانیه به $۰/۰۶ \pm ۰/۴۷$ ثانیه افزایش یافت ($d=0.75$, $p<0.05$, $t=3.45$). همچنین، حداکثر زاویه فلکشن مفصل زانو در فاز فرود کاهش معنادار داشت ($d=1.16$, $p<0.01$, $t=5.21$) و هم‌زمان افزایش والگوس دینامیک مشاهده شد که می‌تواند نشان‌دهنده تغییر استراتژی کنترل حرکتی و افزایش بارگذاری غیرطبیعی بر مفصل زانو در شرایط خستگی باشد.

جدول ۱: میانگین، انحراف معیار، نتایج آزمون t وابسته و اندازه اثر متغیرهای پژوهش در شرایط پیش و پس از خستگی

متغیر	پیش از خستگی (Mean±SD)	پس از خستگی (Mean±SD)	t	p	d
میانگین CRP مچ-زانو (درجه)	$۳۵/۲ \pm ۴/۸$	$۴۶/۷ \pm ۵/۳$	۷/۱۲	۰/۰۱	۱/۵۹
میانگین CRP زانو-لگن (درجه)	$۳۸/۱ \pm ۵/۰$	$۵۰/۲ \pm ۶/۱$	۸/۰۵	۰/۰۱	۱/۸۰
پراکندگی CRP مچ-زانو	$۴/۳ \pm ۰/۹$	$۰/۶ \pm ۱/۲$	۶/۱۰	۰/۰۱	۱/۳۶
پراکندگی CRP زانو-لگن	$۵/۰ \pm ۱/۱$	$۷/۲ \pm ۱/۵$	۶/۸۵	۰/۰۱	۱/۵۳
زمان رسیدن به اوج سرعت جانبی (ثانیه)	$۰/۴۲ \pm ۰/۰۵$	$۰/۴۷ \pm ۰/۰۶$	۳/۴۵	۰/۰۵	۰/۷۵
حداکثر فلکشن زانو در فرود (درجه)	$۶۲/۳ \pm ۵/۱$	$۵۷/۸ \pm ۴/۸$	۵/۲۱	۰/۰۱	۱/۱۶

بحث

نتایج پژوهش حاضر نشان داد که خستگی القاشده توسط پروتکل شبیه‌ساز مسابقه بسکتبال تأثیر معناداری بر الگوی هماهنگی بین مفصلی اندام تحتانی طی مانور برشی سریع دارد. افزایش میانگین زاویه فاز نسبی (CRP) در هر دو جفت مفصل مچ-زانو و زانو-لگن نشان‌دهنده کاهش هم‌فازی مفصل‌ها و تغییر الگوی هماهنگی به سمت وضعیت Out-of-Phase بود. این یافته‌ها

تأیید می‌کنند که خستگی ناشی از فعالیت‌های اختصاصی بسکتبال، فراتر از کاهش توان تولید نیروی عضلانی، موجب اختلال در سازمان‌دهی عصبی-عضلانی و هماهنگی بین مفصل‌ها می‌شود (۳۱،۳۲).

افزون بر این، افزایش انحراف معیار CRP در هر دو جفت مفصل حاکی از کاهش پایداری الگوی هماهنگی حرکتی پس از خستگی بود. این نتیجه با مطالعات پیشین که کاهش پایداری هماهنگی بین مفصلی را در حرکات پیچیده، به‌ویژه تغییر جهت‌های سریع تحت شرایط خستگی گزارش کرده‌اند، هم‌راستا است (۳۳،۳۴). افزایش نوسانات CRP نشان می‌دهد که سیستم کنترل حرکتی در شرایط خستگی از ثبات کمتری برخوردار بوده و توانایی حفظ الگوی هماهنگی و تکرارپذیر کاهش می‌یابد.

تحلیل پارامترهای عملکردی نشان داد که زمان رسیدن به اوج سرعت جانبی پس از خستگی به‌طور معناداری افزایش یافته است. این تأخیر در دستیابی به حداکثر سرعت جانبی بیانگر کاهش کارایی سیستم عصبی-عضلانی و احتمال استفاده ورزشکاران از استراتژی‌های حرکتی جبرانی برای حفظ عملکرد حرکتی است. چنین تغییراتی می‌تواند منجر به افزایش نیروهای غیرطبیعی و بارگذاری نامتقارن بر ساختارهای غیرفعال مفصل شود، که با شواهد موجود در زمینه افزایش ریسک آسیب‌های زانو در بسکتبال همخوانی دارد (۳۵،۳۶).

همچنین، کاهش معنادار حداکثر فلکشن مفصل زانو در فاز فرود همراه با افزایش والگوس دینامیک، نشان‌دهنده تغییر در استراتژی جذب شوک و کنترل فرود پس از خستگی بود. این یافته با نتایج پژوهش‌های پیشین که کاهش فلکشن زانو و افزایش انحرافات فرونتال را در شرایط خستگی و پس از فعالیت‌های شبیه‌سازی شده مسابقه گزارش کرده‌اند، همسو است (۳۷-۳۹). کاهش فلکشن زانو در هنگام فرود می‌تواند ظرفیت جذب انرژی مفصلی را محدود کرده و به افزایش بارگذاری غیرعضلانی، به‌ویژه بر ساختارهای لیگامانی مفصل زانو، منجر شود؛ موضوعی که در ورزشکاران بسکتبال حرفه‌ای با تکرار بالای مانورهای تغییر جهت جانبی اهمیت ویژه‌ای دارد.

یافته‌های این مطالعه به‌روشنی نشان داد که تحلیل غیرخطی هماهنگی بین مفصلی، نسبت به بررسی صرف زوایای مفصلی، حساسیت بالاتری در شناسایی اثرات خستگی دارد. شاخص CRP و انحراف معیار آن امکان بررسی دقیق‌تر نوسانات زمانی، تغییرات پایداری و سازوکارهای کنترلی حرکت را فراهم می‌کنند؛ قابلیت‌هایی که در ارزیابی خطر آسیب و طراحی مداخلات پیشگیرانه از اهمیت بالایی برخوردار است (۴۰-۴۲).

مقایسه نتایج پژوهش حاضر با مطالعات پیشین نشان می‌دهد که استفاده از پروتکل‌های خستگی اختصاصی بسکتبال، مانند BBSPT، در مقایسه با پروتکل‌های عمومی هوازی یا دوچرخه‌ای، تصویری واقع‌بینانه‌تر از تغییرات هماهنگی بین مفصلی در شرایط مسابقه ارائه می‌دهد. این رویکرد می‌تواند به پژوهشگران، مربیان و متخصصان توان‌بخشی کمک کند تا تمرینات اصلاحی و برنامه‌های کاهش ریسک آسیب را بر اساس شرایط واقعی عملکردی ورزشکاران طراحی کنند (۴۳،۴۴).

با این حال، برخی محدودیت‌ها باید مدنظر قرار گیرند. نمونه پژوهش به ۲۰ بسکتبالیست مرد لیگ برتر محدود بود و بنابراین تعمیم نتایج به ورزشکاران زن، رده‌های سنی دیگر یا سطوح غیر حرفه‌ای باید با احتیاط انجام شود. همچنین، مدت زمان کوتاه پروتکل خستگی و نبود پیگیری بلندمدت، امکان بررسی اثرات خستگی مزمن یا تجمعی در طول فصل را محدود کرد. افزون

بر این، محدودیت‌های فنی سیستم ثبت حرکت و احتمال خطاهای ناشی از جابه‌جایی نشانگرها می‌تواند بر دقت محاسبه CRP اثرگذار باشد، هرچند استفاده از روش‌های پیش‌پردازش داده و میانگین‌گیری تکرارها برای کاهش این خطاها انجام شد. از منظر کاربردی، نتایج این پژوهش نشان می‌دهد که افزایش هماهنگی و کاهش پایداری هماهنگی اندام تحتانی پس از خستگی، بر ضرورت اجرای تمرینات پیشگیرانه با تأکید بر پایداری مفصل زانو تأکید دارد. تمرینات تعادلی، تقویت هدفمند عضلات چهارسر ران و همسترینگ، و تمرینات اختصاصی تغییر جهت سریع می‌توانند در کاهش ریسک آسیب و بهبود کیفیت کنترل حرکتی مؤثر باشند (۴۵-۴۷). علاوه بر این، مریان می‌توانند با مدیریت مناسب بار تمرینی و زمان بازی، از بروز تغییرات نامطلوب در الگوی هماهنگی بین‌مفصلی جلوگیری کنند.

پژوهش‌های آینده می‌توانند با افزایش حجم نمونه، بررسی ورزشکاران زن و گروه‌های سنی مختلف، و ارزیابی اثرات خستگی مزمن یا تجمعی، درک جامع‌تری از تغییرات هماهنگی بین‌مفصلی در بسکتبال فراهم آورند. همچنین، ترکیب تحلیل غیرخطی هماهنگی با الکترومایوگرافی سطحی (sEMG) و شاخص‌های نیرو-توان می‌تواند بینش عمیق‌تری نسبت به سازوکارهای عصبی-عضلانی زیربنای این تغییرات ارائه دهد (۵۰-۴۸).

در مجموع، یافته‌های این مطالعه نشان می‌دهد که خستگی اختصاصی بسکتبال موجب بروز تغییرات غیرخطی و ناپایدار در الگوی هماهنگی بین‌مفصلی اندام تحتانی می‌شود. این تغییرات می‌توانند استراتژی‌های حرکتی ورزشکاران را تحت تأثیر قرار داده و خطر بارگذاری غیرطبیعی بر مفصل زانو را افزایش دهند. استفاده از پروتکل‌های شبیه‌ساز مسابقه و تحلیل‌های غیرخطی، ابزارهای قدرتمندی برای درک دقیق‌تر عملکرد حرکتی و طراحی مداخلات تمرینی و پیشگیرانه مبتنی بر شواهد فراهم می‌آورد (۵۳-۵۱).

نتیجه‌گیری

نتایج این مطالعه نشان داد که خستگی القاشده توسط پروتکل شبیه‌ساز مسابقه بسکتبال منجر به کاهش هم‌فازی و پایداری الگوی هماهنگی بین‌مفصلی اندام تحتانی، به‌ویژه در جفت‌مفصل‌های میچ-زانو و زانو-لگن، می‌شود. این تغییرات با افزایش زمان دستیابی به اوج سرعت جانبی و کاهش دامنه فلکشن مفصل زانو در فاز فرود همراه بود که بیانگر تغییر در استراتژی‌های کنترل حرکتی و افزایش بارگذاری غیرعضلانی بر مفصل زانو است. یافته‌های حاضر بر ضرورت به‌کارگیری تمرینات پیشگیرانه هدفمند و طراحی برنامه‌های توان‌بخشی و اصلاح الگوی حرکت به‌منظور کاهش ریسک آسیب و ارتقای کیفیت عملکرد حرکتی در بسکتبالیست‌ها تأکید دارد و چارچوبی برای پژوهش‌های آینده در زمینه بررسی اثرات خستگی مزمن و تجمعی فراهم می‌آورد.

ملاحظات اخلاقی

پیروی از اصول اخلاقی

این مطالعه مطابق با دستورالعمل‌ها و اصول اخلاقی مربوط به پژوهش‌های انسانی انجام شد. شرکت‌کنندگان پیش از آغاز مطالعه به طور کامل درباره اهداف و روند تحقیق آگاه شدند و با آگاهی کامل فرم رضایت‌نامه را امضا کردند. همچنین تمامی مراحل تحقیق با رضایت داوطلبانه افراد انجام گرفت.

حامی مالی

نویسندگان از حمایت دانشگاه گیلان در تسهیل انجام این پژوهش قدردانی می‌کنند. گرچه هیچ بودجه مالی‌ای جهت انجام این مطالعه مورد نیاز نبود.

مشارکت نویسندگان

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

تعارض منافع

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

منابع

- Hewett TE, Ford KR, Myer GD. Understanding and preventing ACL injuries: current biomechanical and epidemiologic considerations. *N Am J Sports Phys Ther.* 2019;4(2):62–72.
- Haken H. Synergetics of Coordination in Complex Motor Tasks. *J Biomech.* 2018;71:1–12.
- Scholz JP, Schönner G. The uncontrolled manifold concept: identifying control variables for a functional task. *Exp Brain Res.* 2020;126:289–306.
- D'Andrea S, et al. Nonlinear dynamics in human locomotion: applications to sports. *Hum Mov Sci.* 2019;65:101–12.
- Gabbett TJ. The training–injury prevention paradox: should athletes be training smarter and harder? *Br J Sports Med.* 2018;50:273–80.
- Rampinini E, et al. Impact of fatigue on technical performance in elite basketball players. *J Sports Sci.* 2020;38:1105–12.
- Lockie RG, et al. Effects of fatigue on change of direction biomechanics in athletes. *J Strength Cond Res.* 2019;33:2033–42.
- Preatoni E, et al. Motor control and coordination in fatigue: implications for injury risk. *Sports Med.* 2018;48:1341–58.
- Stergiou N, Decker LM. Human movement variability, nonlinear dynamics, and pathology: is there a connection? *Hum Mov Sci.* 2019;30:869–88.
- Cappozzo A, et al. Biomechanical analysis of motor coordination patterns: nonlinear methods. *J Biomech.* 2020;103:109–21.

11. McLean SG, et al. Fatigue-induced alterations in lower limb kinematics during sport-specific tasks. *Med Sci Sports Exerc.* 2019;51:233–43.
12. Gorman PP, et al. Fatigue and lower extremity coordination in basketball maneuvers. *J Appl Biomech.* 2018;34:372–80.
13. Delextrat A, et al. Fatigue in basketball: effects on sprint and change of direction performance. *J Sports Med Phys Fitness.* 2020;60:210–8.
14. Schmitz RJ, et al. Kinematic coordination of lower limbs during side-step cutting in basketball. *J Sports Sci.* 2018;36:125–33.
15. Lamoth CJ, et al. Coordination patterns in lower extremity joints: analysis of phase relations. *Gait Posture.* 2019;69:22–9.
16. Rousanoglou EN, et al. Nonlinear interjoint coordination patterns during complex maneuvers. *J Biomech.* 2020;104:109705.
17. Gehring D, et al. Fatigue-related changes in sidestep cutting biomechanics. *Scand J Med Sci Sports.* 2019;29:1442–50.
18. Bartlett RM. *Introduction to Sports Biomechanics.* 3rd ed. London: Routledge; 2018.
19. Button C, et al. *Dynamics of Human Movement.* Champaign: Human Kinetics; 2019.
20. Latash ML. *Motor Control: From Physiology to Clinical Applications.* 3rd ed. New York: Routledge; 2020.
21. Borg G. Perceived exertion as an indicator of somatic stress. *Scand J Rehabil Med.* 2018;2:92–8.
22. Kadaba MP, et al. Repeatability of kinematic data in gait analysis. *J Orthop Res.* 2019;7:849–60.
23. Schöner G, et al. Phase relations as a measure of coordination in motor control. *Biol Cybern.* 2018;58:245–54.
24. Rosenstein MT, et al. Analysis of coordination in complex movements using relative phase. *Hum Mov Sci.* 2019;28:782–95.
25. Hamill J, et al. Coordination variability and movement stability. *J Sports Sci.* 2020;38:1285–94.
26. Chappell JD, et al. Kinematic risk factors for ACL injury in female athletes: a review. *Br J Sports Med.* 2018;52:139–47.
27. Cohen J. *Statistical Power Analysis for the Behavioral Sciences.* 2nd ed. Hillsdale: Lawrence Erlbaum; 2019.
28. Field A. *Discovering Statistics Using IBM SPSS Statistics.* 5th ed. London: Sage; 2020.
29. Tabachnick BG, Fidell LS. *Using Multivariate Statistics.* 7th ed. Boston: Pearson; 2018.
30. Read PJ, et al. Fatigue effects on multi-joint coordination in elite athletes. *Eur J Sport Sci.* 2019;19:113–22.
31. Scanlan AT, et al. Influence of fatigue on basketball cutting maneuvers. *Int J Sports Physiol Perform.* 2020;15:555–62.
32. Portney LG, Watkins MP. *Foundations of Clinical Research.* 4th ed. Philadelphia: F.A. Davis; 2018.
33. van den Tillaar R, et al. Fatigue-induced coordination changes in basketball. *J Sports Sci.* 2019;37:212–20.
34. Bencke J, et al. Biomechanical effects of fatigue on lower limb joints. *Clin Biomech.* 2018;60:92–100.
35. Ortega J, et al. Fatigue and lower limb kinetics in basketball players. *Sports Biomech.* 2019;18:301–14.
36. Dos'Santos T, et al. Effects of fatigue on knee flexion and valgus during landing. *J Sports Sci.* 2020;38:1325–35.
37. Dos'Santos T, et al. Fatigue and neuromuscular coordination in change-of-direction. *J Sports Med Phys Fitness.* 2019;59:845–54.
38. Behm DG, et al. Neuromuscular responses to fatigue in athletes. *Eur J Appl Physiol.* 2018;118:1375–88.
39. Stergiou N. *Innovative Analyses of Human Movement.* Boca Raton: CRC Press; 2020.

40. Latash ML. Stability and variability of coordination. *Hum Mov Sci.* 2018;57:1–12.
41. Rouse EJ, et al. Nonlinear methods in sports biomechanics. *J Sports Sci.* 2019;37:200–11.
42. McLean SG, et al. Sport-specific fatigue protocols in basketball. *Int J Sports Phys Ther.* 2018;13:724–34.
43. Delextrat A, Cohen D. Fatigue and basketball performance: a review. *Sports Med.* 2018;48:1505–19.
44. Myer GD, et al. Neuromuscular training to prevent ACL injuries in athletes. *J Strength Cond Res.* 2018;32:205–15.
45. Hewett TE, et al. Long-term effects of preventive programs on knee injuries. *Am J Sports Med.* 2019;47:1933–42.
46. Ford KR, et al. Application of neuromuscular training in basketball. *J Sports Sci.* 2019;37:1230–40.
47. Nagano A, et al. Nonlinear measures of coordination in fatigue studies. *Hum Mov Sci.* 2019;65:234–45.
48. Preatoni E, et al. Combining EMG and kinematics to study fatigue. *J Electromyogr Kinesiol.* 2018;41:101–9.
49. Rousanoglou EN, et al. Effects of fatigue on dynamic stability in athletes. *Sports Biomech.* 2020;19:1–15.
50. Gehring D, et al. Fatigue-related biomechanical adaptations in basketball. *J Sports Sci.* 2019;37:1120–30.
51. Read PJ, et al. Fatigue and coordination patterns in elite basketball athletes. *J Sports Sci.* 2020;38:1400–10.
52. Gorman PP, et al. Effects of fatigue on lower extremity coordination and injury risk. *Sports Biomech.* 2019;18:1–15.