

Research Paper



Biomechanical Changes of the Knee During Jump-Landing Tasks: A Longitudinal Study of Military Cadets at Imam Ali (AS) University

*Hamid Omid¹ , Reza Sabzevari Rad¹ , Moosareza Ghorbani²

1. Department of Physical Education and Sport Sciences, Faculty of Command and management, Imam Ali Military' University, Tehran, Iran.
2. Department of Sport Injuries and Corrective Exercise, Faculty of Physical Education and Sport Sciences, University of Guilan, Rasht, Iran.



Citation: Omid H, Sabzevari Rad R, Ghorbani M. Biomechanical Changes of the Knee During Jump-Landing Tasks: A Longitudinal Study of Military Cadets at Imam Ali (AS) University. Journal of Sport Biomechanics.2026;11(4):424-437. <https://doi.org/10.61882/JSportBiomech.11.4.424>

<https://doi.org/10.61882/JSportBiomech.11.4.424>



Article Info:

Received: 20 July 2025

Accepted: 26 Sep. 2025

Available Online: 5 Oct. 2025

Keywords:

Anterior cruciate ligament,
Military training, Jump-
landing, Biomechanics

ABSTRACT

Objective This study aimed to examine changes in knee flexion and abduction angles among military cadets at Imam Ali (AS) University during a jump-landing task following a period of intensive military training. Given the high prevalence of anterior cruciate ligament (ACL) injuries in military personnel and the influence of movement patterns on such injuries, this research sought to identify biomechanical adaptations resulting from military training.

Methods In this quasi-experimental study, 30 male cadets (mean age: 19.71 ± 2.30 years; height: 182.66 ± 6.21 cm; weight: 71.83 ± 7.71 kg) were assessed in two phases: a pre-test at the beginning of their first academic year and a post-test at the end of the year. A standardized jump-landing protocol was used. Kinematic data were collected using two Canon cameras (120 Hz) positioned in the frontal and sagittal planes and analyzed with Kinovea software (version 2.0). Knee flexion and abduction angles were measured at two critical moments: initial ground contact (first frame of foot-surface contact) and peak flexion (frame showing maximum knee flexion). Data were analyzed using two-way repeated-measures ANOVA in SPSS version 25.

Results Significant biomechanical changes in landing mechanics were observed. In the dominant leg, knee flexion at peak landing decreased significantly from 96.26° to 87.27° ($p = 0.028$), while knee abduction increased from 12.32° to 17.44° ($p = 0.007$). These changes were less pronounced in the non-dominant leg (flexion: 93.50° to 89.48° ; abduction: 13.95° to 15.48°). A significant time $\times$ leg interaction ($F = 5.12$, $p = 0.028$) indicated the development of asymmetrical movement patterns after training.

Conclusion Intensive military training induces potentially risky biomechanical adaptations, particularly reduced flexion and increased abduction in the dominant knee, which may elevate ACL injury risk. Incorporating proper landing techniques and neuromuscular training into military programs is recommended to mitigate these risks.

* Corresponding Author:

Hamid Omid

Address: Department of Physical Education and Sport Sciences, Faculty of Command and management, Imam Ali Military' University, Tehran, Iran.

E-mail: hamidomidi63@gmail.com

This is an open access article under the terms of the [Creative Commons Attribution License \(CC BY 4.0\)](https://creativecommons.org/licenses/by/4.0/), which permits unrestricted use, distribution, and reproduction in any medium, provided the original work is properly cited.

© 2026 The Author(s). Journal of Sport Biomechanics published by Islamic Azad University, Hamedan Branch.

Extended Abstract

1. Introduction

The combat readiness and stability of a nation are closely tied to the physical fitness and tactical preparedness of its military forces. Historically, soldiers' physical conditioning has been a decisive factor in determining battlefield outcomes. Modern military personnel undergo rigorous training programs that include combat drills, endurance running, loaded marches, obstacle navigation, rappelling, climbing, marksmanship, and repetitive jumping—activities that far exceed the physical demands placed on civilian populations (1). While such training enhances operational effectiveness, its repetitive high-intensity nature substantially increases the risk of musculoskeletal injury (2). Military populations consistently report higher musculoskeletal injury rates compared to both general and athletic populations. Epidemiological data indicate 6–12 injuries per 100 soldiers per month during routine training, rising to 30 per 100 during intensive cycles (3). Kerr's analysis of 3,400 military medical records revealed that 34% of visits were related to musculoskeletal disorders—such as joint pain, muscle strains, and overuse injuries—exceeding trauma-related visits (14%) (4). Among these, lower extremity injuries predominate, with anterior cruciate ligament (ACL) tears being particularly common. Bert's research reported ACL incidence rates of 3.09 per 1,000 training hours in men and 2.29 per 1,000 in women, significantly higher than rates in civilian cohorts. The substantial personal and socioeconomic burden of ACL injuries underscores the need to identify and modify risk factors. Biomechanical studies have identified key kinematic predictors of ACL injury, including excessive frontal plane knee valgus/varus, reduced sagittal plane flexion, and increased hip adduction during landing tasks. Cochrane's work confirms the predictive value of these patterns, highlighting that they are modifiable through targeted neuromuscular and biomechanical training (9). Accordingly, the present study investigates changes in knee flexion and abduction angles during jump-landing tasks among cadets at Imam Ali (AS) University. These findings are intended to provide essential evidence for the development of injury prevention strategies within military training programs.

2. Methods

This longitudinal study included thirty healthy male military cadets from Imam Ali (AS) University (mean age: 19.71 ± 2.30 years; height: 182.66 ± 6.21 cm; weight: 71.83 ± 7.71 kg), all with no history of lower extremity injuries. Participants were evaluated at two time points: the beginning and the end of their first academic year. A standardized jump-landing protocol was employed. Wearing standard athletic shoes, participants stood on a 50 cm platform with feet positioned 35 cm apart (inter-malleolar distance). They were instructed to perform maximal vertical jumps while keeping their hands on their hips and maintaining visual focus on a fixed point at eye level, located two meters away (11). Three anatomical landmarks (greater trochanter, lateral femoral epicondyle, and lateral malleolus) were identified and marked with semi-permanent skin-safe markers. Two Canon cameras were placed 365 cm from the landing area to capture movement in the frontal and sagittal planes at 120 Hz. Each participant completed three trials. Video recordings were analyzed using Kinovea software (version 2.0) to quantify knee flexion and valgus angles at two critical events: (a) initial contact (first frame of visible toe-ground contact) and (b) peak flexion (frame of maximum knee flexion during landing). All measurements were performed by the same investigator to ensure consistency and reliability.

The testing protocol simulated natural landing surfaces rather than force plate instrumentation, with consistent camera positioning and marker placement across both sessions (12). For statistical analysis, a two-way repeated measures ANOVA (time: pre vs. post $\times$ limb: dominant vs. non-dominant) was conducted using SPSS version 25. Statistical significance was set at $p < 0.05$, and effect sizes were reported as partial eta-squared. Normality assumptions were confirmed using the Shapiro–Wilk test.

3. Results

Key findings indicated marked biomechanical changes in the dominant limb. Knee flexion angle at peak flexion decreased significantly from $96.26^\circ \pm 8.41^\circ$ to $87.27^\circ \pm 6.92^\circ$ ($p = 0.028$, $\eta^2 = 0.18$), while knee valgus angle increased from $12.32^\circ \pm 3.24^\circ$ to $17.44^\circ \pm 4.07^\circ$ ($p = 0.007$, $\eta^2 = 0.21$).

Table 1. Knee Flexion Angle (Mean $\pm$ SD) Changes during Jump-Landing Task

Group	Pre-test	Post-test	Time Effect (F, p)	Limb Effect (F, p)	Interaction (F, p)	Effect Size (η^2)
Initial Contact						
Dominant Limb	26.18 $\pm$ 4.61°	27.43 $\pm$ 5.30°	0.15, 0.701	0.75, 0.391	0.69, 0.416	0.02
Non-dominant Limb	24.38 $\pm$ 6.17°	26.03 $\pm$ 4.79°				
Peak Flexion						
Dominant Limb	96.26 $\pm$ 8.41°	87.27 $\pm$ 6.92°	0.94, 0.337	1.30, 0.260	5.12, 0.028*	0.18
Non-dominant Limb	93.50 $\pm$ 9.31°	89.48 $\pm$ 8.09°				

Table 2. Knee Valgus Angle (Mean $\pm$ SD) Changes during Jump-Landing Task

Group	Pre-test	Post-test	Time Effect (F, p)	Limb Effect (F, p)	Interaction (F, p)	Effect Size (η^2)
Initial Contact						
Dominant Limb	6.34 $\pm$ 1.87°	7.41 $\pm$ 1.64°	1.82, 0.183	0.03, 0.852	0.03, 0.852	0.03
Non-dominant Limb	5.81 $\pm$ 1.74°	6.13 $\pm$ 1.93°				
Peak Flexion						
Dominant Limb	12.32 $\pm$ 3.24°	17.44 $\pm$ 4.07°	8.12, 0.007*	0.68, 0.418	0.01, 0.941	0.21
Non-dominant Limb	13.95 $\pm$ 2.77°	15.48 $\pm$ 3.22°				

In contrast, the non-dominant limb exhibited less pronounced changes (flexion: 93.50° $\pm$ 9.31° to 89.48° $\pm$ 8.09°; valgus: 13.95° $\pm$ 2.77° to 15.48° $\pm$ 3.22°). A significant time $\times$ limb interaction was observed ($F(1,30) = 5.12$, $p = 0.028$), confirming the development of bilateral asymmetries. Detailed descriptive and inferential statistics are presented in [Tables 1](#) and [2](#).

4. Discussion

Military training programs should prioritize injury prevention by incorporating targeted movement education alongside physical conditioning. The observed biomechanical adaptations during high-impact activities highlight the need for systematic modifications to current training approaches. Three essential components should be integrated into standard military training: First, movement technique training must emphasize proper landing mechanics, ensuring soldiers develop safe movement patterns from the outset. Second, balance and proprioceptive exercises should be routinely implemented to enhance joint stability and neuromuscular control. Third, training programs should address bilateral asymmetries through unilateral strengthening protocols. These evidence-based recommendations aim to preserve operational readiness while reducing preventable musculoskeletal injuries. Implementing such preventive strategies would represent a proactive approach to soldier health, potentially decreasing medical attrition rates and maintaining force effectiveness. Future training protocols should consider periodic biomechanical assessments to monitor at-risk individuals and evaluate intervention effectiveness.

Ethical Considerations

Compliance with ethical guidelines

This study was conducted in accordance with the 2013 Helsinki Declaration. Participants provided informed consent after being informed of the research objectives.

Funding

This research did not receive any financial support from government, private, or non-profit organizations.

Authors' contributions

All authors contributed equally to preparing the article.

Conflicts of interest

The authors of this article declare no conflicts of interest that could influence the results or interpretation of the findings in this research.

مقاله پژوهشی

تغییرات بیومکانیکی زانو در تکلیف پرش و فرود: مطالعه طولی دانشجویان افسری دانشگاه امام علی (ع)

*حمید امیدی^۱، رضا سبزواری راد^۱، موسی الرضا قربانی^۲

۱. گروه تربیت بدنی و علوم ورزشی، دانشکده فرماندهی و مدیریت، دانشگاه افسری امام علی (ع)، تهران، ایران.

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

Use your device to scan and read the article online

**Citation:** Omid H, Sabzevari Rad R, Ghorbani M. Biomechanical Changes of the Knee During Jump-Landing Tasks: A Longitudinal Study of Military Cadets at Imam Ali (AS) University. Journal of Sport Biomechanics.2026;11(4):424-437. <https://doi.org/10.61882/JSportBiomech.11.4.424> <https://doi.org/10.61882/JSportBiomech.11.4.424>

چکیده

هدف این مطالعه با هدف بررسی تغییرات زوایای فلکشن و ابداکشن زانو در دانشجویان افسری دانشگاه امام علی (ع) حین اجرای تکلیف پرش و فرود پس از دوره تمرینات نظامی انجام شد. با توجه به شیوع بالای آسیب‌های رباط صلیبی قدامی در نیروهای نظامی و نقش الگوهای حرکتی در بروز این آسیب‌ها، این پژوهش به دنبال شناسایی تغییرات بیومکانیکی ناشی از تمرینات فشرده نظامی بود.

روش‌ها در این مطالعه نیمه تجربی، ۳۰ دانشجوی افسری مرد دانشگاه امام علی (ع) در دو مرحله - ابتدای ورود و پایان سال اول - مورد ارزیابی قرار گرفتند. آزمون پرش-فرود برای بررسی الگوهای حرکتی استفاده شد و داده‌های کینماتیکی با دو دوربین ۱۲۰ هرتز در نماهای فرونتال و ساجیتال ثبت و با نرم افزار کینوا (نسخه ۲/۰) تحلیل شدند. زوایای فلکشن و ابداکشن زانو در لحظه تماس اولیه و حداکثر فلکشن اندازه گیری و داده‌ها با آزمون تحلیل واریانس دوطرفه با اندازه گیری مکرر در SPSS نسخه ۲۵ تحلیل گردید.

یافته‌ها مطالعه حاضر تغییرات بیومکانیکی معناداری را در الگوی فرود دانشجویان افسری نشان داد. در پای غالب، زاویه فلکشن زانو در انتهای فاز فرود کاهش معناداری یافت (۹۶/۲۶ درجه به ۸۷/۲۷ درجه، $p=0/028$)، درحالی که زاویه والگوس در همین پا افزایش قابل توجهی نشان داد (۱۲/۳۲ درجه به ۱۷/۴۴ درجه، $p=0/007$). این تغییرات در پای غیر غالب با شدت کمتری مشاهده شد (فلکشن: ۹۳/۵۰ درجه به ۸۹/۴۸ درجه؛ والگوس: ۱۳/۹۵ درجه به ۱۵/۴۸ درجه). اثر تعامل معنادار زمان×پا ($F=5/12$ ، $p=0/028$) حاکی از ایجاد الگوی حرکتی نامتقارن پس از تمرینات بود.

نتیجه گیری تمرینات فشرده نظامی منجر به تغییرات بیومکانیکی خطرناکی شامل کاهش فلکشن و افزایش والگوس زانو، به ویژه در پای غالب می شود. این الگوهای حرکتی می توانند خطر آسیب رباط صلیبی قدامی را افزایش دهند. پیشنهاد می شود برنامه های تمرینی نظامی با آموزش تکنیک های صحیح فرود و تمرینات تعادلی تکمیل شوند تا از بروز این تغییرات نامطلوب جلوگیری شود.

اطلاعات مقاله:

تاریخ دریافت: ۲۹ تیر ۱۴۰۴

تاریخ پذیرش: ۴ مهر ۱۴۰۴

تاریخ انتشار: ۱۳ مهر ۱۴۰۴

کلید واژه‌ها:

بیومکانیک، تمرینات نظامی، پرش و فرود، رباط صلیبی قدامی

*نویسنده مسئول:

حمید/امیدی

آدرس: گروه تربیت بدنی و علوم ورزشی، دانشکده فرماندهی و مدیریت، دانشگاه افسری امام علی (ع)، تهران، ایران.

ایمیل: hamidomidi63@gmail.com

مقدمه

اقتدار و ثبات یک کشور ارتباط بالایی با سلامتی، آمادگی جسمانی و آمادگی رزمی نیروهای نظامی آن کشور دارد. از گذشته تا به امروز، آمادگی جسمانی نظامیان، نقش مهمی در پیروزی یا شکست آنان داشته است. با توجه به اینکه نیروهای نظامی در مقایسه با عموم جامعه نیازمند سطح بالاتری از آمادگی جسمانی و رزمی هستند، در طول دوره‌های آموزشی، تمرینات فشرده و متنوعی را پشت سر می‌گذارند. این تمرینات شامل فعالیت‌هایی همچون تمرینات رزمی، دوهای استقامتی، پیاده‌روی‌های طولانی با کوله‌پشتی، عبور از میداین موانع، راپل‌زنی، صعود مصنوعی، تیراندازی و پرش از ارتفاعات مختلف می‌شود (۱)؛ بنابراین، اگرچه فعالیت‌های جسمانی سخت، طولانی‌مدت و تکراری که سربازان و پرسنل نظامی انجام می‌دهند دارای فواید قابل‌توجهی هستند، اما می‌توانند منجر به بروز برخی آسیب‌های جسمانی نیز شوند (۲).

آسیب‌های اسکلتی-عضلانی ناشی از فعالیت‌های بدنی از جمله مهم‌ترین چالش‌های سلامت در بین اقشار مختلف جامعه، از افراد عادی تا ورزشکاران حرفه‌ای و به‌ویژه پرسنل نظامی به شمار می‌آید. در میان این گروه‌ها، شیوع آسیب‌ها در نیروهای مسلح به میزان قابل‌توجهی بالاتر است (۳). با توجه به ماهیت پرفشار تمرینات نظامی که شامل فعالیت‌هایی مانند رژه‌های طولانی، دوهای استقامتی و پرش‌های مکرر است، شیوع بالای آسیب‌های اندام تحتانی امری شایع است (۴). در میان آسیب‌های اندام تحتانی در نیروهای نظامی، پارگی رباط صلیبی قدامی از شایع‌ترین موارد محسوب می‌شود. به‌عنوان مثال، پژوهش برت و همکاران نشان داد میزان بروز این آسیب در هر هزار ساعت فعالیت نظامی در مردان ۳/۰۹ مورد و در زنان ۲/۲۹ مورد بوده است (۵). همسو با این یافته‌ها، مطالعه بالوک و همکاران نیز تأیید کرد که شیوع آسیب‌های رباط صلیبی قدامی در پرسنل نظامی به‌طور معناداری بالاتر از جمعیت عمومی است (۶). در مطالعه‌ای مشخص شد حدود ۷۰ درصد از آسیب‌های رباط صلیبی قدامی به‌صورت غیربرخوردی رخ می‌دهد (۷). پرش و فرود نامناسب که اغلب با والگوس بیش‌ازحد زانو، کاهش فلکشن ران و زانو، افزایش گشتاور اداکشنی در ران و زانو، افزایش اداکشن و چرخش داخلی ران و همچنین چرخش خارجی درشت‌نی همراه است، از شایع‌ترین مکانیسم‌های آسیب رباط صلیبی قدامی محسوب می‌شود (۸، ۹). از این‌رو افزایش آسیب‌های زانو و بخصوص آسیب رباط صلیبی قدامی در نیروهای نظامی به دلیل مانورهای پرشی و تغییر جهت‌های زیاد به دنبال تمرینات نظامی دور از انتظار نیست. به‌علاوه مطالعه جوسوک و همکاران نشان داد که دومین دلیل شایع آسیب‌های رباط صلیبی قدامی در میان نظامیان، تمرینات نظامی بوده است (۱۰).

یکی از محدودیت‌های اصلی مطالعات پیشین، تمرکز بر برنامه‌های تمرینی ساختاریافته و خاص بود. در مقابل، هدف از پژوهش حاضر، بررسی اثر برنامه تمرینی متداول و بدون مداخله در نیروهای نظامی بود؛ چراکه این افراد عمدتاً در معرض تمرینات روتین و عملیاتی ویژه مشاغل نظامی قرار دارند، نه برنامه‌های ورزشی طراحی‌شده برای اهداف خاص پیشگیری از آسیب یا بهبود عملکرد. از طرفی عواقبی همچون عدم بازگشت به سطح قبلی فعالیت‌های ورزشی و شغلی، افزایش خطر آسیب‌های ثانویه، ناپایداری مفصل، بروز استئوآرتریت زودرس، مشکلات روانی و همچنین هزینه‌های سنگین درمان، اهمیت درک عوامل خطرزای این آسیب را بیش‌ازپیش برجسته ساخته است (۱۱، ۱۲). با توجه به موارد ذکر شده و همچنین قابلیت اصلاح این الگوهای کینماتیکی از طریق مداخلات آموزشی هدفمند، شناسایی جامع این عوامل خطر می‌تواند نقش تعیین‌کننده‌ای در طراحی برنامه‌های پیشگیرانه و کاهش شیوع آسیب‌های اندام تحتانی در جمعیت‌های نظامی و ورزشی داشته باشد. به همین دلیل تحقیق حاضر در نظر دارد تا به مقایسه تغییرات زوایای فلکشن و اداکشن زانو در بین دانشجویان افسری دانشگاه امام علی (ع) حین اجرای تکلیف پرش و فرود بپردازد.

روش شناسی

شرکت کنندگان

این تحقیق یک تحقیق علی-مقایسه‌ای، آینده‌نگر و نیمه تجربی می‌باشد. جامعه تحقیق حاضر ۲۰۰ نفر از دانشجویان افسری دانشگاه امام علی (ع) بودند. تعداد نمونه‌ها با استفاده از نرم‌افزار G*Power محاسبه شد. بر اساس مطالعات قبلی با آلفای ۰/۰۵ و توان آزمون ۰/۸۰، تعداد نمونه‌ها ۳۰ نفر محاسبه شد (۱۳). لازم به ذکر است، به‌منظور جبران احتمال ریزش نمونه‌ها (مانند انصراف یا عدم همکاری کامل)، تعداد ۳۵ نفر مورد ارزیابی قرار گرفتند که در نهایت و در پس‌آزمون داده‌های ۳۰ شرکت‌کننده (بدون ریزش قابل‌توجه) وارد تحلیل نهایی شد. برای شروع آزمون در ابتدا آزمودنی‌ها فرم رضایت‌نامه را تکمیل کردند. پس از تکمیل فرم رضایت‌نامه فرم مشخصات فردی در اختیار آن‌ها قرار گرفت، همچنین پس از تکمیل فرم، مشخصات آزمودنی‌ها که شامل قد، وزن و شاخص توده بدنی می‌شود توسط پژوهشگر جمع‌آوری و در فرم مشخصات ثبت شد. قبل از شروع تست یک جلسه شفاهی برای شفاف ساختن نحوه انجام مطالعه برگزار شد تا آزمودنی‌ها در مورد انجام کار اطلاعات کافی داشته باشند. پس از توضیحات توسط پژوهشگر آزمودنی‌ها آزمون پرش و فرود را از روی یک جعبه به ارتفاع ۵۰ سانتی‌متر و در مقابل دو دوربین که در راستای فروتنال و ساجیتال قرار گرفته بودند انجام دادند تا داده‌های حرکتی ثبت شده و داده‌ها جمع‌آوری شود (۱۴). پس از جمع‌آوری داده‌های کینماتیکی زانو (شامل زوایای فلکشن، اکستنشن و والگوس) در پیش‌آزمون، دانشجویان به مدت یک سال در معرض برنامه تمرینی روتین و استاندارد نظامی قرار گرفتند. این برنامه شامل فعالیت‌هایی از قبیل دوهای استقامتی و سرعتی، مانورهای میدانی با تغییر جهت‌های ناگهانی، پرش از موانع، حمل بار سنگین (مانند کیف‌های نظامی) و تمرینات قدرتی با وزن بدن بود. پس از این دوره یک‌ساله، تمامی اندازه‌گیری‌ها با همان روش و پروتکل اولیه و با رعایت همان اصول، مجدداً تکرار شدند.

ابزار اندازه‌گیری

برای ثبت داده‌های کینماتیکی از دو عدد دوربین کانن^۱ استفاده شد. با توجه به پایایی عالی ($ICC=0/99$) و روایی بالای نرم‌افزار کینوا که در مطالعات پیشین (با توافق قوی در Bland-Altman و همبستگی تا ۰/۹۹) ارزیابی شد، این نرم‌افزار به‌عنوان ابزار اصلی اندازه‌گیری در این تحقیق مورد استفاده قرار گرفت (۱۵). یک دوربین برای اندازه‌گیری کینماتیکی در راستای فروتنال و دوربین دیگر برای ارزیابی در راستای ساجیتال مورد استفاده قرار گرفت (۱۴). در این مطالعه، از پروتکل استاندارد پرش-فرود برای ارزیابی کینماتیک اندام تحتانی استفاده شد. آزمودنی‌ها بر روی جعبه‌ای به ارتفاع ۵۰ سانتی‌متر قرار گرفتند و موضع‌گیری اولیه آن‌ها به‌گونه‌ای تنظیم شد که فاصله بین قوزک‌های داخلی پایشان دقیقاً ۳۵ سانتی‌متر باشد. سپس از آزمودنی‌ها خواسته شد تا پس از پریدن از روی جعبه، فرود دوطایی را روی زمین اجرا کنند، لازم به ذکر است که جهت استانداردسازی فرود نقطه‌ای در روبه‌روی آزمودنی‌ها قرار گرفت تا پس از فرود به آن نگاه کنند. از آزمودنی‌ها خواسته شد تا حداکثر پرش عمودی خود را انجام دهد و سپس دست‌ها را بالا بیاورد. برای ثبت هر کوشش دوربین در فاصله ۳۶۵ سانتی‌متری در نمای فروتنال و ساجیتال نصب شد. هر آزمون سه بار تکرار شد و فاصله استراحت بین ست‌ها ۱ دقیقه بود. داده‌ها توسط نرم‌افزار کینوا مورد بررسی قرار گرفت. برای ثبت زوایا دو تصویر در الگوی پرش و فرود مورد استفاده قرار گرفت. این مطالعه از تحلیل ویدیویی دوبعدی برای ارزیابی کینماتیک فرود استفاده نمود. دو فریم کلیدی از سیکل فرود هر شرکت‌کننده استخراج شد: فریم اول مربوط به لحظه تماس اولیه، یعنی زمانی که پنجه پا بلافاصله پس

1.Canon

از پرش از روی جعبه با سطح زمین تماس پیدا می‌کند و فریم دوم مربوط به لحظه حداکثر فلکشن زانو که در آن ورزشکار در پایین‌ترین نقطه حرکت فرود و در مرحله جذب نیرو قرار داشت. برای بررسی زوایای مورد نظر، از نرم‌افزار کینوا (نسخه ۰.۹.۵) استفاده شد. نقاط آناتومیکی کلیدی توسط یک ارزیاب مجرب در هر دو فریم به صورت دستی مشخص شدند. زاویه والگوس زانو در صفحه فرونتال به عنوان زاویه بین دو خط آناتومیکی تعریف شد. خط اول، خطی که مرکز تروکانتر بزرگ استخوان فمور را به مرکز کشکک متصل می‌کرد و نمایانگر محور طولی استخوان ران بود. خط دوم، خطی که مرکز کشکک را به برجستگی قوزک خارجی متصل می‌ساخت و نمایانگر محور طولی ساق پا بود. زاویه تشکیل شده بین امتداد این دو خط به سمت دیستال به عنوان زاویه والگوس ثبت گردید. به موازات آن، زاویه فلکشن زانو در صفحه ساجیتال محاسبه شد. این زاویه به عنوان زاویه بین همان دو خط تعریف کننده زاویه والگوس (یعنی خط ران و خط ساق) اندازه‌گیری شد، با این تفاوت که این بار تقاطع آن‌ها در ناحیه اپی‌کوندیل خارجی فمور در نظر گرفته شد تا نمای دقیق‌تری از زاویه مفصل زانو ارائه شود. تمامی اندازه‌گیری‌ها با سه تکرار و توسط یک ارزیاب انجام گرفت و میانگین این سه اندازه‌گیری برای تحلیل نهایی مورد استفاده قرار گرفت تا خطای درون-ارزیاب کننده به حداقل برسد. این پروتکل دقیق، امکان استخراج کمی و عینی پارامترهای بیومکانیکی کلیدی مرتبط با مکانیسم آسیب رباط صلیبی قدامی را فراهم آورد (۱۶).

تجزیه و تحلیل داده‌ها با استفاده از آزمون تحلیل واریانس دوطرفه در سطح معناداری $P \leq 0.05$ و به کمک نرم‌افزار SPSS نسخه ۲۵ انجام شد.

نتایج

اطلاعات مربوط به ویژگی‌های فردی آزمودنی‌ها در **جدول ۱** نشان داده شده است. همان‌طور که در **جدول ۲** مشاهده می‌شود، تحلیل واریانس دوطرفه نشان داد که در متغیر فلکشن انتهایی فرود، اثر تعامل زمان و نوع پا معنادار بود ($\eta^2 = 0.18$, $p = 0.028$). $F(1/30) = 5.12$. بررسی میانگین‌ها نشان داد که پای غالب کاهش بیشتری در فلکشن را تجربه کرده است (از $96/26$ به $87/27$ درجه) در مقایسه با پای غیرغالب (از $93/50$ به $89/48$ درجه).

جدول ۱. ویژگی‌های فردی آزمودنی‌ها

متغیر	انحراف معیار $\pm$ میانگین
سن (سال)	$19/71 \pm 2/30$
قد (سانتی‌متر)	$182/66 \pm 6/21$
وزن (کیلوگرم)	$71/83 \pm 7/71$
شاخص توده بدن (کیلوگرم بر مترمربع)	$22/13 \pm 2/76$

جدول ۲. تغییرات فلکشن زانو (میانگین $\pm$ انحراف معیار) حین تکلیف پرش و فرود

	پیش‌آزمون	پس‌آزمون	اثر زمان (F,P)	اثر پا (F,P)	تعامل (F,P)	اندازه اثر (η^2)
فلکشن	$26/4 \pm 18/61$	$27/43 \pm 5/30$	$0/701, 0/15$	$0/75, 0/391$	$0/416, 0/69$	$0/02$
(لحظه برخورد)	$24/38 \pm 6/17$	$26/03 \pm 4/79$				
فلکشن	$96/26 \pm 8/41$	$87/27 \pm 6/92$	$0/337, 0/94$	$1/30, 0/260$	$5/12, 0/028^*$	$0/18$
(انتهای فرود)	$93/50 \pm 9/31$	$89/48 \pm 8/09$				

جدول ۳. تغییرات ابداعشن زانو حین تکلیف پرش و فرود

پیش‌آزمون	پس‌آزمون	اثر زمان (F,P)	اثر پا (F,P)	تعامل (F,P)	اندازه اثر (η^2)
۶/۳۴±۱/۸۷	۷/۴۱±۱/۶۴	۱/۸۲، ۰/۱۸۳	۰/۰۳، ۰/۸۵۲	۰/۰۳، ۰/۸۵۲	۰/۰۳
۵/۸۱±۱/۷۴	۶/۱۳±۱/۹۳				
۱۲/۳۲±۳/۲۴	۱۷/۴۴±۴/۰۷	۰/۰۷، ۸/۱۲	۰/۶۸، ۰/۴۱۸	۰/۰۱، ۰/۹۴۱	۰/۲۱
۱۳/۹۵±۲/۷۷	۱۵/۴۸±۳/۲۲				

نتایج آنالیز واریانس دوطرفه (جدول ۳) نشان داد که والگوس زانو در انتهای فرود به‌طور معناداری در پس‌آزمون افزایش یافته است ($F((1/30) = 8/12, p = 0/007, \eta^2 = 0/21$). این افزایش در پای غالب (از ۱۲/۳۲ به ۱۷/۴۴ درجه) بیشتر از پای غیرغالب (از ۱۳/۹۵ به ۱۵/۴۸ درجه) بود، اگرچه اثر تعامل معنادار نبود ($p = 0/941$).

بحث

یافته‌های این مطالعه نشان‌دهنده الگوی تغییرات متفاوت در مکانیک مفصل زانو بین پای غالب و غیرغالب در طول دوره تمرینات نظامی است. به‌طور کلی، کاهش قابل‌توجهی در زاویه فلکشن زانو در انتهای فاز فرود مشاهده شد که این تغییر در پای غالب بارزتر بود. از سوی دیگر، افزایش زاویه والگوس زانو پس از دوره‌ی آموزشی یک ساله حاکی از تغییر در الگوی حرکتی اندام تحتانی است. تفاوت‌های مشاهده شده بین پای غالب و غیرغالب بر اهمیت توجه به تقارن حرکتی در تمرینات نظامی تأکید دارد. این نتایج به‌طور کلی نشان می‌دهد که برنامه‌های تمرینی فشرده می‌توانند موجب تغییرات بیومکانیکی معناداری در الگوی حرکتی سربازان شوند که نیازمند توجه ویژه در طراحی برنامه‌های پیشگیرانه است. کاهش زاویه فلکشن زانو و افزایش زاویه والگوس (ابداعشن) از عوامل بیومکانیکی کلیدی در افزایش خطر آسیب‌های زانو، به‌ویژه پارگی رباط صلیبی قدامی، محسوب می‌شوند. تحقیقات نشان می‌دهد که فرود با زاویه فلکشن محدود، بارهای وارده بر رباط‌ها را افزایش داده، درحالی‌که والگوس بیش‌ازحد، استرس غیرطبیعی بر ساختارهای مفصلی وارد می‌کند. از آنجاکه تمرینات نظامی اغلب شامل پرش‌ها و فرودهای مکرر هستند، این الگوی حرکتی تغییر یافته می‌تواند سربازان را مستعد آسیب‌های حاد و مزمن زانو کند.

مطالعات گذشته افزایش زاویه فلکشن زانو در حین فرود را به‌عنوان یک استراتژی مؤثر در پیشگیری از آسیب‌های رباط صلیبی قدامی معرفی کرده‌اند (۱۷، ۱۸). در همین راستا، مطالعه کاپلان و همکاران که همسو با پژوهش حاضر انجام شده است، به بررسی کینماتیک اندام تحتانی در سربازان آموزش‌دیده پرداخت. در این مطالعه، شرکت‌کنندگان تکلیف پرش و فرود را با سه سطح مختلف بار (سبک، متوسط و سنگین) انجام دادند. یافته‌ها نشان داد که با افزایش بار، زاویه فلکشن زانو نیز افزایش می‌یابد. از سوی دیگر، گروهی که فلکشن کمتری در مفصل زانو هنگام فرود داشتند، زاویه والگوس بالاتری را نشان دادند. محققان این مطالعه تمرینات تخصصی برای بهبود تکنیک پرش و فرود را به‌ویژه برای افرادی که فلکشن زانوی کمتری دارند، به‌عنوان راهکاری برای کاهش خطر آسیب‌های رباط صلیبی قدامی پیشنهاد کردند (۱۹، ۲۰). این یافته‌ها به‌طور قابل‌توجهی با نتایج مطالعه حاضر همخوانی دارد. در پژوهش ما نیز کاهش زاویه فلکشن زانو در پای غالب و افزایش هم‌زمان زاویه والگوس در پس‌آزمون مشاهده شد. این الگوی حرکتی تغییر یافته می‌تواند منجر به افزایش بارگذاری بر رباط صلیبی قدامی و در نتیجه بالا رفتن خطر آسیب شود. مطالعه کاپلان و همکاران از این جهت حائز اهمیت است که نه تنها تأییدکننده یافته‌های ماست، بلکه مکانیسم‌های احتمالی پشت این تغییرات بیومکانیکی را نیز روشن می‌سازد. به‌ویژه، این مطالعه نشان می‌دهد که حتی در افراد آموزش‌دیده (مانند سربازان)، الگوهای حرکتی ناکارآمد می‌تواند باقی بماند و نیاز به مداخلات تمرینی هدفمند دارد. از طرفی یافته‌های هر دو مطالعه بر این نکته تأکید دارند که

کاهش فلکشن زانو همراه با افزایش والگوس می‌تواند یک الگوی پرخطر برای آسیب رباط صلیبی قدامی باشد (۲۱). از منظر بیومکانیکی، این الگو احتمالاً ناشی از هاپیروتروپی و کوتاهی منتخب عضلات چهار سر ران است که یک محدودیت مکانیکی برای دستیابی به دامنه حرکتی مطلوب در حین فرود ایجاد می‌کند. به‌طور هم‌زمان، ضعف نسبی عضلات تثبیت‌کننده لگن (عمدتاً سیرینی میانی) و عضلات همسترینگ، قابلیت کنترل حرکات در صفحه فرونتال را مختل ساخته و به بروز اداکشن و چرخش داخلی ران می‌انجامد. احتمالاً این دو پدیده به‌صورت سینرژیک، زنجیره حرکتی معیوبی را شکل می‌دهند که در آن، افزایش زاویه والگوس به‌عنوان یک راهکار جبرانی برای پر کردن نقص در جذب نیرو ظاهر می‌شود و در نهایت ریسک بروز آسیب‌های غیرتماسی رباط صلیبی قدامی را افزایش می‌دهد (۲۲).

اگرچه در مطالعه حاضر قدرت عضلات و همچنین نقش غلبه عضلات چهارسر رانی به‌طور مستقیم بررسی نشد، اما تغییرات مشاهده‌شده شامل کاهش فلکشن و افزایش اداکشن زانو پس از تمرینات نظامی می‌تواند با الگوی غلبه چهارسر مرتبط باشد (۹). مطالعات نشان داده‌اند که فعالیت بیش‌ازحد عضلات چهارسر نسبت به عضلات همسترینگ می‌تواند منجر به کاهش فلکشن زانو در فاز فرود شود، درحالی‌که عدم تعادل بین این عضلات نیز می‌تواند باعث افزایش زاویه والگوس گردد (۲۳، ۲۴). این مکانیسم احتمالاً توضیح‌دهنده الگوی حرکتی پرخطری باشد که در سربازان مشاهده شد، چرا که تمرینات فشرده نظامی اغلب منجر به تقویت انتخابی عضلات چهارسر می‌شود (۲۵). اگرچه افزایش قدرت عضلات چهارسر به‌تنهایی می‌تواند در ایجاد یک الگوی فرود صاف‌تر با فلکشن کمتر در زانو نقش داشته باشد، اما نقش محافظتی عضلات همسترینگ پیچیده‌تر و حیاتی‌تر است. این عضلات نه‌تنها به‌عنوان عضلات آنتاگونیست در مقابل اکستنشن بیش‌ازحد زانو عمل می‌کنند، بلکه از طریق تثبیت پویای مفصل لگن، مکانیسم محافظتی غیرمستقیم و مهمی را ارائه می‌دهند. همسترینگ‌های قوی با کنترل موقعیت لگن و جلوگیری از چرخش داخلی و اداکشن بیش‌ازحد ران، به‌طور غیرمستقیم از ایجاد گشتاور اداکشنی در زانو جلوگیری می‌کنند (۲۶). این کاهش گشتاور چرخشی در نهایت بار وارده بر رباط صلیبی قدامی را به میزان قابل‌توجهی کاهش می‌دهد؛ بنابراین، اگرچه مستقیماً غلبه چهارسر را اندازه‌گیری نکردیم، اما یافته‌های ما با این فرضیه سازگار است که احتمالاً چنین عدم تعادلی ممکن است در ایجاد الگوی حرکتی تغییریافته و افزایش زاویه والگوس مشاهده شده نقش داشته باشد.

حمل بارهای سنگین در تمرینات نظامی نیز از جمله مواردی است که می‌تواند موجب تغییرات بیومکانیکی در نیروهای نظامی از طریق غلبه عضلات چهارسر شود، به‌عنوان مثال مطالعه مگان و همکاران نشان داد که حمل زره نظامی می‌تواند بر کینماتیک زانو تأثیر بگذارد. در این مطالعه مشخص شد که حمل طولانی‌مدت زره سنگین می‌تواند موجب افزایش نسبت قدرت چهارسر به همسترینگ شود چنین تغییراتی در رفتار عصبی عضلانی زانو بر عملکرد فیزیکی و خطر آسیب زانو تأثیر منفی می‌گذارد (۲۷). همچنین در مطالعه‌ای ناهمسو با مطالعه حاضر دیتی و همکاران به بررسی کینماتیک اندام تحتانی در راه رفتن حین حمل بار در سربازان پرداختند. نتایج آن‌ها نشان داد که حمل بار منجر به تغییرات قابل‌توجهی در الگوی حرکتی می‌شود، از جمله افزایش طول گام، دامنه حرکتی بیشتر در مچ پا و مفصل ران، افزایش تمایل تنه به سمت خم شدن قدامی و فلکشن بالاتر زانو در لحظه تماس پاشنه با زمین. این یافته‌ها با نتایج مطالعه حاضر ناهمسو است، چرا که در تحقیق ما کاهش زاویه فلکشن زانو در فاز فرود مشاهده شد (۲۸). این تناقض احتمالی را می‌توان به تفاوت در پروتکل‌های مورد استفاده نسبت داد؛ درحالی‌که مطالعه دیتی و همکاران بر راه رفتن با بار تمرکز داشت، پژوهش حاضر پرش و فرود را در شرایط تمرینات نظامی بررسی کرده است. این تفاوت در وظیفه حرکتی می‌تواند تأثیر متفاوتی بر مکانیک مفصل زانو داشته باشد، چرا که الگوی بارگذاری و نیروهای وارده در پرش و فرود نسبت به راه رفتن با بار به‌طور قابل‌توجهی متفاوت است. در مطالعه‌ای دیگر، کینماتیک و کینتیک اندام تحتانی در ۱۶ نظامی تحت سه

شرایط مختلف پای برهنه، کفش تنیس و پوتین نظامی مورد بررسی قرار گرفت. نتایج این مطالعه نشان داد که پوتین نظامی تأثیر معناداری بر زاویه والگوس زانو نداشت، اما نیروی عکس‌العمل زمین در حین فرود با پوتین به‌طور قابل‌توجهی بیشتر از دو شرایط دیگر بود. نکته حائز اهمیت این بود که شرکت‌کنندگان این مطالعه هیچ آموزش نظامی در مورد تکنیک‌های صحیح فرود از ارتفاع دریافت نکرده بودند (۲۹). این یافته‌ها تا حدی با نتایج مطالعه حاضر ناهمسو است، چرا که در پژوهش ما، افزایش زاویه والگوس زانو پس از دوره تمرینات نظامی مشاهده شد. این تناقض را می‌توان به چند عامل کلیدی نسبت داد: اول این‌که در مطالعه حاضر شرکت‌کنندگان با کفش ورزشی استاندارد آزمایش شدند، درحالی‌که در مطالعه مقایسه‌ای، اثرات پوتین نظامی بررسی شده بود. این تفاوت در نوع کفش می‌تواند الگوی بارگذاری و مکانیک مفصل زانو را تحت تأثیر قرار دهد.

با در نظر گرفتن این تفاوت‌های روش‌شناختی، عامل خستگی نیز به‌عنوان یک متغیر کلیدی می‌تواند در تشدید الگوی حرکتی مشاهده شده نقش داشته باشد. به‌عنوان مثال با توجه به یافته‌های قربانی و همکاران (۳۰) و فیدای و همکاران (۳۱) مبنی بر تأثیر خستگی بر افزایش زاویه والگوس و کاهش فلکشن زانو، ممکن است که خستگی ناشی از تمرینات فشرده و طولانی‌مدت نظامی با کاهش کارایی عصبی-عضلانی و اختلال در کنترل حرکت، موجب تشدید الگوی فرود نامناسب در سربازان شده باشد. در مطالعه آکادمی نظامی ایالات متحده، دوره آموزشی حرکتی با تمرکز بر تکنیک فرود صحیح منجر به بهبود الگوی پرش-فرود و کاهش عوامل خطر آسیب رباط صلیبی قدامی شد (۳۲). این یافته با نتایج مطالعه حاضر که کاهش فلکشن و افزایش والگوس زانو را پس از تمرینات نظامی گزارش کرد، در تضاد است. این تفاوت را می‌توان به دلیل مداخلات آموزشی هدفمند برای اصلاح تکنیک فرود دانست، درحالی‌که مطالعه حاضر صرفاً اثرات تمرینات روتین را بررسی کرده است. از طرفی، تفاوت در روش‌های ارزیابی (سیستم LESS در مقابل اندازه‌گیری‌های کینماتیکی کمی) ممکن است در این ناهمخوانی نقش داشته باشد. این مشاهدات درمجموع نشان می‌دهد که تمرینات نظامی بدون آموزش تکنیک‌های اختصاصی فرود ممکن است به‌جای بهبود، الگوهای حرکتی پرخطر را تشدید نماید؛ بنابراین، شناسایی این تغییرات در مراحل اولیه و اصلاح برنامه‌های تمرینی با تأکید بر کنترل حرکتی و تقارن اندام تحتانی، می‌تواند در پیشگیری از آسیب‌های مرتبط مؤثر باشد (۳۳). در مجموع، یافته‌های این مطالعه نشان می‌دهد که تمرینات فشرده نظامی می‌توانند منجر به تغییرات بیومکانیکی قابل‌توجهی در الگوی حرکتی زانو، به‌ویژه کاهش فلکشن و افزایش والگوس بخصوص در پای غالب شوند که این تغییرات با افزایش خطر آسیب رباط صلیبی قدامی مرتبط هستند. اگرچه نتایج این پژوهش با برخی مطالعات همسو و با برخی دیگر ناهمسو است، اما به‌طور کلی اهمیت توجه به الگوهای حرکتی و طراحی برنامه‌های تمرینی اصلاحی برای پیشگیری از آسیب‌ها را در نیروهای نظامی برجسته می‌کند. از محدودیت‌های این مطالعه می‌توان به عدم اندازه‌گیری مستقیم فعالیت عضلانی (به‌ویژه نسبت چهارسر به همسترینگ)، عدم کنترل رژیم غذایی و عادات خواب و عدم کنترل دقیق سطح آمادگی جسمانی شرکت‌کنندگان اشاره کرد. پیشنهاد می‌شود مطالعات آینده با در نظر گرفتن این محدودیت‌ها و با استفاده از پروتکل‌های جامع‌تر، به بررسی دقیق‌تر مکانیسم‌های بیومکانیکی مؤثر در آسیب‌های زانو در سربازان بپردازند.

نتیجه‌گیری نهایی

یافته‌های این مطالعه نشان داد تمرینات فشرده نظامی با کاهش زاویه فلکشن و افزایش زاویه والگوس زانو در پای غالب همراه بوده است. این الگوی حرکتی تغییر یافته می‌تواند یکی از عوامل مؤثر در افزایش خطر آسیب رباط صلیبی قدامی محسوب شود. بر این اساس، به نظر می‌رسد ادغام تمرینات تقویتی عضلات گلوتهال و همسترینگ همراه با آموزش الگوهای فرود صحیح در برنامه‌های

تمرینی بتواند به بهبود مکانیک زانو و کاهش احتمال آسیب بینجامد. اجرای چنین مداخلاتی می‌تواند زمینه‌ساز حفظ سلامت و آمادگی جسمانی پرسنل نظامی گردد.

ملاحظات اخلاقی

پیروی از اصول اخلاق پژوهش

این مطالعه مطابق با بیانیه هلسینکی ۲۰۱۳ انجام شده است. شرکت‌کنندگان پس از آگاهی از اهداف پژوهش، رضایت آگاهانه دادند. محرمانگی داده‌ها و حق انصراف رعایت شد.

حامی مالی

نویسندگان هیچ نوع حمایت مالی از هیچ سازمان یا موسسه دولتی یا خصوصی دریافت نکرده‌اند.

مشارکت نویسندگان

تمامی نویسندگان در طراحی، اجرا و نگارش همه بخش‌های پژوهش مشارکت داشته‌اند.

تعارض

هیچ نوع تعارض منافی در این مطالعه وجود ندارد.

Reference

- Whittaker JL, Booyesen N, De La Motte S, Dennett L, Lewis CL, Wilson D, McKay C, Warner M, Padua D, Emery CA, Stokes M. Predicting sport and occupational lower extremity injury risk through movement quality screening: a systematic review. *British Journal of Sports Medicine*. 2017;51(7):580-5. [DOI:10.1136/bjsports-2016-096760] [PMID]
- Bullock SH, Jones BH, Gilchrist J, Marshall SW. Prevention of physical training-related injuries: recommendations for the military and other active populations based on expedited systematic reviews. *American Journal of Preventive Medicine*. 2010;38(1):S156-81. [DOI:10.1016/j.amepre.2009.10.023] [PMID]
- Rahardja R, Zhu M, Love H, Clatworthy MG, Monk AP, Young SW. Effect of graft choice on revision and contralateral anterior cruciate ligament reconstruction: results from the New Zealand ACL Registry. *The American Journal of Sports Medicine*. 2020;48(1):63-9. [DOI:10.1177/0363546519885148] [PMID]
- Obligi L, Bertrand M, Boivent M, Corcostegui SP, Coz PE, Derkenne C, et al. Position: A study protocol for the prevention of fall injuries in french special forces selection courses using a body-centered intervention. *PLoS One*. 2023;18(10):e0290241. [DOI:10.1371/journal.pone.0290241] [PMID]
- Rahardja R, Zhu M, Love H, Clatworthy MG, Monk AP, Young SW. Effect of graft choice on revision and contralateral anterior cruciate ligament reconstruction: results from the New Zealand ACL Registry. *The American Journal of Sports Medicine*. 2020;48(1):63-9. [DOI:10.1177/0363546519885148] [PMID]

6. Stannard J, Fortington L. Musculoskeletal injury in military Special Operations Forces: a systematic review. *BMJ Military Health*. 2021;167(4):255-65. [DOI:10.1136/bmjmilitary-2020-001692] [PMID]
7. Boden BP, Dean GS, Feagin JA, Jr., Garrett WE, Jr. Mechanisms of anterior cruciate ligament injury. *Orthopedics*. 2000;23(6):573-8. [DOI:10.3928/0147-7447-20000601-15] [PMID]
8. Gill VS, Tummala SV, Boddu SP, Brinkman JC, McQuivey KS, Chhabra A. Biomechanics and situational patterns associated with anterior cruciate ligament injuries in the National Basketball Association (NBA). *British Journal of Sports Medicine*. 2023;57(21):1395-9. [DOI:10.1136/bjsports-2023-107075] [PMID]
9. Lopes TJ, Simic M, Myer GD, Ford KR, Hewett TE, Pappas E. The effects of injury prevention programs on the biomechanics of landing tasks: a systematic review with meta-analysis. *The American Journal of Sports Medicine*. 2018;46(6):1492-9. [DOI:10.1177/0363546517716930] [PMID]
10. Ahn J, Choi B, Lee YS, Lee KW, Lee JW, Lee BK. The mechanism and cause of anterior cruciate ligament tear in the Korean military environment. *Knee Surgery & Related Research*. 2019;31(1):13. [DOI:10.1186/s43019-019-0015-1] [PMID]
11. Hamoongard M, Hadadnezhad M, Mohammadi Orangi B. A Narrative Review on the Effect of Variability-Based Motor Learning Approaches on Kinetic and Kinematic Factors Related to Anterior Cruciate Ligament Injury in Athletes. *Journal of Sport Biomechanics*. 2025;10(4):276-93. [DOI:10.61186/JSportBiomech.10.4.276]
12. Cotofana S, Ring-Dimitriou S, Hudelmaier M, Himmer M, Wirth W, Sanger AM, et al. Effects of exercise intervention on knee morphology in middle-aged women: a longitudinal analysis using magnetic resonance imaging. *Cells Tissues Organs*. 2010;192(1):64-72. [DOI:10.1159/000289816] [PMID]
13. Brydges CR. Effect size guidelines, sample size calculations, and statistical power in gerontology. *Innovation in Aging*. 2019;3(4):igz036. [DOI:10.1093/geroni/igz036] [PMID]
14. Shams F, Hadadnezhad M, Letafatkar A, Hogg J. Valgus control feedback and taping improves the effects of plyometric exercises in women with dynamic knee valgus. *Sports Health*. 2022;14(5):747-57. [DOI:10.1177/19417381211049805] [PMID]
15. Soylu C, Acar G, Uzumcu B, Demir P, Seyhan S, Biyikli T. Test-Retest Reliability and Validity of TecnoBody D-Wall to Assess the Range of Motion During Overhead Squat in Healthy Individuals. *Life*. 2025;15(1):80. [DOI:10.3390/life15010080] [PMID]
16. Schnittjer A, Simon JE, Yom J, Grooms DR. The effects of a cognitive dual task on jump-landing movement quality. *International Journal of Sports Medicine*. 2021;42(01):90-5. [DOI:10.1055/a-1195-2700] [PMID]
17. King E, Richter C, Jackson M, Franklyn-Miller A, Falvey E, Myer GD, et al. Factors influencing return to play and second anterior cruciate ligament injury rates in level 1 athletes after primary anterior cruciate ligament reconstruction: 2-year follow-up on 1432 reconstructions at a single center. *The American Journal of Sports Medicine*. 2020;48(4):812-24. [DOI:10.1177/0363546519900170] [PMID]
18. Sward P, Kostogiannis I, Roos H. Risk factors for a contralateral anterior cruciate ligament injury. *Knee Surgery, Sports Traumatology, Arthroscopy*. 2010;18(3):277-91. [DOI:10.1007/s00167-009-1026-3] [PMID]
19. Kaplan JT, Ramsay JW, Cameron SE, Seymore KD, Brehler M, Thawait GK, Zbijewski WB, Siewerdsen JH, Brown TN. Association between knee anatomic metrics and biomechanics for male soldiers landing with load. *The American Journal of Sports Medicine*. 2020;48(6):1389-97. [DOI:10.1177/0363546520911608] [PMID]

20. Sonkodi B, Bardoni R, Hangody L, Radák Z, Berkes I. Does compression sensory axonopathy in the proximal tibia contribute to noncontact anterior cruciate ligament injury in a causative way?-A new theory for the injury mechanism. *Life*. 2021;11(5):443. [DOI:10.3390/life11050443] [PMID]
21. Casanova N, Correia D, Marconcin P, Flôres F, Soares D, Ruivo R. Anthropometric Characteristics, Age, Sex, Drop Height, and Visual Feedback as Predictors of Dynamic Knee Valgus During Single-Leg Drop Landing. *Sports*. 2025;13(5):151. [DOI:10.3390/sports13050151] [PMID]
22. Kirkendall DT, Garrett WE. The Anterior Cruciate Ligament Enigma: Injury Mechanisms and Prevention. *Clinical Orthopaedics and Related Research* (1976-2007). 2000;372:64-8. [DOI:10.1097/00003086-200003000-00008] [PMID]
23. Xu Y, Choi HM, Hu Z, Kim S, Wang T. Pre-or co-activation of leg muscles is associated with risk of non-contact knee injury during a single-leg landing in badminton. *Molecular & Cellular Biomechanics*. 2025;22(1):1116. [DOI:10.62617/mcb1116]
24. Walsh M, Boling MC, McGrath M, Blackburn JT, Padua DA. Lower extremity muscle activation and knee flexion during a jump-landing task. *Journal of Athletic Training*. 2012;47(4):406-13. [DOI:10.4085/1062-6050-47.4.17] [PMID]
25. Matta TT, Nascimento FX, Trajano GS, Simao R, Willardson JM, Oliveira LF. Selective hypertrophy of the quadriceps musculature after 14 weeks of isokinetic and conventional resistance training. *Clinical Physiology and Functional Imaging*. 2017;37(2):137-42. [DOI:10.1111/cpf.12277] [PMID]
26. Kim S, Han S, Kim S, Moon J. The effects of knee ligament load using simulated hip abductor and hamstring muscle strengthening during cutting maneuver. *Medicine* (Baltimore). 2023;102(46):e35742. [DOI:10.1097/MD.00000000000035742] [PMID]
27. Phillips MP, Starnes CP, Shapiro R, Bazrgari B. The Effects of Military Body Armor on Isometric and Isokinetic Knee Behaviors. *IIE Transactions on Occupational Ergonomics and Human Factors*. 2015;3(3-4):210-20. [DOI:10.1080/21577323.2015.1095255]
28. Majumdar D, Pal MS, Majumdar D. Effects of military load carriage on kinematics of gait. *Ergonomics*. 2010;53(6):782-91. [DOI:10.1080/00140131003672015] [PMID]
29. Oliver GD, Stone AJ, Booker JM, Plummer HA. A kinematic and kinetic analysis of drop landings in military boots. *BMJ Military Health*. 2011;157(3):218-21. [DOI:10.1136/jramc-157-03-04] [PMID]
30. Ghorbani M, Shamloo Kazemi A, Babakhani F. The Effect of Fatigue on the Time to Stability in Jumping and Landing in Football Players Who Have Undergone Anterior Cruciate Ligament Reconstruction. *Journal of Rehabilitation Sciences & Research*. 2022;9(4):167-72.
31. Fidai MS, Okoroha KR, Meldau J, Meta F, Lizzio VA, Borowsky P, Redler LH, Moutzouros V, Makhni EC. Fatigue increases dynamic knee valgus in youth athletes: Results from a field-based drop-jump test. *Arthroscopy: The Journal of Arthroscopic & Related Surgery*. 2020;36(1):214-22. [DOI:10.1016/j.arthro.2019.07.018] [PMID]
32. Owens BD, Cameron KL, Duffey ML, Vargas D, Duffey MJ, Mountcastle SB, Padua D, Nelson BJ. Military movement training program improves jump-landing mechanics associated with anterior cruciate ligament injury risk. *Journal of Surgical Orthopaedic Advances*. 2013;22(1):66-70. [DOI:10.3113/JSOA.2013.0066] [PMID]
33. Ashrafizadeh M, Norasteh A. Comparison of the Effects of Exercises with and without Feedback on Lower Extremity Kinematics During Jump Landing Tasks in Men with Selected Motor Control Defects: A Randomized Clinical Trial. *Journal of Sport Biomechanics*. 2024;9(4):302-19. [DOI:10.61186/JSportBiomech.9.4.302]