Journal of
Sport Biomechanics

Winter 2027. Vol 12. Issue 4

Research Paper

The Effect of an Exercise-Based Rehabilitation Program on Biomechanical Performance and Functional Movement in Athletes with Chronic Ankle Instability

Soundus Farouk Honi*[1]

1. Wasit Education Directorate, Open Educational College Wasit Study Center, Wasit, Iraq.

Scan to read online

Citation: Honi SF. The Effect of an Exercise-Based Rehabilitation Program on Biomechanical Performance and Functional Movement in Athletes with Chronic Ankle Instability. Journal of Sport Biomechanics. 2027;12(4):662–689. https://doi.org/10.66224/JSportBiomech.12.4.662

Article Info:

Received: 25 July 2026

Accepted: 30 September 2026

Published: 2 October 2026

Keywords:

Ankle sprain; Proprioception; Range of motion; Postural balance; Muscle strength

ABSTRACT

Objective Chronic ankle instability (CAI) is associated with biomechanical deficits, reduced dynamic postural control, and impaired functional movement. This study examined the effects of an 8-week exercise-based rehabilitation program on biomechanical and functional performance in athletes with CAI.

Methods Twenty-four male athletes with CAI were randomly allocated to an experimental group (EG; n = 12) or a control group (CG; n = 12). The EG completed a progressive, structured rehabilitation program involving mobility, proprioceptive training, muscle strengthening, and neuromuscular control exercises three times per week for 8 weeks. The CG continued their usual sport-specific training and daily physical activities. Outcome measures included peak ankle dorsiflexion during drop-jump landing, isokinetic evertor peak torque at 60°/s, Y-Balance composite score, and Functional Movement Screen (FMS) total score. Data were analyzed using one-way analysis of covariance (ANCOVA), with the corresponding pre-test score entered as a covariate for each outcome.

Results ANCOVA revealed significant between-group differences in all four outcomes after adjustment for pre-test scores (all $p < 0.001$), with large effect sizes (partial $\eta^2 = 0.505–0.564$). Adjusted post-test means were higher in the EG than in the CG for peak ankle dorsiflexion (24.62° vs. 19.08°), evertor peak torque (23.55 vs. 18.05 N·m), Y-Balance composite score (92.32% vs. 84.98%), and FMS total score (16.28 vs. 14.02 points).

Conclusion An 8-week progressive, multidimensional exercise-based rehabilitation program was associated with higher adjusted post-test values across the four measured biomechanical and functional outcomes in male athletes with CAI. These findings indicate short-term improvements in peak ankle dorsiflexion, evertor peak torque, Y-Balance composite score, and FMS total score following the rehabilitation program.

*** Corresponding Author:**

Soundus Farouk Honi

Sunfaroq@uowasit.edu.iq

This is an open access article distributed under the terms of the Creative Commons Attribution 4.0 International License (CC BY 4.0), which permits unrestricted use, distribution, adaptation, and reproduction in any medium or format, provided the original author(s) and the source are credited.

© 2027 The Author(s). Journal of Sport Biomechanics published by Islamic Azad University, Hamedan Branch.

Introduction

Knee and ankle injuries are two of the most prevalent injuries in sports; however, lateral ankle sprains (LAS) are among the most common lower-limb injuries and contribute substantially to missed training sessions and competitions. According to previous studies, approximately 40% of individuals who sustain an acute LAS may eventually develop chronic ankle instability (CAI), a condition associated with a range of symptoms, including a sensation of the joint giving way, recurrent sprains, and reduced functional confidence (1, 2). The effects extend beyond pain alone; CAI can lead to changes in the body's neuromuscular and structural systems, making it extremely difficult for athletes to return to their previous level of performance (3). CAI stems from deficiencies in both static and dynamic stabilizing mechanisms. Research in this field confirms that athletes with CAI exhibit clear biomechanical deficits, including abnormal kinematic changes in the lower-limb joints even during simple movements such as walking, as well as increased ankle inversion during high-demand activities such as landing, which may lead to reinjury of the joint (4, 5). Muscular imbalance, particularly in ankle stabilizers such as the evertors and dorsiflexors, represents a significant deficit. This muscular imbalance can be measured using isokinetic dynamometry, which is considered the gold standard for assessing muscular strength imbalances (6). In addition, deficits in sensorimotor function result in a significant reduction in dynamic balance, which can be measured using the Y-Balance Test (YBT), as well as impaired functional movement ability. Poor functional movement ability increases the risk of secondary injury to other joints, such as the knee and hip (7, 8).

Current reviews indicate that isolated approaches, such as balance exercises, are effective in improving postural control in individuals with CAI (9). Nevertheless, the research problem lies in the fact that most conventional programs focus on only one parameter and overlook a comprehensive approach that combines precise changes in joint biomechanics with improvements in overall body function. This is evident from the lack of randomized controlled trials (RCTs) employing a progressive and comprehensive rehabilitation program that incorporates mobility, deep proprioception, strength, and neuromuscular control, combined with the assessment of outcomes using a variety of tools ranging from simple two-dimensional motion analysis, such as Kinovea, to comprehensive functional assessment tools, such as the FMS. Therefore, a scientific question remains as to whether this type of approach can actually produce differences in biomechanical and functional performance (10, 11). Accordingly, the present study examines whether an 8-week exercise-based rehabilitation program, delivered three times per week, can enhance biomechanical and functional performance in athletes with CAI. Biomechanical outcomes include ankle joint kinematics and isokinetic muscle strength, whereas functional performance is evaluated using the YBT and FMS. The effects of the intervention are determined by comparing changes in the EG, which participated in the rehabilitation program, with those observed in the CG, which continued its usual activities.

It was hypothesized that the EG would demonstrate statistically significant improvements in post-test measurements compared with pre-test measurements and with the CG across all study variables. These improvements were expected to include changes in ankle kinematic angles, increases in isokinetic muscle torque, higher YBT scores, and enhanced total FMS scores, thereby confirming the efficacy of the comprehensive rehabilitation program in restoring biomechanical and functional stability. The scientific novelty of this research lies in the use of a multidimensional evaluation approach that connects micromechanical changes at the joint level, assessed using Kinovea and dynamometry, with macromotor changes at the whole-body level, assessed using the FMS. Although recent consensus statements have recommended comprehensive evaluation of athletes to better understand injury mechanisms, very few studies have used a specific rehabilitation protocol and subsequently evaluated its effects across these four dimensions (12, 13). The use of the FMS as a method for evaluating movement quality both globally and locally within a biomechanical context offers an interesting approach to examining how the effects of rehabilitation are translated

from the injury site to the entire kinematic chain. This research is significant because it provides scientifically supported evidence regarding the effectiveness of an applied rehabilitation program that is practical for use in gyms and requires simple equipment, such as resistance bands and instability training devices. The program can be used by coaches and sports rehabilitation practitioners to address the underlying causes of ankle instability. The results of this research will not only help improve athletic performance and prevent injuries but will also establish certain standards that may facilitate the use of assessment tools, including Kinovea, the FMS, and the YBT, to monitor progress.

Methods

Study Design

The study employed a single-blind randomized controlled trial (RCT) design to evaluate the effects of an exercise-based rehabilitation program on biomechanical and functional performance among athletes with CAI. The trial was conducted from 2 January 2026 to 27 February 2026. The study was not prospectively registered in a clinical trial registry prior to the commencement of participant recruitment. Ethical clearance was granted by the Institutional Review Board of the College of Physical Education and Sport Sciences, University of Wasit (Approval Code: WAST-2026-01).

Participants

A total of 30 male athletes actively involved in court- and field-based team sports, including football, basketball, and volleyball, were screened for eligibility at local sports clubs. Six athletes were excluded because they did not meet the predefined eligibility criteria, resulting in 24 eligible participants who were enrolled in the study. The participants had a mean age of 21.5 ± 2.3 years, height of 178.4 ± 6.2 cm, and body mass of 75.8 ± 8.1 kg. All participants provided written informed consent before participation. To ensure a controlled and homogeneous sample, all participants were required to meet the criteria for CAI recommended by the International Ankle Consortium: (a) a history of at least one significant acute lateral ankle sprain occurring at least 12 months before participation; (b) a history of ankle "giving way" or recurrent ankle sprain, defined as at least two episodes within the previous 6 months; (c) a subjective feeling of ankle instability; and (d) a score of ≤24 on the Cumberland Ankle Instability Tool (CAIT). Participants were required to be physically active for at least 150 min per week. Exclusion criteria included a history of lower-limb fracture or surgical procedures, an ankle injury within the previous 3 months, and vestibular or visual disorders that could affect balance performance. Following eligibility screening and baseline assessment, the 24 eligible participants were randomly allocated, using a computer-generated randomization sequence, to either the experimental group (EG; n = 12) or the control group (CG; n = 12). Allocation concealment was maintained using sequentially numbered, opaque, sealed envelopes. All participants had unilateral CAI. The involved limb was defined as the symptomatic ankle identified by the participant as the unstable limb and meeting the predefined CAI eligibility criteria. The involved limb was consistently used for all biomechanical, strength, balance, and functional assessments at both pre-test and post-test. Participants with bilateral CAI were not included in the study. The required sample size was determined a priori using G*Power software (version 3.1.9.7, Germany). The calculation was based on a repeated-measures ANOVA with a within–between interaction, assuming a moderate effect size ($f = 0.25$) consistent with previous research (14), an alpha level of 0.05, and a statistical power of 80% ($1 - \beta = 0.80$). This analysis indicated that at least 22 participants were required. To account for potential attrition during the intervention period, 24 participants were recruited. Following the baseline assessment, participants were randomly assigned to either the EG (n = 12) or CG (n = 12) using a computer-generated randomization sequence. Group assignments were concealed in sequentially prepared, opaque, sealed envelopes. The assessors responsible for biomechanical and functional measurements were blinded to participants' group allocation; however, blinding of the participants and treating therapist was not feasible because of the nature of the intervention. Baseline characteristics of the EG and CG are

presented descriptively in Table 1. The groups had comparable pre-test values across the biomechanical and functional outcomes. Baseline values were not subjected to statistical significance testing, consistent with recommendations for reporting randomized controlled trials. The corresponding pre-test values were subsequently entered as covariates in the ANCOVA models to adjust the post-test comparisons for baseline values.

Table 1. Baseline Descriptive Characteristics of the Experimental and Control Groups

Variable	EG Mean ± SD	CG Mean ± SD
Peak Ankle Dorsiflexion Angle (°)	18.4 ± 4.1	18.9 ± 3.8
Evertor Peak Torque at 60°/s (N·m)	18.1 ± 3.9	17.8 ± 4.2
Y-Balance Composite Score (%)	83.9 ± 5.2	84.5 ± 4.8
FMS (score)	13.4 ± 1.7	13.8 ± 1.5

Note. Values are presented as mean ± standard deviation (SD). Baseline values are presented descriptively and were not subjected to significance testing.

Outcome Measures and Testing Procedures

All tests performed before and after the eight-week intervention were conducted in a laboratory setting, with adequate rest between different tests to minimize any potential effect of fatigue on the outcomes. Before testing, all participants completed a 5-min warm-up on a stationary cycle ergometer.

Ankle Joint Kinematics

Sagittal-plane ankle kinematics were assessed during a single-leg forward drop jump from a standardized 30-cm box. Participants stepped off the box using the uninvolved limb, landed on the involved limb, and immediately performed a maximal vertical jump. The involved limb was defined a priori as the symptomatic and unstable limb that met the predefined criteria for unilateral CAI, and the same limb was assessed during all pre- and post-test measurements. A digital video camera (Sony FDR-AX43, Japan), recording at 60 frames/s, was positioned perpendicular to the sagittal plane of the tested limb on a standardized tripod, with the optical axis aligned approximately with the level of the ankle joint. The camera was positioned at a standardized distance of 3.0 m from the participant, and the camera height and orientation were kept constant across all participants and testing sessions. The recording area was calibrated using a 1-m rigid calibration rod placed within the movement plane before data collection. Reflective markers were affixed to predefined anatomical reference points, namely the lateral femoral epicondyle, lateral malleolus, calcaneal tuberosity, and fifth metatarsal head. These markers were used to establish the shank and foot segments and to derive the ankle joint angle in the sagittal plane. The ankle angle was calculated as the angle formed between the longitudinal axes of the shank and foot, with larger values indicating a greater degree of ankle dorsiflexion. Identical anatomical marker placement criteria and camera settings were applied consistently across all participants and assessment sessions. The landing phase was considered to begin at the first instance of foot–ground contact and to end at the point of maximum vertical displacement of the center of mass during the landing sequence, immediately before the subsequent maximal vertical jump. Peak ankle dorsiflexion was operationally defined as the greatest sagittal-plane dorsiflexion angle recorded within this interval. Frame-by-frame video analysis was used to identify the frame corresponding to this maximum value, which was subsequently documented as the peak dorsiflexion angle. Video recordings were analyzed frame-by-frame using Kinovea software (version 0.9.3). No additional digital smoothing filter was applied in order to preserve the raw kinematic spatial coordinates, and the anatomical landmarks were manually digitized by the assessor. Three successful trials were recorded for each participant, with adequate recovery between trials, and the mean peak dorsiflexion angle across the three trials was used for statistical analysis.

A trial was considered successful when the participant completed the prescribed drop-jump sequence and maintained contact with the designated testing area without an obvious loss of balance or additional foot contact. The assessor who performed the video digitization was blinded to group allocation. To assess intra-rater reliability, the assessor re-digitized a randomly selected subset of 20% of the video recordings (n = 8) one week after the initial analysis. Intraclass correlation coefficients (ICC) were calculated, demonstrating excellent intra-rater reliability for the peak ankle dorsiflexion angle (ICC = 0.94, 95% CI: 0.85–0.98). Because drop-jump exercises were incorporated during the final phase of the rehabilitation program and the same task was subsequently used for biomechanical outcome assessment, a task-specific practice or familiarization effect cannot be completely excluded. Therefore, it is possible that improvements in ankle biomechanics and familiarity with the drop-jump task were partially responsible for the observed increase in peak ankle dorsiflexion.

Isokinetic Muscle Strength

Ankle isokinetic muscle strength was assessed using a Biodex System 4 Pro dynamometer (Biodex Medical Systems, Inc., Shirley, NY, USA). Participants were positioned in the dynamometer chair with the hip flexed to approximately 80° and the test knee fully extended (0°). The trunk, pelvis, and distal thigh were stabilized using standardized straps to minimize compensatory movements. The dynamometer attachment was positioned and aligned with the anatomical axis of ankle inversion–eversion, and the foot was securely fixed to the appropriate footplate according to the manufacturer's positioning guidelines. The alignment was checked before each test to ensure consistent positioning of the ankle joint and dynamometer axis. Before testing, the dynamometer was calibrated according to the manufacturer's standard procedures, and gravity correction was performed with the tested limb positioned in the test apparatus. Participants completed a standardized familiarization procedure consisting of three submaximal practice actions to minimize learning effects. The test consisted of five maximal concentric inversion and eversion actions at an angular velocity of 60°/s, with 60 s of rest between testing bouts. Verbal encouragement was provided during each maximal effort. Peak torque was recorded in N·m. The involved limb was tested consistently in accordance with the predefined definition of the symptomatic and unstable limb. Because all participants had unilateral CAI, the same involved limb was used for the pre-test and post-test assessments. The previously stated procedure of testing the limb that had not undergone surgery was removed because participants with a history of lower-limb surgery were excluded from the study. Both inversion and eversion were assessed during the isokinetic testing procedure; however, evertor peak torque at 60°/s was the prespecified isokinetic outcome included in the statistical analysis because the rehabilitation program and primary outcome assessment focused on ankle evertor strength as an indicator of dynamic lateral ankle stability. Invertor strength was not included in the statistical analysis or reported as a study outcome.

Dynamic Balance

Dynamic postural stability was assessed using the Y-Balance Test Kit (Move2Perform, USA) according to standardized procedures (15, 16). Participants stood barefoot on the involved limb at the center of the testing platform, with their hands placed on their hips. Lower-limb length was measured in the supine position from the anterior superior iliac spine to the most distal point of the medial malleolus before testing. Participants were instructed to reach as far as possible with the contralateral limb in three directions: anterior (ANT), posterolateral (PL), and posteromedial (PM). Reach distances were recorded in centimeters. A trial was considered invalid if the participant lost balance, transferred weight onto the reaching limb, or lifted the stance foot from the platform. Participants performed three familiarization trials in each direction before the formal assessment, followed by three recorded trials in each direction. The composite reach score was calculated as the sum of the maximum reach distances in the three directions, normalized to limb length and expressed as a percentage. Because Y-Balance exercises were incorporated into the rehabilitation program and the Y-Balance Test was subsequently used as an outcome measure, the possibility of a

task-specific practice effect cannot be excluded. Therefore, improvements in the Y-Balance composite score may partly reflect familiarity with the assessment task in addition to changes in dynamic postural control.

Functional Movement

Fundamental movement patterns were assessed using the FMS tests and a standardized FMS kit (17). The seven FMS tests were administered in a standardized manner by an FMS-certified examiner. Each of the seven tests was scored using a discrete scale from 0 to 3, where a score of 0 indicated pain associated with performance of the movement. The composite score out of 21, as well as any asymmetry between the two sides of the body, was recorded. With regard to the pathology of this particular population, the analysis primarily focused on the scores obtained from the Deep Squat, Hurdle Step, and In-line Lunge assessments.

Intervention Protocol

Participants assigned to the EG underwent a supervised, structured exercise-based rehabilitation program for 8 weeks, comprising 24 training sessions (3 sessions per week). All sessions were supervised by a sports rehabilitation specialist, and each session lasted approximately 50–60 min. The program was developed using a progressive periodization approach to systematically address the underlying impairments associated with CAI. Standard training equipment, including resistance bands, foam pads, BOSU, agility ladders, and step boxes, was used to facilitate the prescribed exercises. Exercise intensity and progression were monitored throughout the intervention, and the training load or exercise pace was reduced when participants reported an increase in pain exceeding 2/10 on the visual analog scale. The detailed micro-periodization, including exercise prescription, target variables, volume, intensity, rest intervals, and progression criteria, is presented in Table 2. All participants in the EG completed the full 24-session rehabilitation program, corresponding to 100% adherence. No participant discontinued the intervention, and no adverse events or exercise-related complications were recorded during the 8-week intervention period. The prescribed exercises were performed as planned, and no major modifications to the exercise protocol were required. Any minor adjustments in exercise intensity or pace were made according to individual tolerance and clinical response without changing the prescribed exercise objectives or progression structure. The CG continued their usual sport-specific training and daily physical activities during the same 8-week period and did not receive the structured exercise-based rehabilitation program. Participants in the CG were instructed not to initiate additional ankle-specific rehabilitation or proprioceptive training during the intervention period. The frequency, duration, and content of their usual training activities were not experimentally standardized or controlled. Consequently, individual differences in training exposure and concurrent physical activity may have existed among participants in the CG and were considered a potential source of uncontrolled variability.

Statistical Analysis

Statistical analyses were performed using SPSS Statistics for Windows (Version 26.0, IBM Corp., Armonk, NY, USA). The Shapiro–Wilk test was used to assess the normality of the data, while Levene's test was applied to examine the homogeneity of variances. Data are reported as means with corresponding standard deviations (SD). For each dependent variable, a one-way analysis of covariance (ANCOVA) was conducted to compare post-test outcomes between the EG and CG, with the corresponding pre-test score entered as a covariate to adjust for baseline values. Adjusted post-test means and their 95% confidence intervals (CIs) were reported for both groups. Effect sizes were expressed as partial eta squared (η^2p), with values of 0.01, 0.06, and 0.14 interpreted as small, medium, and large effects, respectively. Statistical significance was set at $p < 0.05$. Although individual FMS items are scored on an ordinal 0–3 scale, the present analysis used the total FMS score (range: 0–21), which represents the sum of seven movement-pattern scores. The total score was treated as a continuous outcome for the purposes of the ANCOVA because it provides a composite measure across multiple movement domains and was analyzed as an approximately

continuous summary measure. This approach was applied consistently to the pre-test and post-test total scores.

Table 2. Progressive Eight-Week Exercise-Based Rehabilitation Program for Athletes with CAI

Phase & Week	Primary Objective & Primary Outcome Variable	Prescribed Exercises	Exercise Volume	Intensity & Rest Intervals	Progression Criteria
Foundation, Weeks 1–2	Restore pain-free ROM; basic proprioception; Primary Outcome: Isokinetic evertor peak torque	Warm-up & Mobility: cycle ergometer, ankle circles, static calf stretches. Balance: double-leg stance on foam pad. Strength: Thera-Band dorsiflexion, eversion, and inversion (slow concentric contractions).	Strength: 3 × 15–30; Balance: 3 × 30 s; Functional: —	Low (RPE 11–12); Rest: 45 s between sets; 90 s between exercises	Ability to complete all exercises without pain or joint instability.
Transition, Weeks 3–4	Introduce single-leg (SL) control; improve movement quality; Primary Outcome: FMS	Warm-up & Mobility: dynamic calf stretches, ankle ABCs. Balance: SL stance on firm/foam surface, tandem walk. Strength: SL heel raises, Thera-Band eversion/plantarflexion. Functional: SL mini-squats, front lunges.	Strength: 3 × 10–12; Balance: 3 × 20–30 s; Functional: 3 × 8–10 repetitions	Low–Moderate (RPE 13–14); Rest: 45–60 s between sets; 90 s between exercises	Ability to maintain SL balance on foam for >20 s without excessive postural tremor.
Dynamic Control, Weeks 5–6	Eccentric muscle control; dynamic postural stability; Primary Outcome: Y-Balance composite score	Warm-up & Mobility: dynamic joint mobilizations. Balance: SL balance on BOSU (stable side), Y-Balance practice (ANT). Strength: SL heel raises (eccentric focus), fast concentric/eccentric Thera-Band eversion. Functional: SL forward hops to stabilization, lateral hurdle steps.	Strength: 3 × 8–10; Balance: 3 × 30 s; Functional: 3 × 5–8 repetitions	Moderate–High (RPE 14–15); Rest: 60 s between sets; 120 s between exercises (higher neural demand)	Controlled landing during hopping tasks without valgus or ankle inversion collapse.
Sport-Specific, Weeks 7–8	Plyometric preparation; multi-planar agility; Primary Outcomes: Drop-jump kinematics (Kinovea) and FMS	Warm-up & Mobility: high-knee skips, dynamic CARs. Balance: SL balance on BOSU (dome side), Y-Balance (PM/PL). Strength: plyometric SL heel raises, resisted monster walks. Functional: drop jumps from a 30-cm box, 45°/90° cutting drills, reactive agility.	Strength: 3 × 5–8; Balance: 3 × 30 s; Functional: 3 × 5 repetitions	High (Reactive) (RPE 15–16); Rest: 90 s between sets; 120 s between exercises (full CNS recovery)	Successful execution of drop-jump landings without dynamic knee valgus or excessive ankle inversion, indicating readiness for return to sport.

Note. ANT = anterior; CNS = central nervous system; CON = concentric contraction; ECC = eccentric contraction; PL = posterolateral; PM = posteromedial; ROM = range of motion; RPE = rating of perceived exertion (Borg 6–20 scale); SL = single-leg. Each rehabilitation session lasted approximately 50–60 minutes and was performed three times per week for eight weeks under the supervision of a certified sports rehabilitation specialist. The CG continued their usual sport-specific training and daily physical activities during the 8-week study period and did not receive the structured exercise-based rehabilitation program provided to the EG. Participants in the CG were instructed not to initiate any additional ankle-specific rehabilitation or proprioceptive training during the intervention period. However, the frequency, duration, and content of their usual training activities were not experimentally standardized or controlled, reflecting their normal training routines. Exercise intensity and progression were individualized according to each participant's tolerance, clinical response, and functional performance.

Results

Preliminary analyses confirmed that the assumptions required for the planned parametric analyses were satisfied. Specifically, the Shapiro–Wilk test indicated that the data were normally distributed, while Levene's test confirmed the homogeneity of variance across the dependent variables. Accordingly, a one-way analysis of covariance (ANCOVA) was performed for each dependent variable to compare post-test outcomes between the EG and CG while adjusting for the corresponding pre-test scores. All 24 randomized athletes completed the 8-week intervention period and were included in the per-protocol analysis. Descriptive statistics (mean ± SD), adjusted post-test means, 95% confidence intervals (CIs), and ANCOVA results for all biomechanical and functional variables are presented in Table 3. The results for each outcome are described separately below.

Biomechanical Performance

Following adjustment for the corresponding baseline measurements, ANCOVA demonstrated a significant between-group effect on peak ankle dorsiflexion during the drop-jump landing task ($F = 48.25$, $p < 0.001$, $\eta^2p = 0.564$). The estimated marginal mean for the post-test dorsiflexion angle was 24.62° (95% CI: 23.21–26.03) in the EG, compared with 19.08° (95% CI: 17.67–20.49) in the CG. A significant group effect was also found for isokinetic evertor peak torque measured at 60°/s after controlling for baseline values ($F = 45.10$, $p < 0.001$, $\eta^2p = 0.542$). The adjusted post-test torque values were 23.55 N·m (95% CI: 22.18–24.92) for the EG and 18.05 N·m (95% CI: 16.68–19.42) for the CG. The EG exhibited greater adjusted post-intervention values for both biomechanical measures than the CG, as reported in Table 3.

Functional Performance

After controlling for the respective baseline values, ANCOVA demonstrated a statistically significant difference between the EG and CG in the post-test Y-Balance composite score ($F = 41.60$, $p < 0.001$, $\eta^2p = 0.523$). The estimated marginal mean was 92.32% (95% CI: 90.41–94.23) in the EG, compared with 84.98% (95% CI: 83.07–86.89) in the CG. A significant between-group effect was also identified for the post-test FMS total score following adjustment for baseline performance ($F = 38.75$, $p < 0.001$, $\eta^2p = 0.505$). The corresponding adjusted means were 16.28 points (95% CI: 15.54–17.02) for the EG and 14.02 points (95% CI: 13.28–14.76) for the CG. Overall, the adjusted post-test values were higher in the EG for both dynamic postural control and functional movement performance, as shown in Table 3.

Table 3. ANCOVA Results for Post-Test Outcomes Adjusted for Pre-Test Scores

Variable	Group	Pre-test Mean ± SD	Post-test Mean ± SD	Adjusted Post-test Mean	95% CI	F	p	Partial η^2
Peak ankle dorsiflexion angle (°)	EG	18.4 ± 4.1	24.5 ± 3.2	24.62	23.21–26.03	48.25	<0.001	0.564
	CG	18.9 ± 3.8	19.2 ± 3.9	19.08	17.67–20.49			
Evertor peak torque at 60°/s (N·m)	EG	18.1 ± 3.9	23.4 ± 3.2	23.55	22.18–24.92	45.10	<0.001	0.542
	CG	17.8 ± 4.2	18.2 ± 4.0	18.05	16.68–19.42			
Y-Balance composite score (%)	EG	83.9 ± 5.2	92.1 ± 4.5	92.32	90.41–94.23	41.60	<0.001	0.523
	CG	84.5 ± 4.8	85.2 ± 4.9	84.98	83.07–86.89			
FMS (score)	EG	13.4 ± 1.7	16.2 ± 1.4	16.28	15.54–17.02	38.75	<0.001	0.505
	CG	13.8 ± 1.5	14.1 ± 1.6	14.02	13.28–14.76			

Note. EG = experimental group; CG = control group; CI = confidence interval; FMS = Functional Movement Screen; partial η^2 = partial eta squared. F-values represent the between-group effect from ANCOVA with the corresponding pre-test score entered as the covariate. Adjusted post-test means are estimated marginal means.

Graphical representations in Figures 1–3 illustrate the observed changes in the study outcomes before and after the 8-week exercise-based rehabilitation program. Fig. 1 shows increases in both peak ankle dorsiflexion angle and evertor peak torque at 60°/s in the EG, whereas only minor changes were observed in the CG. Fig. 2 illustrates an increase in the Y-Balance composite score in the EG, while only a slight change was observed in the CG. Fig. 3 shows an increase in the FMS score in the EG, whereas the CG demonstrated only a slight change. The bars represent observed mean values, and the error bars represent ±1 standard deviation (SD).

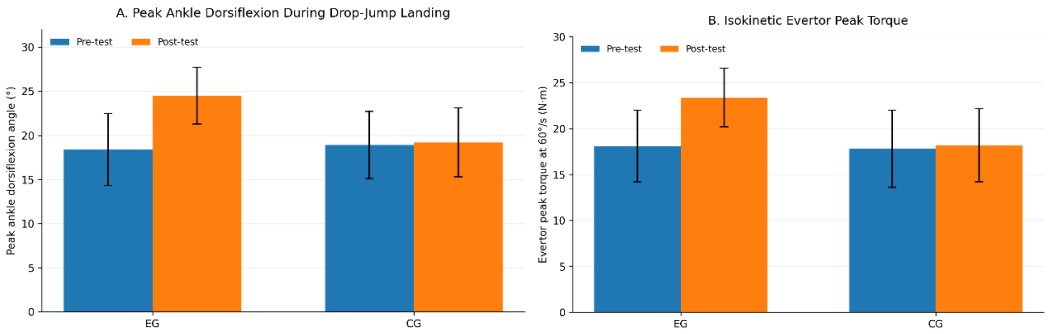


Fig. 1. Pre- and post-test biomechanical outcomes in the experimental (EG) and control (CG) groups: (A) peak ankle dorsiflexion angle (°); (B) isokinetic evertor peak torque at 60°/s (N·m). Data are presented as mean ± SD.

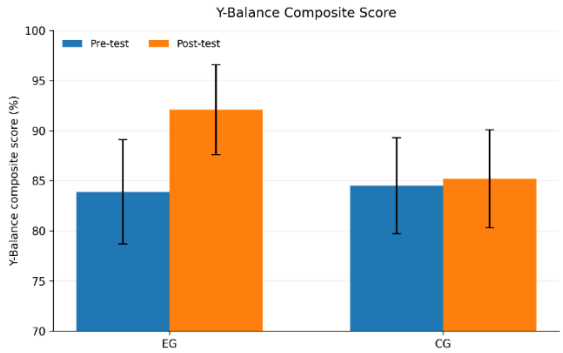


Fig. 2. Pre- and post-test Y-Balance composite scores (%) in the experimental (EG) and control (CG) groups. Data are presented as mean ± SD.

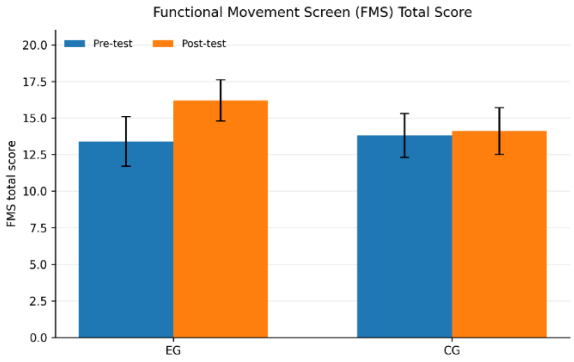


Fig. 3. Pre- and post-test Functional Movement Screen (FMS) total scores in the experimental (EG) and control (CG) groups. Data are presented as mean ± SD.

Discussion

The most important finding of the present study was that the eight-week exercise-based rehabilitation program was associated with significant improvements in biomechanical and functional performance in athletes with CAI. After adjustment for the corresponding pre-test scores, ANCOVA demonstrated significant between-group differences in all four dependent variables, with the EG demonstrating higher adjusted post-test values than the CG. Specifically, the EG showed greater peak ankle dorsiflexion during the drop-jump landing, higher isokinetic evertor peak torque, better dynamic postural control, and improved functional movement quality compared with the CG, which continued its usual training activities. These findings suggest that a progressive, multidimensional rehabilitation program involving the gradual development of joint mobility, muscular strength, proprioception, and sport-specific neuromuscular control may be effective in improving biomechanical and functional outcomes in athletes with CAI (18).

From a biomechanical perspective, the improvement in peak ankle dorsiflexion during the landing maneuver is clinically relevant. Individuals with CAI commonly demonstrate restricted ankle dorsiflexion, which may be associated with limitations in joint arthrokinematics, increased posterior joint stiffness, or fear-avoidance behavior, potentially leading to compensatory movement patterns such as early heel rise or excessive frontal-plane motion (19). In the present study, the improvement may be attributable to the initial stages of the rehabilitation program, which emphasized ankle mobilization and calf-muscle flexibility, followed by the progressive introduction of drop-jump landing tasks. Task-specific loading may have facilitated sensorimotor adaptation and improved feed-forward motor control, enabling participants to absorb ground-reaction forces through a greater sagittal-plane range of motion rather than relying on potentially undesirable compensatory strategies (20). Concomitantly, the EG demonstrated greater isokinetic evertor peak torque at 60°/s than the CG following the intervention. This finding addresses a muscular deficit that has been well documented in individuals with CAI. Reduced ankle-evertor strength may compromise dynamic joint stability by limiting the ability of the musculature to resist inversion forces during cutting and landing activities (21). The progressive overload incorporated into the rehabilitation protocol, progressing from controlled concentric Thera-Band exercises to more demanding eccentric exercises, may have contributed to improved muscular capacity and neuromuscular control. Enhanced evertor strength may contribute to improved control of ankle mechanics during dynamic tasks by providing greater resistance to excessive inversion and supporting functional lower-limb stability (22).

With regard to dynamic postural control, the EG demonstrated a significantly higher adjusted post-test Y-Balance composite score than the CG. This improvement is consistent with the substantial proprioceptive and balance-oriented component of the rehabilitation protocol. Progression from stable to unstable surfaces, including exercises performed on devices such as the BOSU, provides an increased somatosensory challenge that may stimulate sensory reweighting and improve postural control strategies (23). The combination of dynamic balance exercises and progressive strength training may have produced a complementary effect whereby improved muscular capacity provided a more stable mechanical foundation for the central nervous system to control greater reach distances while maintaining postural stability (24). Another important finding was the improvement in functional movement quality, as reflected by the FMS total score. The EG demonstrated a higher adjusted post-test FMS total score than the CG. The FMS evaluates fundamental movement patterns that require an interaction between proximal stability and distal mobility. CAI may alter proximal movement strategies and contribute to deficits in hip control and changes in trunk alignment during unilateral tasks, a phenomenon described as the “proximal cascade” of CAI (25). Improvements in distal ankle mobility and stability may therefore contribute to more efficient execution of whole-body movement patterns. In particular, improved dorsiflexion may facilitate more appropriate squat-related movement patterns, while enhanced lower-limb and hip stabilization during unilateral tasks may contribute to better performance on movement patterns such as the hurdle step (26).

The clinical relevance of these findings is also noteworthy. The study employed accessible and clinically applicable assessment methods, including two-dimensional motion analysis using Kinovea to assess landing mechanics, isokinetic dynamometry to quantify muscular strength, and the Y-Balance and FMS tests to evaluate dynamic postural control and global movement quality. Two-dimensional motion analysis has previously demonstrated utility for discriminating biomechanical performance in athletic populations (27). More importantly, the present findings indicate that a structured, progressive rehabilitation program can produce substantial between-group differences across multiple biomechanical and functional outcomes within an eight-week period. These findings support a rehabilitation approach that extends beyond symptom reduction and emphasizes the restoration of neuromuscular control, muscular capacity, dynamic balance, and overall movement quality. Accordingly, rehabilitation for CAI may benefit from progressing beyond the resolution of pain or basic functional symptoms toward the restoration of comprehensive movement capacity and sport-related neuromuscular function (28).

Several limitations of the present study should be acknowledged. First, the relatively small sample size and inclusion of male athletes only may limit the generalizability of the findings to female athletes and broader athletic populations with CAI. Second, ankle landing biomechanics were assessed using two-dimensional video analysis in the sagittal plane; therefore, potentially relevant frontal- and transverse-plane movements could not be evaluated. Third, the isokinetic assessment focused exclusively on concentric peak torque of the ankle evertor muscles at an angular velocity of 60°/s. Eccentric muscle function and the isokinetic torque of the ankle invertors were not evaluated. The findings provide only a partial representation of the agonist–antagonist strength balance and do not fully capture eccentric muscular control during sport-specific ankle movements. Fourth, although post-test outcomes were adjusted for baseline values using ANCOVA, the CG continued its usual training activities, which were not experimentally standardized in terms of frequency, duration, or content and may therefore have introduced uncontrolled variability between participants. Fifth, Y-Balance and drop-jump tasks were incorporated into the rehabilitation program and were subsequently used as outcome assessments. Therefore, task-specific practice or familiarization effects cannot be completely excluded, and some of the observed improvements in these outcomes may reflect increased familiarity with the testing tasks in addition to genuine changes in neuromuscular function and ankle biomechanics. Although the FMS total score was analyzed as a continuous composite outcome, its individual component scores are ordinal, which should be considered when interpreting the statistical findings. Finally, the study did not include a long-term follow-up assessment; consequently, it remains unclear whether the observed improvements in biomechanical and functional outcomes are maintained after completion of the eight-week rehabilitation program. Future research should address these limitations by recruiting larger and more diverse samples, incorporating three-dimensional biomechanical analysis, assessing both invertor and evertor muscle function under concentric and eccentric conditions across multiple angular velocities, standardizing or monitoring CG activities, and including longer-term follow-up assessments.

Conclusion

This randomized controlled trial found that an 8-week progressive, multidimensional exercise-based rehabilitation program was associated with higher post-test values across four measured outcomes in male athletes with CAI after adjustment for the corresponding pre-test scores. The EG demonstrated higher adjusted post-test values for peak ankle dorsiflexion during drop-jump landing, isokinetic evertor peak torque at 60°/s, Y-Balance composite score, and FMS total score than the CG. These findings indicate short-term improvements in the measured biomechanical and functional outcomes following the rehabilitation program. The study did not assess injury recurrence, return to sport, ground-reaction forces, or long-term maintenance of the observed changes; therefore, conclusions regarding injury prevention, return-to-sport readiness, or broader neuromuscular recovery should not be drawn. Further research with larger and more diverse

samples, three-dimensional biomechanical assessments, additional measures of ankle muscle function, and long-term follow-up is warranted.

Ethical Considerations

Compliance with ethical guidelines

Ethical approval was obtained from the Institutional Review Board (IRB) of the College of Physical Education and Sport Sciences, University of Wasit (Approval Code: WAST-2026-01). Written informed consent was obtained from all participants prior to participation. All procedures were conducted in accordance with the Declaration of Helsinki, and the confidentiality and anonymity of all participants were maintained.

Funding

This study received no external funding and was fully self-funded by the author.

Authors' contributions

Soundus Farouk Honi: Conceptualization and study design; investigation; data analysis and interpretation; writing – original draft; writing – review and editing. The author read and approved the final version of the manuscript.

Conflicts of interest

The author declares no conflict of interest.

مقاله پژوهشی

تأثیر یک برنامه توان‌بخشی مبتنی بر تمرین بر عملکرد بیومکانیکی و حرکات عملکردی در ورزشکاران مبتلا به بی‌ثباتی مزمن مچ پا

سندس فاروق حونی[۱]

۱. اداره آموزش واسط، دانشکده آموزش آزاد، مرکز مطالعات واسط، واسط، عراق.

Scan to read online

Citation: Honi SF. The Effect of an Exercise-Based Rehabilitation Program on Biomechanical Performance and Functional Movement in Athletes with Chronic Ankle Instability. Journal of Sport Biomechanics. 2027;12(4):662–689. https://doi.org/10.66224/JSportBiomech.12.4.662

اطلاعات مقاله:

دریافت: ۳ مرداد ۱۴۰۵

پذیرش: ۸ مهر ۱۴۰۵

انتشار: ۱۰ مهر ۱۴۰۵

کلیدواژه‌ها:

پیچ‌خوردگی مچ پا؛ حس عمقی؛ دامنه حرکتی؛ تعادل پاسچرال؛ قدرت عضلانی

چکیده

هدف بی‌ثباتی مزمن مچ پا (CAI) با نقص‌های بیومکانیکی، کاهش کنترل پویای پاسچر و اختلال در حرکات عملکردی همراه است. هدف این مطالعه بررسی تأثیر یک برنامه توان‌بخشی مبتنی بر تمرین به مدت ۸ هفته بر عملکرد بیومکانیکی و عملکردی ورزشکاران مبتلا به بی‌ثباتی مزمن مچ پا بود.

روش‌ها بیست‌وچهار ورزشکار مرد مبتلا به بی‌ثباتی مزمن مچ پا به‌صورت تصادفی در گروه تجربی (۱۲ نفر) یا گروه کنترل (۱۲ نفر) قرار گرفتند. گروه تجربی به مدت ۸ هفته و سه جلسه در هفته در یک برنامه توان‌بخشی ساختاریافته و پیش‌رونده شامل تمرینات تحرک‌پذیری، حس عمقی، تقویت عضلانی و کنترل عصبی‌عضلانی شرکت کرد. گروه کنترل تمرینات ورزشی معمول و فعالیت‌های بدنی روزانه خود را ادامه داد. متغیرهای مورد بررسی شامل اوج دورسی‌فلکشن مچ پا هنگام فرود از پرش، اوج گشتاور ایزوکینتیک عضلات اورتور در سرعت زاویه‌ای ۶۰ درجه بر ثانیه، امتیاز ترکیبی آزمون Y-Balance و امتیاز کل غربالگری حرکات عملکردی (FMS) بود. داده‌ها با استفاده از تحلیل کوواریانس یک‌راهه تجزیه‌وتحلیل شدند و برای هر متغیر، مقدار متناظر پیش‌آزمون به‌عنوان متغیر هم‌پراش وارد مدل شد.

یافته‌ها نتایج تحلیل کوواریانس پس از تعدیل مقادیر پیش‌آزمون، تفاوت معنی‌داری را بین دو گروه در هر چهار متغیر نشان داد (برای همه $p< ۰/۰۰۱$) و اندازه اثرها بزرگ بودند (۰/۵۶۴–۰/۵۰۵=مجذور اتا) میانگین‌های تعدیل‌شده پس‌آزمون در گروه تجربی در مقایسه با گروه کنترل برای اوج دورسی‌فلکشن مچ پا (۲۴/۶۲ در برابر ۱۹/۰۸ درجه)، اوج گشتاور عضلات اورتور (۲۳/۵۵ در برابر ۱۸/۰۵ نیوتن‌متر)، امتیاز ترکیبی Y-Balance (۹۲/۳۲ در برابر ۸۴/۹۸ درصد) و امتیاز کل FMS (۱۶/۲۸ در برابر ۱۴/۰۲ امتیاز) بیشتر بود.

نتیجه‌گیری یک برنامه توان‌بخشی مبتنی بر تمرین، پیش‌رونده و چندبعدی به مدت ۸ هفته، با مقادیر تعدیل‌شده بالاتر پس‌آزمون در چهار پیامد بیومکانیکی و عملکردی اندازه‌گیری‌شده در ورزشکاران مرد مبتلا به بی‌ثباتی مزمن مچ پا همراه بود. این یافته‌ها نشان‌دهنده بهبود کوتاه‌مدت در اوج دورسی‌فلکشن مچ پا، اوج گشتاور عضلات اورتور، امتیاز ترکیبی Y-Balance و امتیاز کل FMS پس از اجرای برنامه توان‌بخشی است.

* **نویسنده مسئول:**

سندس فاروق حونی

Sunfaroq@uowasit.edu.iq

This is an open access article distributed under the terms of the Creative Commons Attribution 4.0 International License (CC BY 4.0), which permits unrestricted use, distribution, adaptation, and reproduction in any medium or format, provided the original author(s) and the source are credited.

© 2027 The Author(s). Journal of Sport Biomechanics published by Islamic Azad University, Hamedan Branch.

مقدمه

آسیب‌های زانو و مچ پا از شایع‌ترین آسیب‌ها در ورزش هستند؛ بااین‌حال، پیچ‌خوردگی جانبی مچ پا (LAS) از شایع‌ترین آسیب‌های اندام تحتانی به شمار می‌رود و سهم قابل‌توجهی در از دست رفتن جلسات تمرینی و مسابقات دارد. بر اساس مطالعات پیشین، تقریباً ۴۰ درصد از افرادی که دچار پیچ‌خوردگی حاد جانبی مچ پا می‌شوند، ممکن است در نهایت به بی‌ثباتی مزمن مچ پا (CAI) مبتلا شوند؛ وضعیتی که با مجموعه‌ای از علائم از جمله احساس خالی‌کردن مفصل، پیچ‌خوردگی‌های مکرر و کاهش اطمینان عملکردی همراه است (۱، ۲). تأثیرات این عارضه تنها به درد محدود نمی‌شود؛ بی‌ثباتی مزمن مچ پا می‌تواند موجب تغییراتی در سیستم‌های عصبی‌عضلانی و ساختاری بدن شود و بازگشت ورزشکاران به سطح عملکرد قبلی خود را بسیار دشوار سازد (۳). بی‌ثباتی مزمن مچ پا ناشی از نقص در سازوکارهای تثبیت‌کننده ایستا و پویا است. پژوهش‌های انجام‌شده در این زمینه تأیید می‌کنند که ورزشکاران مبتلا به CAI دارای نقص‌های بیومکانیکی مشخصی هستند؛ از جمله تغییرات غیرطبیعی کینماتیکی در مفاصل اندام تحتانی حتی هنگام حرکات ساده‌ای مانند راه‌رفتن و همچنین افزایش اینورژن مچ پا طی فعالیت‌های پرفشار مانند فرود که ممکن است به آسیب مجدد مفصل منجر شود (۴، ۵). عدم تعادل عضلانی، به‌ویژه در عضلات تثبیت‌کننده مچ پا مانند اورتورها و دورسی‌فلکسورها، یکی از نارسایی‌های مهم محسوب می‌شود. این عدم تعادل عضلانی را می‌توان با استفاده از دینامومتری ایزوکینتیک اندازه‌گیری کرد که به‌عنوان استاندارد طلایی برای ارزیابی عدم تعادل قدرت عضلانی در نظر گرفته می‌شود (۶). علاوه بر این، نقص در عملکرد حسی‌حرکتی موجب کاهش قابل‌توجه تعادل پویا می‌شود که می‌توان آن را با استفاده از آزمون تعادل Y (YBT) اندازه‌گیری کرد و همچنین با اختلال در توانایی حرکتی عملکردی همراه است. ضعف در توانایی حرکتی عملکردی، خطر بروز آسیب ثانویه در سایر مفاصل مانند زانو و ران را افزایش می‌دهد (۷، ۸).

مرورهای کنونی نشان می‌دهند که رویکردهای منفرد، مانند تمرینات تعادلی، در بهبود کنترل پاسچرال افراد مبتلا به CAI مؤثر هستند (۹). بااین‌حال، مسئله پژوهشی در این است که بیشتر برنامه‌های متداول تنها بر یک مؤلفه تمرکز می‌کنند و رویکرد جامعی را که تغییرات دقیق در بیومکانیک مفاصل را با بهبود عملکرد کلی بدن ترکیب کند، نادیده می‌گیرند. این موضوع با کمبود کارآزمایی‌های تصادفی کنترل‌شده (RCTs) که از یک برنامه توان‌بخشی پیش‌رونده و جامع شامل تحرک‌پذیری، حس عمقی عمیق، قدرت و کنترل عصبی‌عضلانی استفاده کرده و هم‌زمان پیامدها را با استفاده از طیفی از ابزارها، از تحلیل حرکتی ساده دوبعدی مانند Kinovea تا ابزارهای جامع ارزیابی عملکردی مانند FMS، ارزیابی کرده باشند، آشکار می‌شود. بنابراین، این پرسش علمی همچنان مطرح است که آیا چنین رویکردی واقعاً می‌تواند تفاوت‌هایی در عملکرد بیومکانیکی و عملکردی ایجاد کند یا خیر (۱۰، ۱۱). بر این اساس، مطالعه حاضر بررسی می‌کند که آیا یک برنامه توان‌بخشی مبتنی بر تمرین به مدت ۸ هفته و سه جلسه در هفته می‌تواند عملکرد بیومکانیکی و عملکردی ورزشکاران مبتلا به CAI را بهبود بخشد. پیامدهای بیومکانیکی شامل کینماتیک مفصل مچ پا و قدرت عضلانی ایزوکینتیک است، درحالی‌که عملکرد با استفاده از YBT و FMS ارزیابی می‌شود. اثرات مداخله با مقایسه تغییرات در گروه تجربی (EG)، که در برنامه توان‌بخشی شرکت کرد، با تغییرات مشاهده‌شده در گروه کنترل (CG)، که فعالیت‌های معمول خود را ادامه داد، تعیین می‌شود.

فرض بر این بود که گروه تجربی در اندازه‌گیری‌های پس‌آزمون در مقایسه با پیش‌آزمون و همچنین در مقایسه با گروه کنترل، در تمامی متغیرهای مطالعه بهبودهای آماری معنی‌داری نشان دهد. انتظار می‌رفت این بهبودها شامل تغییر در زوایای کینماتیکی مچ

پا، افزایش گشتاور عضلانی ایزوکینتیک، افزایش امتیازات YBT و بهبود امتیاز کل FMS باشد و بدین‌ترتیب اثربخشی برنامه جامع توان‌بخشی در بازیابی ثبات بیومکانیکی و عملکردی تأیید شود.

نوآوری علمی این پژوهش در استفاده از یک رویکرد ارزیابی چندبعدی است که تغییرات میکرومکانیکی در سطح مفصل، ارزیابی‌شده با استفاده از Kinovea و دینامومتری، را به تغییرات حرکتی کلان در سطح کل بدن، ارزیابی‌شده با استفاده ازFMS ، مرتبط می‌سازد. اگرچه بیانیه‌های اجماع اخیر ارزیابی جامع ورزشکاران را برای درک بهتر سازوکارهای آسیب توصیه کرده‌اند، مطالعات بسیار کمی از یک پروتکل مشخص توان‌بخشی استفاده کرده و سپس اثرات آن را در این چهار بُعد ارزیابی کرده‌اند (۱۲، ۱۳). استفاده از FMS به‌عنوان روشی برای ارزیابی کیفیت حرکت در سطوح کلی و موضعی در چارچوب بیومکانیکی، رویکرد جالبی برای بررسی چگونگی انتقال پیامدهای توان‌بخشی از محل آسیب به کل زنجیره کینماتیکی فراهم می‌کند. اهمیت این پژوهش در آن است که شواهد علمی درباره اثربخشی یک برنامه توان‌بخشی کاربردی ارائه می‌کند که اجرای آن در سالن‌های ورزشی عملی بوده و به تجهیزات ساده‌ای مانند کش‌های مقاومتی و وسایل تمرینی ایجادکننده ناپایداری نیاز دارد. مربیان و متخصصان توان‌بخشی ورزشی می‌توانند از این برنامه برای پرداختن به علل زمینه‌ای بی‌ثباتی مچ پا استفاده کنند. نتایج این پژوهش نه‌تنها به بهبود عملکرد ورزشی و پیشگیری از آسیب‌ها کمک خواهد کرد، بلکه معیارهایی را نیز فراهم می‌کند که می‌توانند استفاده از ابزارهای ارزیابی، از جمله Kinovea، FMS و YBT، را برای پایش روند پیشرفت تسهیل کنند.

روش‌ها

طرح مطالعه

این مطالعه با استفاده از طرح کارآزمایی تصادفی کنترل‌شده یک‌سوکور (RCT) به‌منظور ارزیابی تأثیر یک برنامه توان‌بخشی مبتنی بر تمرین بر عملکرد بیومکانیکی و عملکردی ورزشکاران مبتلا به بی‌ثباتی مزمن مچ پا انجام شد. این کارآزمایی از ۲ ژانویه ۲۰۲۶ تا ۲۷ فوریه ۲۰۲۶ انجام شد. این مطالعه پیش از آغاز فرایند جذب شرکت‌کنندگان، به‌صورت آینده‌نگر در سامانه ثبت کارآزمایی‌های بالینی ثبت نشده بود. تأییدیه اخلاقی از هیئت بازبینی مؤسسه‌ای دانشکده تربیت بدنی و علوم ورزشی دانشگاه واسط دریافت شد (کد تأیید: WAST-2026-01).

شرکت‌کنندگان

در مجموع، ۳۰ ورزشکار مرد که به‌طور فعال در ورزش‌های تیمی سالنی و میدانی، از جمله فوتبال، بسکتبال و والیبال، شرکت داشتند، در باشگاه‌های ورزشی محلی از نظر واجد شرایط بودن غربالگری شدند. شش ورزشکار به دلیل نداشتن معیارهای از پیش تعیین‌شده ورود به مطالعه کنار گذاشته شدند و در نهایت ۲۴ شرکت‌کننده واجد شرایط وارد مطالعه شدند. میانگین سن شرکت‌کنندگان ۲/۳ ± ۲۱/۵ سال، قد ۶/۲ ± ۱۷۸/۴ سانتی‌متر و جرم بدن ۸/۲ ± ۷۵/۸ کیلوگرم بود. همه شرکت‌کنندگان پیش از شرکت در مطالعه، رضایت‌نامه آگاهانه کتبی ارائه کردند. برای دستیابی به نمونه‌ای کنترل‌شده و همگن، همه شرکت‌کنندگان باید معیارهای CAI توصیه‌شده توسط کنسرسیوم بین‌المللی مچ پا را دارا می‌بودند: (الف) سابقه حداقل یک پیچ‌خوردگی حاد و قابل‌توجه جانبی مچ پا که حداقل ۱۲ ماه پیش از شرکت در مطالعه رخ داده باشد؛ (ب) سابقه «خالی‌کردن» مچ پا یا پیچ‌خوردگی مکرر مچ پا که به‌صورت حداقل دو رویداد طی ۶ ماه گذشته تعریف شد؛ (ج) احساس ذهنی بی‌ثباتی مچ پا؛ و (د) کسب امتیاز ≥۲۴ در ابزار بی‌ثباتی مچ پای کامبرلند (CAIT). شرکت‌کنندگان باید حداقل ۱۵۰ دقیقه در هفته فعالیت بدنی می‌داشتند. معیارهای خروج شامل سابقه شکستگی

اندام تحتانی یا اعمال جراحی، آسیب مچ پا طی ۳ ماه گذشته و اختلالات دهلیزی یا بینایی بود که می‌توانستند بر عملکرد تعادلی تأثیر بگذارند. پس از غربالگری معیارهای ورود و ارزیابی پایه، ۲۴ شرکت‌کننده واجد شرایط با استفاده از توالی تصادفی‌سازی تولیدشده توسط رایانه، به‌صورت تصادفی در گروه تجربی (EG؛ ۱۲ نفر) یا گروه کنترل (CG؛ ۱۲ نفر) قرار گرفتند. پنهان‌سازی تخصیص با استفاده از پاکت‌های مات، مهروموم‌شده و دارای شماره متوالی انجام شد. همه شرکت‌کنندگان دارای CAI یک‌طرفه بودند. اندام درگیر به‌عنوان مچ پای علامت‌داری تعریف شد که شرکت‌کننده آن را به‌عنوان مچ پای بی‌ثبات معرفی کرده بود و معیارهای از پیش تعیین‌شده CAI را نیز داشت. در تمامی ارزیابی‌های بیومکانیکی، قدرت، تعادل و عملکرد در پیش‌آزمون و پس‌آزمون، به‌طور ثابت از همان اندام درگیر استفاده شد. افراد مبتلا به CAI دوطرفه وارد مطالعه نشدند. حجم نمونه موردنیاز پیش از اجرای مطالعه با استفاده از نرم‌افزار G*Power (نسخه ۳,۱,۹,۷، آلمان) تعیین شد. محاسبه بر اساس تحلیل واریانس با اندازه‌گیری‌های مکرر و تعامل درون‌گروهی–بین‌گروهی، با فرض اندازه اثر متوسط (f = ۰/۲۵) مطابق با پژوهش‌های پیشین (۱۴)، سطح آلفای ۰/۰۵ و توان آماری ۸۰ درصد انجام شد. این تحلیل نشان داد که حداقل ۲۲ شرکت‌کننده موردنیاز است. برای در نظر گرفتن احتمال ریزش نمونه طی دوره مداخله، ۲۴ شرکت‌کننده وارد مطالعه شدند. پس از ارزیابی پایه، شرکت‌کنندگان با استفاده از توالی تصادفی‌سازی تولیدشده توسط رایانه، به‌صورت تصادفی به گروه تجربی (۱۲ نفر) یا گروه کنترل (۱۲ نفر) اختصاص یافتند. تخصیص گروه‌ها با استفاده از پاکت‌های مات، مهروموم‌شده و از پیش آماده‌شده با شماره‌های متوالی پنهان شد. ارزیابان مسئول اندازه‌گیری‌های بیومکانیکی و عملکردی نسبت به تخصیص گروهی شرکت‌کنندگان کور بودند؛ بااین‌حال، به دلیل ماهیت مداخله، کورسازی شرکت‌کنندگان و درمانگر امکان‌پذیر نبود. ویژگی‌های پایه گروه‌های تجربی و کنترل به‌صورت توصیفی در جدول ۱ ارائه شده است. دو گروه در مقادیر پیش‌آزمون پیامدهای بیومکانیکی و عملکردی قابل مقایسه بودند. مطابق با توصیه‌های مربوط به گزارش کارآزمایی‌های تصادفی کنترل‌شده، مقادیر پایه تحت آزمون معنی‌داری آماری قرار نگرفتند. سپس مقادیر متناظر پیش‌آزمون به‌عنوان متغیرهای هم‌پراش وارد مدل‌های ANCOVA شدند تا مقایسه‌های پس‌آزمون بر اساس مقادیر پایه تعدیل شوند.

جدول ۱. ویژگی‌های توصیفی پایه گروه‌های تجربی و کنترل (میانگین ± انحراف معیار)

متغیر	گروه تجربی (EG)	گروه کنترل (CG)
اوج زاویه دورسی‌فلکشن مچ پا (درجه)	۱۸/۴ ± ۴/۱	۱۸/۹ ± ۳/۸
اوج گشتاور اورتورها در ۶۰ درجه بر ثانیه (نیوتن‌متر)	۱۸/۱ ± ۳/۹	۱۷/۸ ± ۴/۲
امتیاز ترکیبی Y-Balance (درصد)	۸۳/۹ ± ۵/۲	۸۴/۵ ± ۴/۸
FMS (امتیاز)	۱۳/۴ ± ۱/۷	۱۳/۸ ± ۱/۸

اندازه‌گیری و روش‌های آزمون

تمامی آزمون‌های انجام‌شده پیش و پس از مداخله هشت‌هفته‌ای در محیط آزمایشگاه اجرا شدند و بین آزمون‌های مختلف استراحت کافی در نظر گرفته شد تا هرگونه تأثیر احتمالی خستگی بر نتایج به حداقل برسد. پیش از انجام آزمون‌ها، همه شرکت‌کنندگان یک گرم‌کردن ۵ دقیقه‌ای روی دوچرخه کارسنج ثابت انجام دادند.

کینماتیک مفصل مچ پا

کینماتیک مچ پا در صفحه ساژیتال طی یک پرش فرودی رو به جلو تک‌پا از جعبه‌ای استاندارد با ارتفاع ۳۰ سانتی‌متر ارزیابی شد. شرکت‌کنندگان با استفاده از اندام غیر درگیر از جعبه پایین آمدند، روی اندام درگیر فرود آمدند و بلافاصله یک پرش عمودی حداکثری انجام دادند.

اندام درگیر از پیش به‌عنوان اندام علامت‌دار و بی‌ثباتی تعریف شد که معیارهای از پیش تعیین‌شده CAI یک‌طرفه را داشت و در تمامی اندازه‌گیری‌های پیش‌آزمون و پس‌آزمون همان اندام مورد ارزیابی قرار گرفت. یک دوربین فیلم‌برداری دیجیتال (Sony FDR-AX43، ژاپن) با نرخ تصویربرداری ۶۰ فریم بر ثانیه، روی سه‌پایه‌ای استاندارد و عمود بر صفحه ساژیتال اندام مورد آزمون قرار گرفت؛ به‌گونه‌ای که محور اپتیکی آن تقریباً هم‌سطح مفصل مچ پا بود. دوربین در فاصله استاندارد ۳ متری از شرکت‌کننده قرار گرفت و ارتفاع و جهت آن برای تمامی شرکت‌کنندگان و جلسات آزمون ثابت نگه داشته شد. پیش از جمع‌آوری داده‌ها، فضای تصویربرداری با استفاده از یک میله کالیبراسیون صلب یک‌متری که در صفحه حرکت قرار داده شده بود، کالیبره شد. نشانگرهای بازتابنده روی نقاط مرجع آناتومیکی از پیش تعیین‌شده شامل اپی‌کندیل خارجی فمور، قوزک خارجی، برجستگی پاشنه و سر متاتارس پنجم قرار گرفتند. از این نشانگرها برای تعیین سگمنت‌های ساق و پا و محاسبه زاویه مفصل مچ پا در صفحه ساژیتال استفاده شد. زاویه مچ پا به‌صورت زاویه تشکیل‌شده بین محورهای طولی ساق و پا محاسبه شد؛ به‌طوری‌که مقادیر بزرگ‌تر نشان‌دهنده میزان بیشتر دورسی‌فلکشن مچ پا بودند. معیارهای یکسانی برای محل قرارگیری نشانگرهای آناتومیکی و تنظیمات دوربین در تمامی شرکت‌کنندگان و جلسات ارزیابی به‌طور ثابت اعمال شد. مرحله فرود از نخستین لحظه تماس پا با زمین آغاز و در نقطه حداکثر جابه‌جایی عمودی مرکز جرم طی توالی فرود، بلافاصله پیش از پرش عمودی حداکثری بعدی، پایان‌یافته در نظر گرفته شد. اوج دورسی‌فلکشن مچ پا به‌صورت بیشترین زاویه دورسی‌فلکشن در صفحه ساژیتال ثبت‌شده در این بازه تعریف عملیاتی شد. تحلیل فریم‌به‌فریم ویدئو برای شناسایی فریمی که با این مقدار حداکثری مطابقت داشت انجام شد و مقدار حاصل به‌عنوان اوج زاویه دورسی‌فلکشن ثبت شد. فیلم‌های ضبط‌شده به‌صورت فریم‌به‌فریم با استفاده از نرم‌افزار Kinovea (نسخه ۰,۹,۳) تحلیل شدند. به‌منظور حفظ مختصات مکانی خام کینماتیکی، هیچ فیلتر هموارسازی دیجیتال اضافی اعمال نشد و نقاط آناتومیکی به‌صورت دستی توسط ارزیاب دیجیتایز شدند. برای هر شرکت‌کننده سه کوشش موفق ثبت شد و بین کوشش‌ها استراحت کافی در نظر گرفته شد. میانگین اوج زاویه دورسی‌فلکشن در سه کوشش برای تحلیل آماری مورد استفاده قرار گرفت. کوشش زمانی موفق در نظر گرفته شد که شرکت‌کننده توالی تعیین‌شده پرش–فرود را تکمیل کرده و بدون از دست دادن آشکار تعادل یا تماس اضافی پا، تماس خود را با محدوده مشخص آزمون حفظ کرده باشد. ارزیابی که دیجیتایزکردن ویدئوها را انجام داد، نسبت به تخصیص گروهی شرکت‌کنندگان کور بود. برای ارزیابی پایایی درون‌ارزیاب، ارزیاب یک زیرمجموعه تصادفی شامل ۲۰ درصد از فیلم‌های ضبط‌شده (۸ نفر) را یک هفته پس از تحلیل اولیه مجدداً دیجیتایز کرد. ضرایب همبستگی درون‌طبقه‌ای (ICC) محاسبه شدند و پایایی درون‌ارزیاب عالی برای اوج زاویه دورسی‌فلکشن مچ پا به دست آمد (ICC = ۰/۹۴، فاصله اطمینان ۰/۹۸–۰/۸۵ :۹۵ درصد). از آنجا که تمرینات پرش–فرود در مرحله نهایی برنامه توان‌بخشی گنجانده شده بودند و همان تکلیف متعاقباً برای ارزیابی پیامد بیومکانیکی نیز مورد استفاده قرار گرفت، نمی‌توان اثر تمرین اختصاصی تکلیف یا آشنایی با آن را به‌طور کامل رد کرد. بنابراین، ممکن است بهبود در بیومکانیک مچ پا و افزایش آشنایی با تکلیف پرش–فرود تا حدودی در افزایش مشاهده‌شده اوج دورسی‌فلکشن مچ پا نقش داشته باشند.

قدرت عضلانی ایزوکینتیک

قدرت عضلانی ایزوکینتیک مچ پا با استفاده از دینامومتر Biodex System 4 Pro (Biodex Medical Systems, Inc.، Shirley، NY، USA) ارزیابی شد. شرکت‌کنندگان به‌گونه‌ای روی صندلی دینامومتر قرار گرفتند که مفصل ران تقریباً در ۸۰ درجه فلکشن و زانوی اندام مورد آزمون در اکستنشن کامل (۰ درجه) قرار داشت. تنه، لگن و قسمت دیستال ران با استفاده از تسمه‌های

استاندارد ثابت شدند تا حرکات جبرانی به حداقل برسند. اتصال دینامومتر در راستای محور آناتومیکی اینورژن–اورژن مچ پا تنظیم شد و پا مطابق با دستورالعمل‌های وضعیت‌دهی شرکت سازنده به‌طور ایمن روی صفحه مخصوص پا ثابت شد. پیش از هر آزمون، هم‌راستایی بررسی شد تا وضعیت مفصل مچ پا و محور دینامومتر به‌صورت ثابت حفظ شود. پیش از آزمون، دینامومتر مطابق با روش‌های استاندارد شرکت سازنده کالیبره شد و اصلاح اثر جاذبه در حالی انجام شد که اندام مورد آزمون در دستگاه قرار داشت. شرکت‌کنندگان برای به حداقل رساندن اثر یادگیری، یک فرایند آشنایی استاندارد شامل سه کوشش تمرینی زیر بیشینه انجام دادند. آزمون شامل پنج حرکت بیشینه کانسنتریک اینورژن و اورژن با سرعت زاویه‌ای ۶۰ درجه بر ثانیه و ۶۰ ثانیه استراحت بین نوبت‌های آزمون بود. در طول هر کوشش بیشینه، تشویق کلامی ارائه شد. اوج گشتاور بر حسب نیوتن‌متر ثبت شد. اندام درگیر مطابق با تعریف از پیش تعیین‌شده اندام علامت‌دار و بی‌ثبات، به‌طور ثابت مورد آزمون قرار گرفت. از آنجا که همه شرکت‌کنندگان دارای CAI یک‌طرفه بودند، در ارزیابی‌های پیش‌آزمون و پس‌آزمون از همان اندام درگیر استفاده شد. روش قبلاً ذکرشده مبنی بر آزمون اندامی که تحت جراحی قرار نگرفته بود حذف شد، زیرا شرکت‌کنندگان دارای سابقه جراحی اندام تحتانی از مطالعه کنار گذاشته شده بودند. در طول آزمون ایزوکینتیک، هر دو حرکت اینورژن و اورژن ارزیابی شدند؛ بااین‌حال، اوج گشتاور اورتورها در سرعت ۶۰ درجه بر ثانیه پیامد ایزوکینتیک از پیش تعیین‌شده‌ای بود که در تحلیل آماری وارد شد، زیرا برنامه توان‌بخشی و ارزیابی پیامد اصلی بر قدرت اورتورهای مچ پا به‌عنوان شاخصی از ثبات پویای جانبی مچ پا تمرکز داشتند. قدرت اینورتورها در تحلیل آماری وارد نشد و به‌عنوان پیامد مطالعه گزارش نشد.

تعادل پویا

ثبات پویای پاسچر با استفاده از کیت آزمون تعادل Y (Move2Perform، USA) و مطابق با روش‌های استاندارد ارزیابی شد (۱۵، ۱۶). شرکت‌کنندگان با پای برهنه روی اندام درگیر در مرکز سکوی آزمون ایستادند و دست‌های خود را روی لگن قرار دادند. پیش از آزمون، طول اندام تحتانی در وضعیت طاق‌باز از خار خاصره‌ای قدامی فوقانی تا دیستال‌ترین نقطه قوزک داخلی اندازه‌گیری شد. از شرکت‌کنندگان خواسته شد با اندام مقابل تا حد امکان در سه جهت قدامی (ANT)، خلفی‌جانبی (PL) و خلفی‌داخلی (PM) دسترسی داشته باشند. فاصله‌های دستیابی بر حسب سانتی‌متر ثبت شدند. اگر شرکت‌کننده تعادل خود را از دست می‌داد، وزن خود را به اندام در حال دستیابی منتقل می‌کرد یا پای اتکا را از روی سکو بلند می‌کرد، کوشش نامعتبر در نظر گرفته می‌شد. شرکت‌کنندگان پیش از ارزیابی رسمی، سه کوشش آشنایی در هر جهت انجام دادند و پس از آن سه کوشش ثبت‌شده در هر جهت اجرا کردند. امتیاز ترکیبی دستیابی از مجموع حداکثر فاصله دستیابی در سه جهت، نرمال‌شده نسبت به طول اندام، محاسبه و به‌صورت درصد بیان شد. از آنجا که تمرینات Y-Balance در برنامه توان‌بخشی گنجانده شده بودند و متعاقباً آزمون Y-Balance به‌عنوان یک معیار پیامد مورد استفاده قرار گرفت، احتمال اثر تمرین اختصاصی تکلیف را نمی‌توان رد کرد. بنابراین، بهبود امتیاز ترکیبی Y-Balance ممکن است علاوه بر تغییر در کنترل پویای پاسچر، تا حدودی منعکس‌کننده آشنایی با تکلیف ارزیابی نیز باشد.

حرکات عملکردی

الگوهای حرکتی بنیادی با اجرای آزمون‌های FMS و با استفاده از کیت استاندارد FMS اندازه‌گیری شدند (۱۷). هفت آزمون FMS به روش استاندارد توسط یک ارزیاب دارای گواهی FMS اجرا شدند. هر یک از هفت آزمون با استفاده از مقیاس مجزای ۰ تا ۳ امتیازدهی شد که در آن امتیاز صفر نشان‌دهنده وجود درد هنگام اجرای حرکت بود. امتیاز ترکیبی از مجموع ۲۱ امتیاز و همچنین

هرگونه عدم تقارن بین دو سمت بدن ثبت شد. با توجه به پاتولوژی این جمعیت خاص، تحلیل عمدتاً بر امتیازات حاصل از آزمون‌های اسکات عمیق، عبور از مانع و لانج در یک خط تمرکز داشت.

پروتکل مداخله

شرکت‌کنندگان اختصاص‌یافته به گروه تجربی، یک برنامه توان‌بخشی ساختاریافته و مبتنی بر تمرین را به مدت ۸ هفته و تحت نظارت اجرا کردند که شامل ۲۴ جلسه تمرینی (۳ جلسه در هفته) بود. تمام جلسات تحت نظارت متخصص توان‌بخشی ورزشی انجام شدند و هر جلسه تقریباً ۵۰ تا ۶۰ دقیقه طول کشید. این برنامه با استفاده از رویکرد دوره‌بندی پیش‌رونده طراحی شد تا اختلالات زمینه‌ای مرتبط با CAI را به‌صورت نظام‌مند هدف قرار دهد. برای اجرای تمرینات تجویزشده از تجهیزات تمرینی استاندارد، از جمله کش‌های مقاومتی، پدهای فومی، BOSU، نردبان چابکی و جعبه‌های استپ استفاده شد. شدت و پیشرفت تمرین در سراسر دوره مداخله پایش شد و هرگاه شرکت‌کنندگان افزایش درد بیش از ۲ از ۱۰ را در مقیاس دیداری درد گزارش می‌کردند، بار تمرینی یا سرعت اجرای تمرین کاهش می‌یافت. جزئیات دوره‌بندی خرد شامل تجویز تمرین، متغیرهای هدف، حجم، شدت، فواصل استراحت و معیارهای پیشرفت در جدول ۲ ارائه شده است. همه شرکت‌کنندگان گروه تجربی برنامه کامل ۲۴ جلسه‌ای توان‌بخشی را به پایان رساندند که معادل پایبندی ۱۰۰ درصدی به برنامه بود. هیچ‌یک از شرکت‌کنندگان مداخله را قطع نکرد و در طول دوره مداخله ۸ هفته‌ای هیچ رویداد نامطلوب یا عارضه مرتبط با تمرین ثبت نشد. تمرینات تجویزشده طبق برنامه اجرا شدند و هیچ تغییر عمده‌ای در پروتکل تمرینی لازم نبود. هرگونه تعدیل جزئی در شدت یا سرعت تمرین بر اساس تحمل فردی و پاسخ بالینی انجام شد، بدون آنکه اهداف تجویزشده تمرین یا ساختار پیشرفت برنامه تغییر کند. گروه کنترل طی همان دوره ۸ هفته‌ای تمرینات معمول اختصاصی رشته ورزشی و فعالیت‌های بدنی روزانه خود را ادامه داد و برنامه توان‌بخشی ساختاریافته مبتنی بر تمرین را دریافت نکرد. به شرکت‌کنندگان گروه کنترل دستور داده شد که طی دوره مداخله، هیچ برنامه توان‌بخشی اختصاصی اضافی برای مچ پا یا تمرینات حس عمقی را آغاز نکنند. فراوانی، مدت و محتوای فعالیت‌های تمرینی معمول آنان به‌صورت آزمایشی استاندارد یا کنترل نشد. در نتیجه، ممکن است تفاوت‌های فردی در میزان مواجهه با تمرین و فعالیت بدنی هم‌زمان بین شرکت‌کنندگان گروه کنترل وجود داشته باشد که به‌عنوان یک منبع بالقوه تغییرپذیری کنترل‌نشده در نظر گرفته شد.

تجزیه و تحلیل آماری

تحلیل‌های آماری با استفاده از نرم‌افزار SPSS (نسخه ۲۶، IBM Corp.، Armonk، NY، USA) انجام شدند. برای بررسی نرمال‌بودن داده‌ها از آزمون شاپیرو–ویلک و برای بررسی همگنی واریانس‌ها از آزمون لوین استفاده شد. برای هر متغیر وابسته، تحلیل کوواریانس یک‌راهه به‌منظور مقایسه پیامدهای پس‌آزمون بین گروه‌های تجربی و کنترل انجام شد و امتیاز متناظر پیش‌آزمون به‌عنوان متغیر هم‌پراش وارد مدل شد تا مقادیر پایه تعدیل شوند. میانگین‌های تعدیل‌شده پس‌آزمون و فاصله اطمینان ۹۵ درصد آنها برای هر دو گروه گزارش شدند. اندازه اثر به‌صورت مجذور اتای جزئی (η^2p) بیان شد و مقادیر ۰/۰۱، ۰/۰۶ و ۰/۱۴ به‌ترتیب به‌عنوان اندازه اثر کوچک، متوسط و بزرگ تفسیر شدند. سطح معنی‌داری آماری در $p< ۰/۰۵$ در نظر گرفته شد. اگرچه هر یک از آیتم‌های FMS در مقیاس ترتیبی ۰ تا ۳ امتیازدهی می‌شوند، در تحلیل حاضر از امتیاز کل FMS (دامنه: ۰ تا ۲۱) استفاده شد که حاصل مجموع امتیازات هفت الگوی حرکتی است. برای انجام آنکووا، امتیاز کل به‌عنوان یک متغیر پیوسته در نظر گرفته شد، زیرا یک سنجه ترکیبی از چندین حوزه حرکتی فراهم می‌کند و به‌عنوان یک سنجه خلاصه تقریباً پیوسته تحلیل شد. این رویکرد به‌طور یکسان برای امتیازات کل پیش‌آزمون و پس‌آزمون اعمال شد.

جدول ۲. برنامه پیش‌رونده هشت‌هفته‌ای توان‌بخشی مبتنی بر تمرین برای ورزشکاران مبتلا به بی‌ثباتی مزمن مچ پا

مرحله و هفته	هدف و پیامد اصلی	تمرینات تجویزشده	حجم تمرین	شدت و استراحت	معیارهای پیشرفت
مرحله پایه، هفته‌های ۱–۲	بازیابی دامنه حرکتی بدون درد؛ حس عمقی پایه؛ پیامد اصلی: اوج گشتاور ایزوکینتیک اورتورها	گرم‌کردن و تحرک‌پذیری: دوچرخه کارسنج، حرکات دورانی مچ پا، کشش ایستای عضلات ساق. تعادل: ایستادن دوپا روی پد فومی. قدرت: دورسی‌فلکشن، اورژن و اینورژن با کش Thera-Band (انقباضات کانسنتریک آهسته).	قدرت: ۳ × ۱۵–۳۰؛ تعادل: ۳ × ۳۰ ثانیه؛ عملکردی:—	شدت کم (RPE: ۱۱–۱۲)؛ استراحت: ۴۵ ثانیه بین ست‌ها؛ ۹۰ ثانیه بین تمرینات	توانایی انجام تمام تمرینات بدون درد یا بی‌ثباتی مفصل
مرحله انتقال، هفته‌های ۳–۴	آغاز کنترل تک‌پا (SL)؛ بهبود کیفیت حرکت؛ پیامد اصلی: FMS	گرم‌کردن و تحرک‌پذیری: کشش پویای عضلات ساق، حرکات ABC مچ پا. تعادل: ایستادن تک‌پا روی سطح ثابت/فومی، راه‌رفتن تاندم. قدرت: بلندشدن تک‌پا روی پنجه، اورژن/پلانتارفلکشن با Thera-Band. عملکردی: مینی‌اسکات تک‌پا، لانج رو به جلو.	قدرت: ۳ × ۱۰–۱۲؛ تعادل: ۳ × ۲۰–۳۰ ثانیه؛ عملکردی: ۳ × ۸–۱۰ تکرار	شدت کم تا متوسط (RPE: ۱۳–۱۴)؛ استراحت: ۴۵–۶۰ ثانیه بین ست‌ها؛ ۹۰ ثانیه بین تمرینات	توانایی حفظ تعادل تک‌پا روی فوم به مدت بیش از ۲۰ ثانیه بدون لرزش پاسچرال بیش از حد
مرحله کنترل پویا، هفته‌های ۵–۶	کنترل عضلانی اکسنتریک؛ ثبات پویای پاسچر؛ پیامد اصلی: امتیاز ترکیبی Y-Balance	گرم‌کردن و تحرک‌پذیری :موبیلیزیشن پویای مفاصل. تعادل: تعادل تک‌پا روی BOSU (سمت ثابت)، تمرین Y-Balance در جهت قدامی. قدرت: بلندشدن تک‌پا روی پنجه (با تأکید بر فاز اکسنتریک)، اورژن سریع کانسنتریک/اکسنتریک با Thera-Band. عملکردی: پرش تک‌پا رو به جلو همراه با تثبیت، عبور جانبی از مانع.	قدرت: ۳ × ۸–۱۰؛ تعادل: ۳ × ۳۰ ثانیه؛ عملکردی: ۳ × ۵–۸ تکرار	شدت متوسط تا زیاد (RPE: ۱۴–۱۵)؛ استراحت: ۶۰ ثانیه بین ست‌ها؛ ۱۲۰ ثانیه بین تمرینات (به دلیل نیاز عصبی بیشتر)	فرود کنترل‌شده هنگام انجام تکالیف پرشی، بدون والگوس یا فروریزش مچ پا به سمت اینورژن
مرحله اختصاصی ورزش، هفته‌های ۷–۸	آماده‌سازی پلایومتریک؛ چابکی چندصفحه‌ای؛ پیامدهای اصلی: کینماتیک پرش–فرود و FMS	گرم‌کردن و تحرک‌پذیری:High-knee skips ، حرکات پویای CARs. تعادل: تعادل تک‌پا روی BOSU (سمت گنبدی)، Y-Balanceدر جهات PM/PL. قدرت: بلندشدن پلایومتریک تک‌پا روی پنجه، Monster Walk با مقاومت. عملکردی: پرش–فرود از جعبه ۳۰ سانتی‌متری، مانورهای تغییر جهت ۹۰/۴۵ درجه، تمرینات چابکی واکنشی.	قدرت: ۳ × ۵–۸؛ تعادل: ۳ × ۳۰ ثانیه؛ عملکردی: ۳ × ۵ تکرار	شدت زیاد (واکنشی) (RPE: ۱۵–۱۶)؛ استراحت: ۹۰ ثانیه بین ست‌ها؛ ۱۲۰ ثانیه بین تمرینات (برای بازیابی کامل سیستم عصبی مرکزی)	اجرای موفق پرش–فرود بدون والگوس پویای زانو یا اینورژن بیش از حد مچ پا، که نشان‌دهنده آمادگی برای بازگشت به ورزش است

نکته: ANT ، قدامی؛ CNS ، سیستم عصبی مرکزی؛ CON ، انقباض کانسنتریک؛ ECC ، انقباض اکسنتریک؛ PL ، خلفی‌جانبی؛ PM ، خلفی‌داخلی؛ ROM ، دامنه حرکتی؛ RPE ، میزان درک فشار تمرین (مقیاس بورگ ۶–۲۰)؛ SL ، تک‌پا. هر جلسه توان‌بخشی ۵۰–۶۰ دقیقه، سه بار در هفته به مدت هشت هفته و تحت نظارت متخصص اجرا شد. گروه کنترل فعالیت‌های معمول خود را ادامه داد و هیچ برنامه توان‌بخشی اختصاصی مچ پا یا تمرین حس عمقی دریافت نکرد. فعالیت‌های معمول گروه کنترل استاندارد یا کنترل نشد. شدت و پیشرفت تمرینات گروه تجربی نیز بر اساس تحمل، پاسخ بالینی و عملکرد هر شرکت‌کننده تنظیم شد.

یافته‌ها

تحلیل‌های مقدماتی تأیید کردند که پیش‌فرض‌های لازم برای انجام تحلیل‌های پارامتریک برنامه‌ریزی‌شده برقرار بودند. به‌طور مشخص، آزمون شاپیرو–ویلک نشان داد که داده‌ها دارای توزیع نرمال بودند، درحالی‌که آزمون لوین همگنی واریانس را در متغیرهای وابسته تأیید کرد. بر این اساس، برای هر متغیر وابسته یک تحلیل کوواریانس یک‌راهه به‌منظور مقایسه پیامدهای پس‌آزمون بین گروه تجربی (EG) و گروه کنترل (CG)، با تعدیل امتیازات متناظر پیش‌آزمون، انجام شد. هر ۲۴ ورزشکار تصادفی‌سازی‌شده دوره مداخله ۸ هفته‌ای را تکمیل کردند و در تحلیل بر اساس پروتکل وارد شدند. آمار توصیفی (میانگین ± انحراف معیار)، میانگین‌های تعدیل‌شده پس‌آزمون، فاصله‌های اطمینان ۹۵ درصد (CI) و نتایج ANCOVA برای تمامی متغیرهای بیومکانیکی و عملکردی در جدول ۳ ارائه شده‌اند. نتایج مربوط به هر پیامد به‌صورت جداگانه در ادامه شرح داده شده‌اند.

جدول ۳. نتایج تحلیل کوواریانس برای پیامدهای پس‌آزمون تعدیل‌شده بر اساس امتیازات پیش‌آزمون

متغیر	گروه	پیش‌آزمون (میانگین ± انحراف معیار)	پس‌آزمون (میانگین ± انحراف معیار)	میانگین تعدیل‌شده پس‌آزمون	فاصله اطمینان ۹۵٪	F	p	مجذور اتا
اوج زاویه دورسی‌فلکشن مچ پا (درجه)	EG	۱۸/۴ ± ۴/۱	۲۴/۵ ± ۳/۲	۲۴/۶۲	۲۳/۲۱–۲۶/۰۳	۴۸/۲۵	< ۰/۰۰۱	۰/۵۶۴
	CG	۱۸/۹ ± ۳/۸	۱۹/۲ ± ۳/۹	۱۹/۰۸	۱۷/۶۷–۲۰/۴۹			
اوج گشتاور اورتورها در ۶۰ درجه بر ثانیه (نیوتن‌متر)	EG	۱۸/۱ ± ۳/۹	۲۳/۴ ± ۳/۲	۲۳/۵۵	۲۲/۱۸–۲۴/۹۲	۴۵/۱۰	< ۰/۰۰۱	۰/۵۴۲
	CG	۱۷/۸ ± ۴/۲	۱۸/۲ ± ۴/۰	۱۸/۰۵	۱۶/۶۸–۱۹/۴۲			
امتیاز ترکیبی Y-Balance (درصد)	EG	۸۳/۹ ± ۵/۲	۹۲/۱ ± ۴/۵	۹۲/۳۲	۹۰/۴۱–۹۴/۲۳	۴۱/۶۰	< ۰/۰۰۱	۰/۵۲۳
	CG	۸۴/۵ ± ۴/۸	۸۵/۲ ± ۴/۹	۸۴/۹۸	۸۳/۰۷–۸۶/۸۹			
FMS (امتیاز)	EG	۱۳/۴ ± ۱/۷	۱۶/۲ ± ۱/۴	۱۶/۲۸	۱۵/۵۴–۱۷/۰۲	۳۸/۷۵	< ۰/۰۰۱	۰/۵۰۵
	CG	۱۳/۸ ± ۱/۵	۱۴/۱ ± ۱/۶	۱۴/۰۲	۱۳/۲۸–۱۴/۷۶			

نکته: EG، گروه تجربی؛ CG، گروه کنترل؛ CI، فاصله اطمینان؛ FMS، غربالگری حرکات عملکردی؛ مجذور اتای جزئی، Partial η^2. مقادیر F نشان‌دهنده اثر بین‌گروهی حاصل از ANCOVA هستند که در آن امتیاز متناظر پیش‌آزمون به‌عنوان متغیر هم‌پراش وارد مدل شده است. میانگین‌های تعدیل‌شده پس‌آزمون، میانگین‌های حاشیه‌ای برآوردشده هستند.

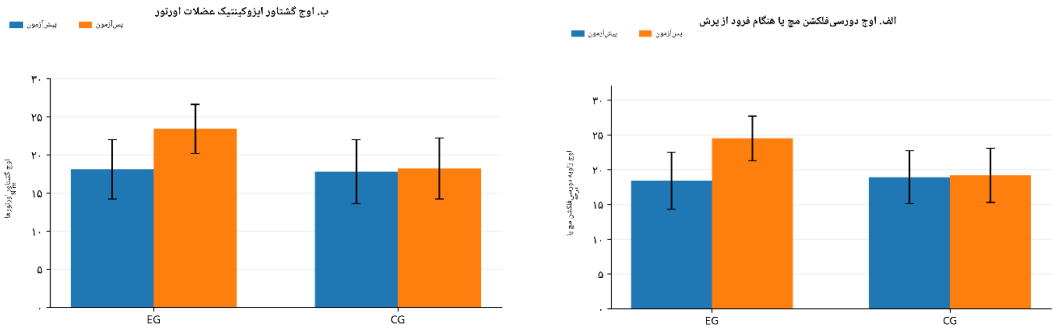
عملکرد بیومکانیکی

پس از تعدیل بر اساس اندازه‌گیری‌های متناظر پایه، ANCOVA اثر بین‌گروهی معنی‌داری را بر اوج دورسی‌فلکشن مچ پا طی تکلیف فرود از پرش نشان داد (η^2p = ۰/۵۶۴، p = ۰/۰۰۱، F = ۴۸/۲۵). میانگین حاشیه‌ای برآوردشده زاویه دورسی‌فلکشن در پس‌آزمون در گروه تجربی ۲۴/۶۲ درجه (فاصله اطمینان ۹۵ درصد: ۲۳/۲۱–۲۶/۰۳) و در گروه کنترل ۱۹/۰۸ درجه (فاصله اطمینان ۹۵ درصد: ۱۷/۶۷–۲۰/۴۹) بود. پس از کنترل مقادیر پایه، اثر گروهی معنی‌داری برای اوج گشتاور ایزوکینتیک اورتورها در سرعت ۶۰ درجه بر ثانیه نیز مشاهده شد (η^2p = ۰/۵۴۲، p = ۰/۰۰۱، F = ۴۵/۱۰). مقادیر تعدیل‌شده گشتاور در پس‌آزمون برای گروه تجربی ۲۳٫۵۵ نیوتن‌متر (فاصله اطمینان ۹۵ درصد: ۲۲/۱۸–۲۴/۹۲) و برای گروه کنترل ۱۸/۰۵ نیوتن‌متر (فاصله اطمینان ۹۵ درصد: ۱۶/۶۸–۱۹/۴۲) بود. همان‌گونه که در جدول ۳ گزارش شده است، گروه تجربی در هر دو شاخص بیومکانیکی، مقادیر تعدیل‌شده پس از مداخله بیشتری نسبت به گروه کنترل نشان داد.

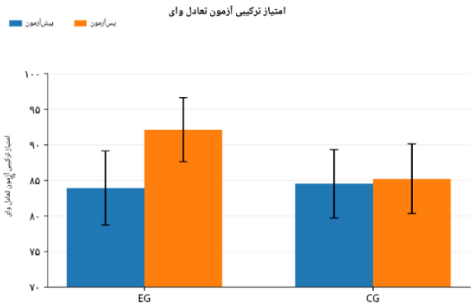
عملکرد عملکردی

پس از کنترل مقادیر پایه متناظر، ANCOVA تفاوت آماری معنی‌داری را بین گروه تجربی و گروه کنترل در امتیاز ترکیبی Y-Balance پس‌آزمون نشان داد (η^2p = ۰/۵۲۳، p = ۰/۰۰۱، F = ۴۱/۶۰). میانگین حاشیه‌ای برآوردشده در گروه تجربی ۹۲/۳۲ درصد (فاصله اطمینان ۹۵ درصد: ۹۰/۴۱–۹۴/۲۳) و در گروه کنترل ۸۴/۹۸ درصد (فاصله اطمینان ۹۵ درصد: ۸۳/۰۷–۸۶/۸۹) بود. پس از تعدیل بر اساس عملکرد پایه، اثر بین‌گروهی معنی‌داری برای امتیاز کل FMS در پس‌آزمون نیز مشاهده شد (η^2p = ۰/۵۰۵، p = ۰/۰۰۱، F = ۳۸/۷۵). میانگین‌های تعدیل‌شده متناظر برای گروه تجربی ۱۶/۲۸ امتیاز (فاصله اطمینان ۹۵ درصد: ۱۵/۵۴–۱۷/۰۲) و برای گروه کنترل ۱۴/۰۲ امتیاز (فاصله اطمینان ۹۵ درصد: ۱۳/۲۸–۱۴/۷۶) بود. در مجموع، همان‌گونه که در جدول ۳ نشان داده شده است، مقادیر تعدیل‌شده پس‌آزمون در گروه تجربی برای هر دو شاخص کنترل پویای پاسچر و عملکرد حرکتی بیشتر

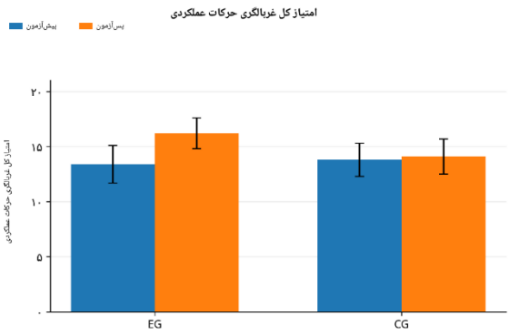
بود. نمایش‌های گرافیکی در شکل‌های ۱ تا ۳، تغییرات مشاهده‌شده در پیامدهای مطالعه را پیش و پس از برنامه توان‌بخشی مبتنی بر تمرین ۸ هفته‌ای نشان می‌دهند. شکل ۱ افزایش در هر دو شاخص اوج زاویه دورسی‌فلکشن مچ پا و اوج گشتاور اورتورها در سرعت ۶۰ درجه بر ثانیه را در گروه تجربی نشان می‌دهد، درحالی‌که در گروه کنترل تنها تغییرات اندکی مشاهده شد. شکل ۲ افزایش امتیاز ترکیبی Y-Balance را در گروه تجربی نشان می‌دهد، درحالی‌که در گروه کنترل تنها تغییر اندکی مشاهده شد. شکل ۳ افزایش امتیاز FMS را در گروه تجربی نشان می‌دهد، درحالی‌که گروه کنترل تنها تغییر اندکی نشان داد. ستون‌ها نشان‌دهنده مقادیر میانگین مشاهده‌شده و میله‌های خطا نشان‌دهنده ±۱ انحراف معیار هستند.



شکل ۱. پیامدهای بیومکانیکی در پیش‌آزمون و پس‌آزمون: (الف) اوج دورسی‌فلکشن مچ پا؛ (ب) اوج گشتاور ایزوکینتیک عضلات اورتور.



شکل ۲. امتیاز ترکیبی Y-Balance در پیش‌آزمون و پس‌آزمون گروه‌های تجربی و کنترل.



شکل ۳. امتیاز کل غربالگری حرکات عملکردی (FMS) در پیش‌آزمون و پس‌آزمون گروه‌های تجربی و کنترل.

بحث

مهم‌ترین یافته مطالعه حاضر این بود که برنامه توان‌بخشی مبتنی بر تمرین هشت‌هفته‌ای با بهبود معنی‌دار عملکرد بیومکانیکی و عملکردی در ورزشکاران مبتلا به بی‌ثباتی مزمن مچ پا (CAI) همراه بود. پس از تعدیل امتیازات متناظر پیش‌آزمون، تحلیل کوواریانس تفاوت‌های بین‌گروهی معنی‌داری را در هر چهار متغیر وابسته نشان داد؛ به‌طوری‌که گروه تجربی (EG) در مقایسه با گروه کنترل (CG) مقادیر تعدیل‌شده پس‌آزمون بالاتری داشت. به‌طور مشخص، گروه تجربی در مقایسه با گروه کنترل که فعالیت‌های تمرینی معمول خود را ادامه داده بود، اوج دورسی‌فلکشن مچ پای بیشتری هنگام فرود از پرش، اوج گشتاور ایزوکینتیک بیشتر در عضلات اورتور، کنترل پویای پاسچر بهتر و کیفیت حرکات عملکردی بهتری نشان داد. این یافته‌ها نشان می‌دهند که یک برنامه توان‌بخشی پیش‌رونده و چندبعدی، شامل توسعه تدریجی تحرک‌پذیری مفصل، قدرت عضلانی، حس عمقی و کنترل عصبی‌عضلانی اختصاصی ورزش، ممکن است در بهبود پیامدهای بیومکانیکی و عملکردی ورزشکاران مبتلا به CAI مؤثر باشد (۱۸).

از دیدگاه بیومکانیکی، بهبود اوج دورسی‌فلکشن مچ پا هنگام مانور فرود از نظر بالینی حائز اهمیت است. افراد مبتلا به CAI معمولاً محدودیت در دورسی‌فلکشن مچ پا نشان می‌دهند که ممکن است با محدودیت در آرتروکینماتیک مفصل، افزایش سفتی خلفی مفصل یا رفتارهای اجتنابی ناشی از ترس مرتبط باشد و به‌طور بالقوه به الگوهای حرکتی جبرانی مانند بلندشدن زودهنگام پاشنه یا حرکات بیش از حد در صفحه فرونتال منجر شود (۱۹). در مطالعه حاضر، این بهبود ممکن است ناشی از مراحل ابتدایی برنامه توان‌بخشی باشد که بر موبیلیزیشن مچ پا و انعطاف‌پذیری عضلات ساق تأکید داشت و پس از آن، تکالیف فرود از پرش به‌صورت پیش‌رونده وارد برنامه شدند. بارگذاری اختصاصی تکلیف ممکن است سازگاری حسی‌حرکتی و کنترل حرکتی پیش‌خور را بهبود بخشیده و به شرکت‌کنندگان امکان داده باشد نیروهای عکس‌العمل زمین را در دامنه حرکتی بیشتری در صفحه ساژیتال جذب کنند، به‌جای آنکه به راهبردهای جبرانی بالقوه نامطلوب متکی باشند (۲۰).

هم‌زمان، گروه تجربی پس از مداخله، اوج گشتاور ایزوکینتیک بیشتری در عضلات اورتور مچ پا در سرعت ۶۰ درجه بر ثانیه نسبت به گروه کنترل نشان داد. این یافته به یکی از نارسایی‌های عضلانی که در افراد مبتلا به CAI به‌خوبی مستند شده است، مربوط می‌شود. کاهش قدرت اورتورهای مچ پا ممکن است با محدودکردن توانایی عضلات برای مقابله با نیروهای اینورژن هنگام فعالیت‌هایی مانند تغییر جهت و فرود، ثبات پویای مفصل را مختل کند (۲۱). اضافه‌بار پیش‌رونده به‌کاررفته در پروتکل توان‌بخشی، که از تمرینات کانسنتریک کنترل‌شده با Thera-Band به تمرینات اکسنتریک دشوارتر پیشرفت می‌کرد، ممکن است به بهبود ظرفیت عضلانی و کنترل عصبی‌عضلانی کمک کرده باشد. افزایش قدرت اورتورها ممکن است با ایجاد مقاومت بیشتر در برابر اینورژن بیش از حد و حمایت از ثبات عملکردی اندام تحتانی، به کنترل بهتر مکانیک مچ پا طی تکالیف پویا کمک کند (۲۲).

در ارتباط با کنترل پویای پاسچر، گروه تجربی امتیاز ترکیبی تعدیل‌شده Y-Balance بالاتری در پس‌آزمون نسبت به گروه کنترل نشان داد. این بهبود با سهم قابل‌توجه تمرینات حس عمقی و تعادل در پروتکل توان‌بخشی همخوانی دارد. پیشرفت تمرین از سطوح پایدار به ناپایدار، از جمله تمرینات انجام‌شده با وسایلی مانند BOSU، چالش حسی‌پیکری بیشتری ایجاد می‌کند که ممکن است بازوزن‌دهی حسی را تحریک کرده و راهبردهای کنترل پاسچر را بهبود بخشد (۲۳). ترکیب تمرینات تعادل پویا و تمرینات قدرتی پیش‌رونده ممکن است اثر مکملی ایجاد کرده باشد؛ به‌گونه‌ای که بهبود ظرفیت عضلانی، پایه مکانیکی باثبات‌تری برای سیستم عصبی مرکزی فراهم کرده و امکان کنترل فاصله‌های دستیابی بیشتر را همراه با حفظ ثبات پاسچر فراهم کرده باشد (۲۴).

یکی دیگر از یافته‌های مهم، بهبود کیفیت حرکات عملکردی بود که در امتیاز کل FMS منعکس شد. گروه تجربی در مقایسه با گروه کنترل، امتیاز کل تعدیل‌شده FMS بالاتری در پس‌آزمون نشان داد .FMS الگوهای حرکتی بنیادی را ارزیابی می‌کند که نیازمند تعامل میان ثبات پروگزیمال و تحرک‌پذیری دیستال هستند. CAI ممکن است راهبردهای حرکتی پروگزیمال را تغییر دهد و به نقص در کنترل مفصل ران و تغییر راستای تنه هنگام تکالیف یک‌طرفه منجر شود؛ پدیده‌ای که از آن با عنوان آبشار پروگزیمال (proximal cascade) در CAI یاد شده است (۲۵). بنابراین، بهبود تحرک‌پذیری و ثبات دیستال مچ پا ممکن است به اجرای کارآمدتر الگوهای حرکتی کل بدن کمک کند. به‌طور خاص، بهبود دورسی‌فلکشن ممکن است اجرای مناسب‌تر الگوهای حرکتی مرتبط با اسکات را تسهیل کند، درحالی‌که افزایش ثبات اندام تحتانی و مفصل ران هنگام تکالیف یک‌طرفه ممکن است به عملکرد بهتر در الگوهای حرکتی مانند عبور از مانع کمک کند (۲۶).

ارتباط بالینی این یافته‌ها نیز قابل توجه است. در این مطالعه از روش‌های ارزیابی در دسترس و قابل‌استفاده در محیط‌های بالینی استفاده شد؛ از جمله تحلیل حرکتی دوبعدی با استفاده از Kinovea برای ارزیابی مکانیک فرود، دینامومتری ایزوکینتیک برای اندازه‌گیری قدرت عضلانی و آزمون‌های Y-Balance و FMS برای ارزیابی کنترل پویای پاسچر و کیفیت کلی حرکت. پیش‌تر نیز کاربرد تحلیل حرکتی دوبعدی برای تمایز عملکرد بیومکانیکی در جمعیت‌های ورزشی نشان داده شده است (۲۷). مهم‌تر اینکه یافته‌های مطالعه حاضر نشان می‌دهند یک برنامه توان‌بخشی ساختاریافته و پیش‌رونده می‌تواند طی یک دوره هشت‌هفته‌ای، تفاوت‌های قابل‌توجهی را بین گروه‌ها در چندین پیامد بیومکانیکی و عملکردی ایجاد کند. این یافته‌ها از رویکرد توان‌بخشی‌ای حمایت می‌کنند که فراتر از کاهش علائم بوده و بر بازیابی کنترل عصبی‌عضلانی، ظرفیت عضلانی، تعادل پویا و کیفیت کلی حرکت تأکید دارد. بر این اساس، توان‌بخشی CAI ممکن است از رویکردی بهره‌مند شود که فراتر از برطرف‌شدن درد یا علائم عملکردی اولیه حرکت کرده و به سمت بازیابی جامع ظرفیت حرکتی و عملکرد عصبی‌عضلانی مرتبط با ورزش پیش رود (۲۸).

چندین محدودیت مطالعه حاضر باید مورد توجه قرار گیرند. نخست، حجم نمونه نسبتاً کم و ورود صرفاً ورزشکاران مرد ممکن است تعمیم‌پذیری یافته‌ها را به ورزشکاران زن و جمعیت‌های گسترده‌تر ورزشی مبتلا به CAI محدود کند. دوم، بیومکانیک مچ پا هنگام فرود با استفاده از تحلیل ویدئویی دوبعدی در صفحه ساژیتال ارزیابی شد؛ بنابراین، حرکات بالقوه مرتبط در صفحات فرونتال و ترنسورس قابل ارزیابی نبودند. سوم، ارزیابی ایزوکینتیک صرفاً بر اوج گشتاور کانسنتریک عضلات اورتور مچ پا در سرعت زاویه‌ای ۶۰ درجه بر ثانیه متمرکز بود. عملکرد اکسنتریک عضلات و گشتاور ایزوکینتیک عضلات اینورتور مچ پا ارزیابی نشد. بنابراین، یافته‌ها تنها بازنمایی محدودی از تعادل قدرت آگونیست–آنتاگونیست ارائه می‌کنند و کنترل عضلانی اکسنتریک طی حرکات اختصاصی مچ پا در ورزش را به‌طور کامل منعکس نمی‌کنند. چهارم، اگرچه پیامدهای پس‌آزمون با استفاده از ANCOVA بر اساس مقادیر پایه تعدیل شدند، گروه کنترل فعالیت‌های تمرینی معمول خود را ادامه داد که از نظر فراوانی، مدت یا محتوا به‌صورت آزمایشی استاندارد نشده بودند؛ بنابراین، این موضوع ممکن است موجب ایجاد تغییرپذیری کنترل‌نشده بین شرکت‌کنندگان شده باشد. پنجم، تکالیف Y-Balance و پرش–فرود در برنامه توان‌بخشی گنجانده شده بودند و متعاقباً به‌عنوان آزمون‌های ارزیابی پیامد نیز مورد استفاده قرار گرفتند. بنابراین، اثر تمرین اختصاصی تکلیف یا آشنایی با آزمون را نمی‌توان به‌طور کامل رد کرد و بخشی از بهبودهای مشاهده‌شده در این پیامدها ممکن است علاوه بر تغییرات واقعی در عملکرد عصبی‌عضلانی و بیومکانیک مچ پا، ناشی از افزایش آشنایی با تکالیف آزمون باشد. اگرچه امتیاز کل FMS به‌عنوان یک پیامد ترکیبی پیوسته تحلیل شد، امتیازات مؤلفه‌های منفرد آن ماهیت ترتیبی دارند که باید هنگام تفسیر یافته‌های آماری مورد توجه قرار گیرد. در نهایت، این مطالعه شامل ارزیابی پیگیری

بلندمدت نبود؛ بنابراین، مشخص نیست که آیا بهبودهای مشاهده‌شده در پیامدهای بیومکانیکی و عملکردی پس از پایان برنامه توان‌بخشی هشت‌هفته‌ای حفظ می‌شوند یا خیر. پژوهش‌های آینده باید با به‌کارگیری نمونه‌های بزرگ‌تر و متنوع‌تر، استفاده از تحلیل بیومکانیکی سه‌بعدی، ارزیابی عملکرد عضلات اینورتور و اورتور در شرایط کانسنتریک و اکسنتریک و در چندین سرعت زاویه‌ای، استانداردسازی یا پایش فعالیت‌های گروه کنترل و انجام ارزیابی‌های پیگیری طولانی‌مدت، این محدودیت‌ها را مورد بررسی قرار دهند.

نتیجه‌گیری نهایی

این کارآزمایی تصادفی کنترل‌شده نشان داد که یک برنامه توان‌بخشی پیش‌رونده، چندبعدی و مبتنی بر تمرین به مدت ۸ هفته، پس از تعدیل بر اساس امتیازات متناظر پیش‌آزمون، با مقادیر بالاتر پس‌آزمون در چهار پیامد اندازه‌گیری‌شده در ورزشکاران مرد مبتلا به بی‌ثباتی مزمن مچ پا (CAI) همراه بود. گروه تجربی (EG) در مقایسه با گروه کنترل (CG)، مقادیر تعدیل‌شده پس‌آزمون بالاتری در اوج دورسی‌فلکشن مچ پا هنگام فرود از پرش، اوج گشتاور ایزوکینتیک عضلات اورتور در سرعت ۶۰ درجه بر ثانیه، امتیاز ترکیبی Y-Balance و امتیاز کل FMS نشان داد. این یافته‌ها نشان‌دهنده بهبودهای کوتاه‌مدت در پیامدهای بیومکانیکی و عملکردی اندازه‌گیری‌شده پس از اجرای برنامه توان‌بخشی هستند. در این مطالعه، عود آسیب، بازگشت به ورزش، نیروهای عکس‌العمل زمین یا حفظ بلندمدت تغییرات مشاهده‌شده ارزیابی نشدند؛ بنابراین، نباید بر اساس این یافته‌ها درباره پیشگیری از آسیب، آمادگی برای بازگشت به ورزش یا بازیابی گسترده‌تر عملکرد عصبی‌عضلانی نتیجه‌گیری کرد. انجام پژوهش‌های بیشتر با نمونه‌های بزرگ‌تر و متنوع‌تر، ارزیابی‌های بیومکانیکی سه‌بعدی، سنجش‌های بیشتر عملکرد عضلات مچ پا و پیگیری بلندمدت ضروری است.

ملاحظات اخلاقی

پیروی از اصول اخلاق پژوهش

تأییدیه اخلاقی از کمیته بازبینی نهادی (IRB) دانشکده تربیت بدنی و علوم ورزشی دانشگاه واسط دریافت شد (کد تأیید: WAST-2026-01). پیش از شرکت در مطالعه، رضایت‌نامه آگاهانه کتبی از تمامی شرکت‌کنندگان دریافت شد. تمامی فرایندهای پژوهش مطابق با اصول اعلامیه هلسینکی انجام شدند و محرمانگی و ناشناس‌ماندن اطلاعات تمامی شرکت‌کنندگان حفظ شد.

حامی مالی

این مطالعه هیچ‌گونه حمایت مالی خارجی دریافت نکرد و تمامی هزینه‌های پژوهش توسط پژوهشگران تأمین شد.

مشارکت نویسندگان

سندس فاروق حونی: مفهوم‌پردازی و طراحی مطالعه؛ اجرای پژوهش؛ تحلیل و تفسیر داده‌ها؛ نگارش پیش‌نویس اولیه؛ بازبینی و ویرایش مقاله. نویسنده نسخه نهایی مقاله را مطالعه و تأیید کرد.

تعارض

نویسنده اعلام می‌کند که هیچ‌گونه تعارض منافعی وجود ندارد.

References

1. Kaminski TW, Hertel J, Amendola N, Docherty CL, Dolan MG, Hopkins JT, et al. National Athletic Trainers' Association position statement: conservative management and prevention of ankle sprains in athletes. Journal of Athletic Training. 2013;48(4):528-545. [DOI:10.4085/1062-6050-48.4.02]

2. Doherty C, Delahunt E, Caulfield B, Hertel J, Ryan J, Bleakley C. The incidence and prevalence of ankle sprain injury: a systematic review and meta-analysis of prospective epidemiological studies. Sports Medicine. 2014;44(1):123-140. [DOI:10.1007/s40279-013-0102-5]

3. Maricot A, Corlùy H, De Pauw K, Lathouwers E, Meeusen R, Roelands B, et al. Deficits in neurocognitive performance in patients with chronic ankle instability during a neurocognitive balance task: a retrospective case-control study. Physical Therapy in Sport. 2024;66:1-8. [DOI:10.1016/j.ptsp.2023.12.009]

4. Wang Z, Lu M, Kong L, Meng L, Xue J, Zheng Y, et al. Impact of cognitive tasks on biomechanical adjustments during single-leg drop landings in individuals with functional ankle instability. Applied Sciences. 2024;14(22):10297. [DOI:10.3390/app142210272]

5. Asghari V, Farahpour N, Robbins S, Moisan G, Majlesi M. Kinematic changes of lower-limb joints during walking in individuals with chronic ankle instability on flat and inclined surfaces. Journal of Sport Biomechanics. 2026;12(2):302-319. [DOI:10.66224/JSportBiomech.12.2.302]

6. Uzlasir S, Tayfur B, Işıkdemir E, Tayfur A. Comparison of muscle activation and proprioception during landing at different angles between individuals with chronic ankle instability and healthy controls. BMC Musculoskeletal Disorders. 2025;26(1):929. [DOI:10.1186/s12891-025-09212-8]

7. Lao Y, Zeng Z, Yu Z, Gu Y, Jia Y, Liu J, et al. Uphill treadmill running and joint mobilization improve dynamic stability and ankle dorsiflexion range of motion in young adults with chronic ankle instability: a four-arm randomized controlled trial. Archives of Physical Medicine and Rehabilitation. 2025;106(2):177-186. [DOI:10.1016/j.apmr.2024.08.025]

8. Maeda N, Ikuta Y, Tsutsumi S, Arima S, Ishihara H, Ushio K, et al. Relationship of chronic ankle instability with foot alignment and dynamic postural stability in adolescent competitive athletes. Orthopaedic Journal of Sports Medicine. 2023;11(10):23259671231202220. [DOI:10.1177/23259671231202220]

9. Piri M, Otadi K, Shadmehr A, Malmir K. Effects of balance training on postural control in athletes with chronic ankle instability: a systematic review. Journal of Sport Biomechanics. 2022;8(3):248-264. [DOI:10.61186/JSportBiomech.8.3.248]

10. Feng SM, Luo X, Maffulli N, van Dijk CN, Oliva F, Fehske K, et al. Clinical practice guidelines for rehabilitation following surgical management of chronic lateral ankle instability: enhancing recovery based on available evidence. British Medical Bulletin. 2025;154(1):ldaf002. [DOI:10.1093/bmb/ldaf002]

11. Erdman A, Loewen A, Dressing M, Wyatt C, Oliver G, Butler L, et al. A 2D video-based assessment is associated with 3D biomechanical contributors to dynamic knee valgus in the coronal plane. Frontiers in Sports and Active Living. 2024;6:1352286. [DOI:10.3389/fspor.2024.1352286]

12. Hertel J, Corbett RO. An updated model of chronic ankle instability. Journal of Athletic Training. 2019;54(6):572-588. [DOI:10.4085/1062-6050-344-18]

13. Mohammed HM, Majed OM, Abdulkareem OW, Abdulhussein AA, Shehab GM, Kadhim MJ. Effects of an augmented motor reality-based training program on spatial awareness and skill-based decision making in youth basketball players. AIP Conference Proceedings. 2026:020019. [DOI:10.1063/12.0046265]

14. Elsotohy NM, Salim YE, Nassif NS, Hanafy AF. Cross-education effect of balance training program in patients with chronic ankle instability: a randomized controlled trial. Injury. 2021;52(3):625-632. [DOI:10.1016/j.injury.2020.09.065]

15. Hassan MFA, Abdulkareem OW. Effects of an integrated balance and muscle tension control training program on kinematic variables and defensive accuracy in volleyball players. Journal of Sport Biomechanics. 2026;11(4):438-464. [DOI:10.61882/JSportBiomech.11.4.438]

16. Zhang Y, Liu Y, Shang T, Jian L, Wang J, Abbott SD, et al. The reliability and validity of Star Performer™, a computerized tool for quantifying the Star Excursion Balance Test. International Journal of Sports Physical Therapy. 2025;20(6). [DOI:10.26603/001c.137953]

17. O'Brien W, Philpott C, Lester D, Belton S, Duncan MJ, Donovan B, et al. Motor competence assessment in physical education: convergent validity between fundamental movement skills and functional movement assessments in adolescence. Physical Education and Sport Pedagogy. 2023;28(3):306-319. [DOI:10.1080/17408989.2021.1990241]

18. Zhang C, Luo Z, Wu D, Fei J, Xie T, Su M. Effectiveness of exercise therapy on chronic ankle instability: a meta-analysis. Scientific Reports. 2025;15(1):11709. [DOI:10.1038/s41598-025-95896-w]

19. He Z, Zhu H, Ye B, Zheng Z, Liu G, Pan H, et al. Does chronic ankle instability patients lead to changes in biomechanical parameters associated with anterior cruciate ligament injury during landing? A systematic review and meta-analysis. Frontiers in Physiology. 2024;15:1428879. [DOI:10.3389/fphys.2024.1428879]

20. Hou Z, Shen W, Fong DTP, Winter SL. Anticipation of landing leg masks ankle inversion orientation deficits and peroneal insufficiency during jump landing in people with chronic ankle instability. Scandinavian Journal of Medicine & Science in Sports. 2024;34(2):e14585. [DOI:10.1111/sms.14585]

21. Aguilaniu A, Grosdent S, Schwartz C, Martens G, Croisier JL, Durieux N. Reliability and measurement error of instrument-based methods to assess ankle evertor strength: a systematic review. Journal of Sport Rehabilitation. 2026:1-19. [DOI:10.1123/jsr.2024-0424]

22. Lin CW, Jankaew A, Lin CF. Physical therapy intervention effects on alteration of spinal excitability in patients with chronic ankle instability: a systematic review and meta-analysis. Sports Health: A Multidisciplinary Approach. 2025;17(2):394-403. [DOI:10.1177/19417381241253248]

23. Hu X, Feng T, Li P, Liao J, Wang L. Bilateral sensorimotor impairments in individuals with unilateral chronic ankle instability: a systematic review and meta-analysis. Sports Medicine - Open. 2024;10(1):33. [DOI:10.1186/s40798-024-00702-y]

24. Maricot A, Lathouwers E, Verschueren J, De Pauw K, Meeusen R, Roelands B, et al. Test-retest, intra- and inter-rater reliability of the reactive balance test in patients with chronic ankle instability. Frontiers in Neurology. 2024;15:1320043. [DOI:10.3389/fneur.2024.1320043]

25. Werner D, Casey L, Myers E, Barrios JA. Lower limb squat biomechanics and select clinical measures in chronic ankle instability. Clinical Biomechanics. 2024;113:106211. [DOI:10.1016/j.clinbiomech.2024.106211]

26. Fitton Davies K, Sacko RS, Lyons MA, Duncan MJ. Association between Functional Movement Screen scores and athletic performance in adolescents: a systematic review. Sports. 2022;10(3):28. [DOI:10.3390/sports10030028]

27. Abdulkareem OW, Sattar Jabbar H. Comparative biomechanical analysis of three-point shooting between elite Iraqi basketball players and international counterparts. Journal of Sport Biomechanics.

2025;11(3):326-342. [DOI:10.61882/JSportBiomech.11.3.326]

28. Cervera-Garvi P, Marchena-Rodriguez A, Lopezosa-Reca E, Diaz-Miguel S, Ortega-Avila AB. Systematic review of the methodological quality of patient-reported outcome measure for patients with chronic ankle instability. Clinical Rehabilitation. 2023;37(10):1332-1346. [DOI:10.1177/02692155231166217]