



Research Paper

Effect of Running Induced Fatigue on Plantar Pressure Variables in Overweight Males with Pronated Feet Compared to Normal Groups During Walking

Hossein Farzollahi¹ , Amirali Jafarnezhadgero^{*1} , Arefeh Mokhtary MalekAbadi¹ , Mahrokh Dehghani¹ , Farhad Rezazade¹

1. Department of Sports Biomechanics, Faculty of Educational Sciences and Psychology, University of Mohaghegh Ardabili, Ardabil, Iran.

Scan to read online



Citation: Farzollahi H, Jafarnezhadgero A, Mokhtary MalekAbadi A, Dehghani M, Rezazade F. Effect of Running Induced Fatigue on Plantar Pressure Variables in Overweight Males with Pronated Feet Compared to Normal Groups During Walking. Journal of Sport Biomechanics. 2027;12(4):792–823. <https://doi.org/10.66224/JSportBiomech.12.4.792>



Article Info:

Received: 19 August 2026

Accepted: 17 October 2026

Published: 20 October 2026

Keywords:

Plantar pressure;
Running-induced fatigue;
Pronated foot;
Overweight; Gait

ABSTRACT

Objective Pronated foot posture is a common lower-limb condition. This study aimed to investigate the effects of running-induced fatigue on plantar pressure variables during walking in overweight men with pronated feet.

Methods In this quasi-experimental pretest–posttest study, 40 male students aged 18–35 years were recruited through convenience sampling and assigned to four groups based on body weight (normal: $20 \leq \text{BMI} < 25 \text{ kg/m}^2$; overweight: $25 \leq \text{BMI} \leq 35 \text{ kg/m}^2$) and foot posture (normal: navicular drop 5–10 mm, foot posture index 0–6; pronated: navicular drop 10–19 mm, foot posture index >10–12). Plantar loading was assessed using a Footscan system. Data were analyzed using two-way repeated-measures ANOVA following the Shapiro–Wilk normality test ($P < 0.05$).

Results Fatigue reduced first metatarsal force and increased medial and lateral heel force and pressure ($P < 0.05$). Significant group differences were found in plantar force distribution across the metatarsals, midfoot, and heel ($P < 0.05$). Midfoot force was greater in overweight participants with pronated feet, whereas first and second metatarsal forces were greater in overweight participants with normal feet. A significant fatigue $\times$ group interaction was observed for hallux peak force ($P < 0.001$), but not for plantar pressure variables.

Conclusion Running-induced fatigue may alter plantar loading patterns during walking, particularly by increasing heel loading. Body weight status and foot posture may also be associated with differences in plantar force and pressure distribution, especially in the midfoot. However, the effects of fatigue were generally comparable across the study groups.

* Corresponding Author:

Amirali Jafarnezhadgero
amiralijafarnezhad@gmail.com

This is an open access article distributed under the terms of the [Creative Commons Attribution 4.0 International License \(CC BY 4.0\)](https://creativecommons.org/licenses/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

Obesity has become an increasingly important global public health concern. Individuals who experience obesity during childhood and adolescence are at increased risk of developing cardiovascular diseases, diabetes, and other associated comorbidities in adulthood (1). Previous estimates indicate that more than 300 million people worldwide are classified as obese (2). Furthermore, obesity has been associated with musculoskeletal disorders affecting the lower extremities, such as knee and hip osteoarthritis (3). Recent studies have also demonstrated that the foot may be affected by obesity (4). A systematic review of 25 studies involving 93,224 participants reported a strong association between obesity and nonspecific foot pain in the general population (5).

One possible explanation for the association between obesity and foot pain is that excess body weight increases mechanical loading on the foot. Indeed, previous studies have documented an association between obesity and increased plantar force and pressure (6). However, plantar loading patterns are influenced by factors other than body weight, including foot posture, joint range of motion, and walking speed (7). Previous studies have reported that the prevalence of foot pronation in adults ranges from 20% to 23% (8). Excessive foot pronation, a common lower-extremity musculoskeletal condition, is characterized by a reduction in medial longitudinal arch height and alterations in ankle joint alignment (9). This condition is frequently associated with ankle dysfunction resulting from biomechanical changes during gait (10). Alterations in ankle biomechanics may increase susceptibility to injury in this region. Excessive pronation is typically accompanied by medial displacement and inward inclination of the talus and navicular bones, contributing to a pronated foot posture. Pronated feet have been associated with increased mechanical stress and injury risk at the ankle, knee, and pelvic girdle joints (9). Individuals with excessive foot pronation often exhibit a lowered medial longitudinal arch, internal tibial rotation, femoral internal rotation, knee valgus, and, in cases of hyperpronation, increased lumbar lordosis (11).

Increased foot loading and alterations in plantar pressure associated with obesity have important implications for affected individuals and have attracted considerable attention from healthcare professionals and researchers over the past two decades. Previous studies have investigated these changes using various plantar pressure assessment tools (12). Plantar pressure analysis provides a method for evaluating the relationship between foot posture and lower-limb biomechanics, offering valuable information about the interaction of different lower-limb segments (13). Foot structure and plantar pressure patterns vary according to age, assessment conditions (static or dynamic) (14), and the frequency of assessments across age groups (15), as well as the type and intensity of physical activity. A significant inverse association between plantar pressure and physical activity level has also been reported (16). Plantar pressure assessment can reveal alterations in foot posture and provide information about the forces acting on the foot during standing and walking in healthy individuals and those with various conditions, including obesity. Furthermore, plantar pressure measurements may provide insights into changes associated with lower-limb pain (17), impaired stability, and falls (18). Fatigue is another important physiological factor influencing human movement and performance (19). Physiologically, fatigue can be described as a reduced ability of muscles to generate sufficient force to sustain a given activity (20). Previous research has demonstrated that fatigue reduces voluntary muscle strength and functional capacity, disrupts the coordinated activation of agonist and antagonist muscles, and impairs overall neuromuscular performance and efficiency (21, 22). Evidence from previous studies suggests that fatigue-related reductions in neuromuscular function can substantially affect movement mechanics and patterns of muscle activation (23). Furthermore, fatigue may alter lower-extremity kinetics and potentially increase the risk of musculoskeletal injuries (24).

Consequently, repeated episodes of substantial fatigue have been identified as a potential risk factor for overuse injuries (25), highlighting the importance of appropriate fatigue management (26).

Understanding the effects of fatigue on foot pronation and its potential consequences for arch structure is therefore important in biomechanics (27). Fatigue is also characterized by a progressive decline in physical and mental performance (28). During prolonged or repetitive activities, fatigue may result from several mechanisms, including reduced availability of energy substrates, accumulation of metabolites within muscle fibers, and alterations in motor commands originating from the motor cortex (29). Nevertheless, assessments that do not account for fatigue may fail to capture the full complexity of human locomotion, as fatigue-induced changes can significantly alter gait dynamics (30) and foot function (31) in both sports science and clinical settings (32). Athletes participating in endurance competitions or repetitive training programs may experience fatigue-related changes in foot pronation (33), potentially increasing their susceptibility to sports-related conditions, such as Achilles tendon pain and shin splints, and impairing athletic performance (34). Similarly, in clinical settings, individuals with certain foot disorders or pathologies may exhibit altered foot mechanics only after the onset of neuromuscular fatigue (35), emphasizing the need for a more comprehensive understanding of fatigue-induced biomechanical changes. Identifying these changes may provide valuable information for preventing secondary injuries. Accordingly, assessing plantar pressure characteristics before and after fatigue has received considerable attention. Plantar pressure analysis can provide useful information about weight distribution, center of pressure (COP) displacement, and postural biomechanics. Such assessments may improve our understanding of fatigue-related biomechanical adaptations, particularly in individuals with pronated feet.

The present study was based on two hypotheses: (1) running-induced fatigue significantly affects plantar pressure variables during walking in overweight men with pronated feet, and (2) there is a significant interaction between fatigue and group characteristics in plantar pressure variables during walking. Therefore, this study aimed to investigate the effects of running-induced fatigue on plantar pressure variables during walking in overweight men with pronated feet.

Methods

Study Design and Participants

A quasi-experimental study with a pretest–posttest design was conducted. Based on findings from previous studies and an a priori power analysis performed using G*Power software, the minimum required sample size was estimated at 10 participants per group, assuming an effect size of 0.80, a significance level of 0.05, four groups, two measurements, and a correlation of 0.5 between repeated measurements. Accordingly, 40 male participants aged 19–35 years were recruited through convenience sampling from university students in Ardabil Province, Iran. All participants were sedentary young adults and were assigned to four groups according to their body weight status and foot posture. The groups were defined as follows: NN, individuals with non-excessive body weight ($20 \leq \text{BMI} < 25 \text{ kg/m}^2$) and non-pronated feet ($5 < \text{navicular drop} < 10 \text{ mm}$; Foot Posture Index [FPI] between 0 and 6); NP, individuals with non-excessive body weight and pronated feet ($10 < \text{navicular drop} < 19 \text{ mm}$; $10 < \text{FPI} \leq 12$); ON, individuals with excessive body weight ($25 \leq \text{BMI} \leq 35 \text{ kg/m}^2$) and non-pronated feet; and OP, individuals with excessive body weight and pronated feet.

In the present study, a modified version of the navicular drop test described by Brody was used to determine sagittal-plane displacement of the navicular bone between seated and single-leg standing positions (36). During testing, participants sat on a chair with both feet flat on the ground and their knees flexed at 90° . The most medial aspect of the navicular bone was marked, and its height was measured using a ruler. Participants were then instructed to stand on one leg by flexing the contralateral knee (37). Navicular height was measured again, and the difference between the seated and single-leg standing measurements was recorded as the navicular drop.

The Foot Posture Index consists of six items used to quantify and classify foot posture (38). FPI scores of 10–12 were classified as indicating overpronated feet, whereas scores of 0–6 were

classified as indicating normal foot posture (38). The characteristics of the study groups are presented in Table 1.

Only sedentary individuals were included in the study. A sedentary lifestyle was defined as fewer than 1,000 steps per day, recorded using a pedometer application installed on participants' mobile phones, and no regular physical exercise, defined as fewer than one exercise session per week based on questionnaire responses (39). The exclusion criteria for all groups included participation in physical exercise two to three times per week; a history of musculoskeletal surgery involving the trunk or lower limbs; cardiorespiratory, neuromuscular, or orthopedic disorders (except foot pronation in the NP and OP groups); and a lower-limb length discrepancy greater than 5 mm. All participants exhibited a heel-to-toe walking pattern, as determined from kinematic data. Before participation, all participants were informed about the study objectives and procedures and provided written informed consent. Participation was voluntary, and participants were free to withdraw at any stage without penalty. The confidentiality and anonymity of participants' personal information were maintained throughout the research process. All procedures were conducted in accordance with the ethical principles of the Declaration of Helsinki. The study protocol was reviewed and approved by the Research Ethics Committee of the University of Mohaghegh Ardabili, Iran (IR.UMA.REC.1402.011). Appropriate safety measures were implemented during the fatigue protocol and testing procedures to minimize the risk of injury or discomfort.

Experimental Protocol

The experimental protocol began with a five-minute warm-up consisting of stretching and walking. Participants were then familiarized with an 18-m overground walkway equipped with a Footscan system embedded at its midpoint. Participants were instructed to walk barefoot along the walkway at a constant speed of approximately 1.1 m/s, ensuring that their dominant foot landed in the center of the Footscan platform (40) (Fig. 1). Walking speed was controlled during both the pretest and posttest assessments by measuring the time required to cover the specified distance using a stopwatch. Several familiarization trials were conducted to allow participants to become accustomed to the required walking speed and foot placement on the Footscan platform. Following familiarization, participants completed four walking trials during which plantar pressure and corresponding forces were recorded across ten regions of the foot. Trials were repeated if the participant failed to place the entire dominant foot within the boundaries of the Footscan platform, altered their natural walking pattern to target the platform, or walked at a speed that deviated by more than 10% from the target speed.

Data Collection and Analysis

Body weight was measured using a force platform, and height was measured using a stadiometer to calculate body mass index (BMI). A treadmill equipped with a data recording system and a wireless heart rate monitor was used to induce and monitor fatigue. Plantar pressure variables and center of pressure (CoP) displacement during walking were measured using a Footscan system (RSscan

Table 1. Demographic characteristics of participants in the four different groups under study (Mean $\pm$ standard deviation).

Variables	Normal Weight with Normal Foot	Overweight with Pronated Foot	Overweight with Normal Foot	Normal Weight with Pronated Foot
Age (years)	23.1 $\pm$ 2.1	22.1 $\pm$ 4.8	25.1 $\pm$ 24.8	26.2 $\pm$ 2.5
Mass (kg)	67.5 $\pm$ 7.14	84.8 $\pm$ 14.02*	85.4 $\pm$ 36.79*	69.4 $\pm$ 15.01
Height (cm)	171.2 $\pm$ 7.01	169.0 $\pm$ 7.78	168.3 $\pm$ 1.27	170.2 $\pm$ 00.37
Body Mass Index (kg/m ²)	22.1 $\pm$ 2.04	28.2 $\pm$ 4.9*	27.1 $\pm$ 04.9*	21.1 $\pm$ 4.75
Navicular Drop (mm)	5.0 $\pm$ 3.7	12.1 $\pm$ 7.01*	5.1 $\pm$ 9.1	11.0 $\pm$ 01.71*

* Note: Data are reported as (mean $\pm$ SD). Significant differences are indicated by an asterisk ($p < 0.05$).

International, Belgium; $578 \times 418 \times 12$ mm; 4,096 sensors) operating at a sampling frequency of 253 Hz. Participants stood still on the platform for 5 seconds, during which data were recorded and averaged (Fig. 2). The device software automatically divided the foot into ten anatomical regions: the medial heel, lateral heel, midfoot, first to fifth metatarsals (M1–M5), hallux (T1), and second to fifth toes (T2–T5) (41). The mean values obtained from four trials were considered the pretest measurements. Following the running-induced fatigue protocol, posttest measurements were collected using the same procedure. The effects of fatigue (within-subject factor), group (between-subject factor), and their interaction (fatigue $\times$ group) were examined across the four groups. The biomechanical variables analyzed included peak plantar pressure and force distribution across the ten foot regions: hallux (T1), second to fifth toes (T2–T5), first to fifth metatarsals (M1–M5), midfoot, medial heel, and lateral heel.

Fatigue Protocol

A running-induced fatigue protocol was performed on a treadmill for each participant (Fig. 3). Before



Fig. 1. 1Execution of the walking test protocol (before and after the fatigue protocol)



Fig. 2. Subject standing on the foot scanner for foot scanning

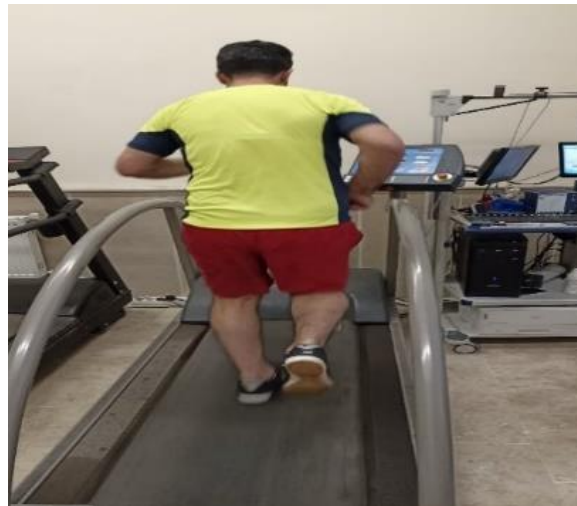


Fig. 3. Running induced fatigue protocol

testing, participants were familiarized with the Borg Rating of Perceived Exertion (RPE) scale, ranging from 6 (no exertion) to 20 (maximal exertion). The initial treadmill speed was set at 6 km/h and increased by 1 km/h every minute. Participants reported their perceived exertion at the end of each stage using the 6–20 Borg scale (42). Once an RPE of 13 was reached, the treadmill speed was maintained, and participants continued running at that speed. The test was terminated two minutes after participants reported an RPE of 17 or when they reached 80% of their maximum heart rate (43).

Statistical Analyses

Data normality was assessed using the Shapiro–Wilk test, and homogeneity of variances was evaluated using Levene's test ($P > 0.05$). A two-way repeated-measures analysis of variance (ANOVA) was used to examine the effects of fatigue, group, and their interaction. Bonferroni correction was applied for multiple comparisons. Effect sizes were estimated using eta squared (η^2), with values of 0.01–0.06, 0.06–0.14, and ≥ 0.14 interpreted as small, moderate, and large effects, respectively. Statistical significance was set at $P < 0.05$. All analyses were performed using SPSS version 28.

Results

The demographic characteristics of the participants are presented in Table 1. The results revealed a significant main effect of fatigue on plantar force in the first metatarsal ($P < 0.037$), medial heel ($P < 0.001$), and lateral heel ($P < 0.002$) regions. Pairwise comparisons showed that plantar force in the first metatarsal region decreased significantly following fatigue, whereas force in the medial and lateral heel regions increased significantly. Significant main effects of group were observed for plantar force in the hallux ($P < 0.001$), first metatarsal ($P < 0.005$), second metatarsal ($P < 0.003$), midfoot ($P < 0.001$), medial heel ($P < 0.010$), and lateral heel ($P < 0.001$) regions. Pairwise comparisons indicated that the overweight group with pronated feet exhibited greater midfoot force than the other groups. Furthermore, the overweight group with normal foot posture showed greater force in the first and second metatarsal regions than the other groups (Table 2). As shown in Table 3, a significant main effect of fatigue was observed for plantar pressure in the medial heel ($P < 0.011$) and lateral heel ($P < 0.013$) regions. Significant main effects of group were also found for plantar pressure in the hallux ($P < 0.001$), second to fifth toes ($P < 0.020$), first metatarsal ($P < 0.009$), second metatarsal ($P < 0.016$), midfoot ($P < 0.001$), medial heel ($P < 0.020$), and lateral heel ($P < 0.003$)

Table 2. Mean and Standard Deviation of Plantar Forces During Walking Among four Groups before and after the fatigue protocol.

Variable	NP		NN		OP		ON		F	G	F × G
	Pre	Post	Pre	Post	Pre	Post	Pre	Post	P (η^2)	P (η^2)	P (η^2)
Force Toe1	221.33±66.06	223.64±42.35	145.13±60.51	131.13±47.08	277.85±81.04	299.14±83.76	269.82±155.50	245.17±115.24	0.736 (0.003)	*0.001 (0.345)	0.494 (0.064)
Force Toe2-5	54.74±37.15	50.12±31.44	50.05±19.26	47.47±23.79	65.58±28.98	74.87±22.09	76.92±54.18	75.54±46.47	0.970 (0.001)	0.166 (0.130)	0.724 (0.036)
Force Metatarsal 1	192.97±83.37	206.24±65.04	198.47±104.48	178.13±61.04	288.88±90.12	278.31±102.98	314.50±121.85	321.88±137.24	*0.037 (0.001)	*0.005 (0.295)	0.344 (0.028)
Force Metatarsal 2	125.40±38.09	128.46±44.42	183.25±57.82	166.87±60.10	205.99±72.13	211.29±70.12	242.53±109.55	246.07±84.89	0.863 (0.001)	0.003* (0.314)	0.600 (0.050)
Force Metatarsal 3	160.29±73.44	163.97±63.00	183.30±80.91	171.41±60.00	232.34±68.29	235.54±61.63	216.03±88.32	223.49±75.17	0.927 (0.001)	0.079 (0.170)	0.750 (0.033)
Force Metatarsal4	107.01±45.73	104.88±35.06	126.62±73.68	114.50±50.20	146.82±43.77	144.88±50.21	166.13±81.55	172.44±71.34	0.677 (0.005)	0.072 (0.174)	0.745 (0.033)
Force Metatarsal5	53.74±25.67	52.77±29.88	68.52±51.36	69.26±55.22	69.90±15.05	62.12±16.37	87.17±55.29	88.54±38.04	0.760 (0.003)	0.208 (0.117)	0.869 (0.020)
Force MidFoot	154.20±73.51	165.98±78.70	128.31±67.76	122.17±55.20	324.94±130.41	357.59±143.62	161.37±61.06	177.95±80.52	0.055 (0.099)	0.001* (0.496)	0.278 (0.100)
Force HeelMedius	411.05±95.53	454.79±126.17	402.69±140.77	407.03±145.84	437.52±58.12	479.61±52.63	535.60±131.93	608.67±131.64	0.001* (0.305)	0.010* (0.267)	0.149 (0.136)
Force HeelLatral	280.44±66.94	327.70±68.43	259.78±53.51	270.67±68.26	338.31±38.19	364.26±44.48	389.76±84.90	411.84±103.47	0.002* (0.234)	0.001* (0.411)	0.449 (0.070)

Note: Values are presented as mean ± SD. NP, normal weight with pronated feet; NN, normal weight with normal feet; OP, overweight with pronated feet; ON, overweight with normal feet; Pre, pre-fatigue; Post, post-fatigue; T1, hallux; T2–5, second to fifth toes; M1–M5, first to fifth metatarsals; MF, midfoot; MH, medial heel; LH, lateral heel; F, main effect of fatigue; G, main effect of group; F × G, fatigue-by-group interaction; P, statistical significance; η^2 , eta squared. *P < 0.05.

Table 3. Mean and Standard Deviation of Plantar Pressures During Walking Among four Groups before and after the fatigue protocol.

Variable	NP		NN		OP		ON		F	G	F × G
	Pre	Post	Pre	Post	Pre	Post	Pre	Post	P (η^2)	P (η^2)	P (η^2)
Pressure Toe1	16.43±3.49	17.62±3.90	10.93±5.09	10.21±4.43	20.02±5.96	21.73±5.60	18.74±9.03	17.75±6.81	0.717 (0.004)	*0.001 (0.376)	0.553 (0.056)
Pressure Toe2-5	5.10±1.54	4.65±1.32	4.51±1.44	4.35±1.90	5.49±1.02	6.15±1.02	6.45±2.54	6.61±2.25	0.828 (0.001)	0.020 (0.237)	0.390 (0.079)
Pressure Metatarsal 1	10.68±4.94	10.97±3.60	11.15±5.12	9.96±3.28	13.10±3.68	13.31±4.41	16.32±5.27	16.85±6.12	0.947 (0.001)	*0.009 (0.271)	0.780 (0.029)
Pressure Metatarsal 2	13.01±4.08	13.69±4.36	20.17±7.14	17.59±6.03	19.09±8.01	18.71±7.14	25.04±11.91	24.96±10.21	0.303 (0.029)	*0.016 (0.247)	0.222 (0.114)
Pressure Metatarsal 3	13.80±4.03	14.35±4.11	16.59±7.04	15.57±5.87	18.16±6.51	18.29±5.61	18.92±7.69	19.32±6.23	0.976 (0.001)	0.216 (0.115)	0.773 (0.030)
Pressure Metatarsal4	9.53±2.73	9.23±2.46	11.53±7.04	10.29±4.81	12.17±4.40	11.16±3.70	14.65±7.01	15.05±5.60	0.294 (0.030)	0.658 (0.164)	0.088 (0.043)
Pressure Metatarsal5	6.13±2.54	5.91±2.49	7.63±5.12	7.86±5.82	6.53±1.96	5.67±1.21	8.66±4.60	8.95±3.56	0.715 (0.004)	0.713 (0.109)	0.241 (0.037)
Pressure MidFoot	4.83±1.15	5.01±1.21	5.01±1.82	4.75±1.36	7.68±2.04	8.31±2.08	5.98±1.55	6.37±1.80	0.143 (0.059)	*0.001 (0.414)	0.252 (0.106)
Pressure HeelMedius	20.72±5.31	22.48±6.21	20.85±7.17	20.46±7.54	19.71±2.26	21.16±2.28	25.81±5.57	28.75±5.59	*0.011 (0.165)	*0.020 (0.237)	0.201 (0.119)
Pressure HeelLatral	15.49±3.88	17.73±3.70	14.75±3.48	15.15±4.42	16.39±0.81	17.43±2.95	20.40±3.65	21.36±5.00	*0.013 (0.160)	*0.003 (0.312)	0.519 (0.060)

Note: Values are presented as mean ± SD. NP, normal weight with pronated feet; NN, normal weight with normal feet; OP, overweight with pronated feet; ON, overweight with normal feet; Pre, pre-fatigue; Post, post-fatigue; T1, hallux; T2-5, second to fifth toes; M1-M5, first to fifth metatarsals; MF, midfoot; MH, medial heel; LH, lateral heel; F, main effect of fatigue; G, main effect of group; F × G, fatigue-by-group interaction; P, statistical significance; η^2 , eta squared. *P < 0.05.

regions. No significant fatigue $\times$ group interaction effects were observed for plantar pressure variables ($P > 0.05$).

Discussion

The findings indicated that the applied force in the first metatarsal region after fatigue was lower compared to before fatigue during walking. These findings are consistent with the results of Garcia-Perez et al., who found that treadmill running increased ground contact and reduced peak pressure in the heel, metatarsus, and hallux. It also decreased stride frequency, decreased peak pressure in the lateral heel and hallux, and increased relative load in the medial arch (44). Moreover, the force values in the medial and lateral heel regions after fatigue were significantly greater than before fatigue. Muscle fatigue of the foot and ankle muscles during walking is associated with changes in foot roll-over and ankle movement kinematics (45) that will lead to sub-optimal running mechanics (46). Indeed, it has been observed that foot muscle fatigue shifted the dynamic plantar pressure to the medial forefoot (47), reflecting excessive pronation. However, our results showed that running induced fatigue shifted the dynamic plantar forces to the heel regions. These results are consistent with the findings of William et al. and Abdollahi et al. who reported that loading on the medial heel increases after fatigue (48, 49).

Findings showed that the force values in the midfoot region for the overweight group with a pronated foot were greater compared to other groups. When compared to normal-weight individuals they also had increased values of plantar pressure, midfoot and second head metatarsal head plantar pressures (50). The differences in plantar pressure distribution, therefore, may be related to mechanical repercussions of movement pattern changes due to fatigue. In fatigue conditions, reduced muscular control of the foot-shank joints may impair the ability to dynamically resist eversion or inversion (51). The authors noticed that overweight individuals with a pronated foot seemed to flatten the midfoot during walking. In obese and overweight people, perhaps more important than the development of muscle fatigue is how their high body mass has been reported to affect plantar pressure and force pattern (52), walking strategies (53), and foot posture (54), such that they were at a higher risk of foot discomfort and/or pathologies than normal-weight people (17). A previous study demonstrated that overweight subjects had diminished foot sensitivity and a similar sensitivity in certain foot areas in comparison to gender, age and height-matched normal-weight subjects (55). The conclusions suggested that due to an increased plantar pressure and reduced foot sensitivity, obese individuals are predisposed to a higher risk of foot injury, with limitation in activity performance (55). Our observation of significant differences in plantar loading characteristics between obese and non-obese participants is consistent with previous research that has identified higher peak pressures under the feet of obese individuals (6). Wilson and Krnozek (56) reported that fatigue leads runners to modify their running mechanics, accompanied by changes in the loading patterns of the plantar surface. Fourchet et al. (46) demonstrated that fatigue is associated with increased loading beneath the medial arch. The elevated patterns of foot loading at the midfoot in obese participants observed in this study suggest that there is increased ground contact of the midfoot during walking, which could also be related to excessive adipose tissue in the medial arch. Wearing et al. (57) suggest that fat mass, rather than changes in foot structure, may be the cause of increased midfoot plantar pressures and the outward appearance of a 'flat' foot in obese individuals. Increased body mass is known to contribute to elevated peak plantar pressures and elevated peak plantar pressures are associated with foot pain (58). Change in body mass was not significantly associated with change in foot pain intensity, but there were significant, positive correlations between change in foot pain intensity and change in both heel and midfoot peak pressure. This is consistent with the findings of Anbarian and Esmaili, who studied the effect of running fatigue on the roll-over pattern of beginner runners, indicating increased pressure on the anterior and medial parts of the foot (59). But these results are inconsistent with the findings of Bizio

and Muretto that peak pressure decreases in the heel and midfoot regions. Bizio Muretto attributes this pressure change to the shift of the center of pressure toward the forefoot after fatigue (60).

Results indicated that the peak pressure values in the first and second metatarsal regions for the overweight group with a normal foot were greater compared to other groups. However, no studies have analyzed foot structure and its changes in function in obese individuals. The feet are constantly exposed to weight-bearing strains in obese individuals during normal gait, the weight in the feet is approximately 1.2 times the body weight (61). In obese individuals, weight bearing on the medial longitudinal arch is approximately 3 times greater than it is in normal weight individuals (57), which can cause negative biodynamic changes that may potentially decrease the quality of life, and restrict physical activity (62). In a prospective investigation, Teijs et al. (63) examined factors related to patellofemoral pain and identified greater loading beneath the second and third metatarsals as a significant contributing factor (63). Therefore, running-induced fatigue may increase the susceptibility of novice runners with low arches to patellofemoral pain. Excessive heel striking has also been identified as one of the contributing factors to patellofemoral pain (64). Greater pressure and loading in the medial forefoot are indicative of increased heel-strike loading (65) and may consequently represent a risk factor for patellofemoral pain among novice runners with low arches. Furthermore, decreased physical activity can lead to weakened muscle strength due to restricted motion (66). Excessive weight-bearing on feet due to obesity causes abnormal structural and functional changes in the foot. Furthermore, it results in decreased physical activity and weakened muscles, and leads to a series of unfortunate symptoms. These complications may increase socioeconomic costs related to obesity, and hence, preventing obesity is important. Wiest et al. (47) demonstrated that fatigue results in increased peak force, peak pressure, and momentum within the second and third metatarsal and midfoot regions (47). They proposed that these alterations in the rolling pattern of the foot may be useful in identifying metatarsal stress fractures associated with fatigue (47). According to Elliott and Ackland (67), alterations in foot mechanics during running can substantially influence running mechanics and overall performance (67). Accordingly, the observed mechanical changes may reflect a deterioration in optimal running biomechanics. Such suboptimal biomechanical patterns have also been recognized as contributing factors to the development of running-related injuries (68).

Recent studies on flat feet showed the importance of investigating the pathophysiology of plantar fasciitis and abnormalities of the feet in obese female adults (69). Obesity is a risk factor for plantar fasciitis (70), and a mean plantar fascia thickness of 4.8 mm has been reported in patients with plantar fasciitis (71). However, the mean plantar fascia thickness of obese patients in this study was 4.2 mm, which is 0.6 mm less than the mean thickness observed in patients with plantar fasciitis. Obese and overweight patients have a higher mean plantar pressure than normal weight individuals (72). Previous studies have reported increased plantar pressure on the heel and second and fourth metatarsal bones in male participants with a BMI of ≥ 25 kg/m² (57). In a prospective study, Willems et al. (65) demonstrated that a concentration of loading on the medial side of the foot during running represents a risk factor for ankle sprains among young male and female physical education students. Previous findings have likewise indicated that transferring load toward the medial aspect of the foot is associated with an increased risk of ankle sprain injuries (73). The accumulation and concentration of plantar loading along the medial region of the foot may further increase the likelihood of ankle sprains (74). Greater pressure and impact beneath the first metatarsal region have also been identified as potential risk factors for ankle sprains (65). Furthermore, increased metatarsal loading has been associated with the occurrence of metatarsal stress fractures (75). Thus, greater loading beneath the first, second, and third metatarsals during fatigue may correspond to an elevated risk of metatarsal stress fractures. Overall, running-induced fatigue may increase the risk of patellofemoral pain, ankle sprains, and metatarsal stress fractures among runners with low arches.

The group effect was statistically significant for the peak pressure at the first toe, the second to fifth toes, the first metatarsal bone, the second metatarsal bone, the midfoot region, the medial heel, and the lateral heel regions. These variations can determine the overloading of the lower limbs, clinically expressed by pain and discomfort (76). Because of higher peak pressures under lateral forefoot, midfoot and rearfoot while jogging in comparison to fast running, jogging may cause foot problems (77). Hamzawi and Esmaili (2021) reported that in the heel strike group, after fatigue, the pressure on the medial and lateral parts of the heel, the first metatarsal, and the big toe increased; also, the medial-lateral force ratio decreased in some phases. In the forefoot strike group, after fatigue, the pressure on the first to third metatarsals increased and the pressure on the fifth metatarsal decreased; the medial-lateral force ratio increased in certain phases. In both groups, the contact time after fatigue increased. Finally, they concluded that: fatigue has different effects on pressure distribution that depend on the type of foot strike, that is, the adaptive strategy of the foot with strike is different (78). Overweight individuals with reduced daily physical activity generate higher plantar pressures at forefoot and midfoot when compared to their normal-weight counterparts and those overweight with increased physical activity (79). The dynamic distribution of plantar pressure raises, with a maximum at forefoot (2nd–5th metatarsi) and midfoot (especially the medial part) (80). The evaluation of static plantar pressure shows that overweight and obese individuals generate higher forces on a higher foot area and increased plantar pressures when compared to their normal-weight counterparts, especially for the midfoot and under the heads of 2nd–5th metatarsi (81).

Additionally, the findings showed no significant differences for the interaction effect of fatigue and group. Therefore, given that the effect of group and fatigue variables was not significant in most of the variables of the present study, it should be considered that the response of different groups to the fatigue protocol was almost similar. These observations are inconsistent to those of the study of Mesquita et al. (76), that concluded that in obese individuals the plantar pressure distribution during running was modified. The results of this study showed that while running the obese individuals generated more forces when compared with those with lower weight. BMI was positively correlated with peak pressure for the whole foot, midfoot and forefoot. They had a larger contact area under all foot areas. Thereby, this study highlights that obesity is associated with the increase of plantar pressure during running with self-selected speeds (speeds identified as the average walking/running speed of five overground trials on a 10 m route (82). Moreover, it issued the hypothesis that obese individuals have a higher risk of developing foot discomfort and pain.

The physiological effects of fatigue on the activation and efficiency of the muscle mechanism lead to gait pattern disturbances. Hauswirt et al. (83) reported that both stride length and stride frequency undergo changes toward the end of prolonged running. Mizrahi et al. (84) also found that, during treadmill running at a constant speed, stride velocity decreases as running-induced fatigue becomes more pronounced. From a mechanical standpoint, alterations in the gait pattern inevitably result in corresponding changes in ground reaction forces. There are limitations in this study, including the limited number of subjects, the lack of recording of kinematic variables in 3D, and the use of barefoot walking, so the results of this study cannot be generalized to walking with shoes. Therefore, it is suggested that these issues be investigated in future studies. Given that the dependent variables of plantar pressure and force were high in different areas of the foot and there is a possibility of increased type I error, the results of the present study should be interpreted with caution. In addition, electromyographic muscle activity was not assessed. Recording electromyographic activity can help to better interpret neuromuscular adaptations and provide a clearer explanation for pressure-related changes.

Conclusion

The findings of this study suggest that running-induced fatigue may alter plantar force and pressure distribution during walking. Following fatigue, plantar loading appeared to shift from certain forefoot regions toward the heel, potentially reflecting changes in neuromuscular control.

Furthermore, overweight individuals, particularly those with pronated feet, exhibited greater plantar loading in certain regions, especially the midfoot. These findings suggest that body weight status and foot posture may influence plantar loading patterns. However, the absence of significant fatigue $\times$ group interaction effects for plantar pressure variables suggests that the groups responded similarly to the fatigue protocol in terms of plantar pressure distribution. Future studies incorporating lower-limb kinematics and muscle activity measurements are recommended to better understand the mechanisms underlying these changes.

Acknowledgements

This article is the result of the thesis of Hossein Farzollahi, a master's student at the University of Mohaghegh Ardabili. The authors sincerely thank the participants in this study for their voluntary participation.

Ethical Considerations

Compliance with ethical guidelines

All ethical principles were observed throughout the study. Participants were fully informed about the study objectives and procedures, and written informed consent was obtained from all participants before enrollment. Participation was voluntary, and participants were informed of their right to withdraw from the study at any stage without penalty. The confidentiality of personal information was maintained, and appropriate measures were taken to minimize potential physical or psychological harm. The study was conducted in accordance with the ethical principles of the Declaration of Helsinki. The research protocol was approved by the Research Ethics Committee of the University of Mohaghegh Ardabili, Iran (Ethics Code: IR.UMA.REC.1402.011).

Funding

This study did not receive any specific funding from government, commercial, or non-profit organizations.

Author's contributions

HF contributed to the study design, data analysis, manuscript drafting, and critical revision of the manuscript. AJ and AM contributed to the study design, data collection, and data analysis. All authors read and approved the final version of the manuscript.

Conflicts of interest

The authors declare no conflict of interest.

مقاله پژوهشی

تأثیر خستگی ناشی از دویدن بر متغیرهای فشار کف پای در مردان دارای پای پرونیت و اضافه وزن در مقایسه با گروه‌های طبیعی طی راه رفتن

حسین فرض الهی^۱، امیرعلی جعفرنژادگرو^{۱*}، عارفه مختاری ملکآبادی^۱، ماهرخ دهقانی^۱، فرهاد رضا زاده^۱

۱. گروه بیومکانیک ورزشی، دانشکده علوم تربیتی و روانشناسی، دانشگاه محقق اردبیلی، اردبیل، ایران.

Scan to read online



Citation: Farzollahi H, Jafarnezhadgero A, Mokhtary MalekAbadi A, Dehghani M, Rezazade F. Effect of Running Induced Fatigue on Plantar Pressure Variables in Overweight Males with Pronated Feet Compared to Normal Groups During Walking. Journal of Sport Biomechanics. 2027;12(4):792-823. <https://doi.org/10.66224/JSportBiomech.12.4.792>

چکیده

هدف پای پرونیت یک ناهنجاری شایع اندام تحتانی است؛ بنابراین، این مطالعه باهدف بررسی تأثیر خستگی عمومی بر متغیرهای فشار کف پای در مردان دارای پای پرونیت و اضافه وزن طی راه رفتن انجام شد.

روش‌ها در این مطالعه نیمه تجربی با طرح پیش‌آزمون-پس‌آزمون، ۴۰ دانشجوی مرد ۱۸ تا ۳۵ سال به روش نمونه‌گیری در دسترس انتخاب و بر اساس وضعیت وزن (طبیعی: $20 < BMI \leq 25$ کیلوگرم بر مترمربع؛ اضافه وزن: $25 \leq BMI \leq 35$ کیلوگرم بر مترمربع) و وضعیت ساختاری پا (طبیعی: افت استخوان ناوی ۵ تا ۱۰ میلی‌متر و شاخص وضعیت پا ۰ تا ۶؛ پرونیت: افت استخوان ناوی ۱۰ تا ۱۹ میلی‌متر و شاخص وضعیت پا بیشتر از ۱۰ تا ۱۲) به چهار گروه تقسیم شدند. متغیرهای بارگذاری کف پای با استفاده از دستگاه فوت‌اسکن اندازه‌گیری شدند. داده‌ها پس از بررسی طبیعی بودن توزیع با آزمون شاپیرو-ویلک، با استفاده از تحلیل واریانس دوطرفه با اندازه‌گیری مکرر تحلیل شدند ($p < 0.05$).

یافته‌ها خستگی موجب کاهش نیروی ناحیه متاتارس اول و افزایش نیرو و فشار در نواحی داخلی و خارجی پاشنه شد ($p < 0.05$). تفاوت‌های معنی‌داری بین گروه‌ها در توزیع نیروی کف پای در نواحی متاتارس، میان پا و پاشنه مشاهده شد ($p < 0.05$). نیروی ناحیه میان پا در افراد دارای اضافه وزن و پای پرونیت بیشتر بود؛ درحالی‌که نیروهای متاتارس اول و دوم در افراد دارای اضافه وزن و پای طبیعی مقادیر بیشتری داشتند. اثر تعاملی خستگی $\times$ گروه برای نیروی اوج ناحیه شست پا معنی‌دار بود ($p = 0.001$)، اما برای متغیرهای فشار کف پای معنی‌دار نبود.

نتیجه‌گیری نتایج نشان می‌دهد که خستگی ناشی از دویدن ممکن است بر الگوهای بارگذاری کف پا تأثیر بگذارد و تمایل به افزایش بارگذاری در ناحیه پاشنه داشته باشد. علاوه بر این، وضعیت وزن بدن و وضعیت پا ممکن است با تفاوت در توزیع نیرو و فشار کف پا، به‌ویژه در ناحیه میانی پا، مرتبط باشد. با این حال، به نظر می‌رسد اثرات خستگی در بین گروه‌های مورد مطالعه به‌طور کلی قابل‌مقایسه باشد.

اطلاعات مقاله:

دریافت: ۲۸ مرداد ۱۴۰۵

پذیرش: ۲۵ مهر ۱۴۰۵

انتشار: ۲۸ مهر ۱۴۰۵

کلیدواژه‌ها:

متغیرهای فشار کف پا، خستگی، پای پرونیت، اضافه وزن، راه رفتن

* نویسنده مسئول:

امیرعلی جعفرنژادگرو

amiralijafarnezhad@gmail.com

This is an open access article distributed under the terms of the [Creative Commons Attribution 4.0 International License \(CC BY 4.0\)](https://creativecommons.org/licenses/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

چاقی به عنوان یک چالش روبه افزایش و نگرانی قابل توجه برای نهادهای بهداشت عمومی جهانی ظهور کرده است. در بزرگسالی، افرادی که در دوران کودکی و نوجوانی چاقی را تجربه کرده اند، با خطر بالای ابتلا به بیماری های قلبی - عروقی، دیابت و سایر بیماری های همراه مرتبط مواجه هستند (۱). ارزیابی های قبلی نشان می دهد که بیش از ۳۰۰ میلیون نفر در سراسر جهان در گروه چاق طبقه بندی می شوند (۲) علاوه بر این، چاقی با اختلالات اسکلتی - عضلانی که به طور خاص بر اندام های تحتانی تأثیر می گذارند، مانند آرتروز زانو و لگن، مرتبط بوده است (۳). تحقیقات اخیر علاوه بر این نشان داده اند که با مستعد عواقب چاقی است (۴)، همان طور که توسط یک بررسی سیستماتیک شامل ۲۵ مطالعه با مجموع ۹۳۲۲۴ شرکت کننده نشان داده شده است که ارتباط قوی بین چاقی و درد غیراختصاصی پا در جمعیت عمومی وجود دارد (۵).

یک توضیح قابل قبول برای همبستگی بین چاقی و درد پا این تصور است که وزن اضافی بدن به افزایش بار مکانیکی روی پا کمک می کند. در واقع، ارتباطی بین افزایش نیرو و فشار وارد شده بر پا و چاقی ثبت شده است (۶). با این وجود، الگوهای بارگذاری کف پا تحت تأثیر عواملی فراتر از وزن صرف قرار می گیرند. به عنوان مثال، تغییرات در وضعیت پا، دامنه حرکت مفاصل و سرعت راه رفتن نیز به عنوان عوامل مؤثر بر الگوهای بارگذاری کف پا شناخته شده اند (۷). مطالعات قبلی شیوع پرونیشن پا در جمعیت بزرگسال را بین ۲۰ تا ۲۳ درصد گزارش کرده اند (۸). پرونیشن پا، یکی از شایع ترین ناهنجاری های اسکلتی - عضلانی اندام تحتانی، با کاهش ارتفاع قوس طولی داخلی و تغییرات در تراز بیومکانیکی مفصل مچ پا مشخص می شود (۹). این وضعیت اغلب با اختلال عملکرد مچ پا ناشی از تغییرات بیومکانیکی که در حین راه رفتن رخ می دهد، مرتبط است (۱۰). هرگونه تغییر در بیومکانیک مچ پا، ممکن است حساسیت به آسیب در این ناحیه را افزایش دهد. پرونیشن بیش از حد معمولاً با جابه جایی داخلی و تمایل استخوان های تالوس و نایکولار به سمت داخل همراه است و در نهایت منجر به ایجاد وضعیت پای پرونیشن شده می شود. پاهای پرونیشن شده ارتباط نزدیکی با افزایش استرس مکانیکی و خطر آسیب در مفاصل مچ پا، زانو و کمر بند لگن دارند (۹). افراد مبتلا به سندرم پرونیشن اغلب پرونیشن بیش از حد پا را همراه با کف پای صاف، چرخش داخلی تیبیا، چرخش داخلی استخوان ران، والگوس زانو و در موارد پرونیشن بیش از حد، افزایش لوردوز کمری نشان می دهند (۱۱). بار اضافی وارده به پا و تغییرات در پارامترهای فشار کف پا که به چاقی نسبت داده می شود، پیامدهای قابل توجهی برای افراد دارد و در نتیجه توجه متخصصان پزشکی و محققان را در دو دهه گذشته به خود جلب کرده است. مطالعات تجربی با استفاده از ابزارهای بی شماری برای ارزیابی فشار کف پا، این یافته ها را اثبات کرده اند (۱۲). مورد دوم روشی برای ارزیابی تعامل بین وضعیت پا و بیومکانیک اندام تحتانی ارائه می دهد. از طریق تجزیه و تحلیل پارامترهای آن، می توان به ارزیابی جامعی از تعامل شامل کل اندام تحتانی دست یافت (۱۳). بسته به سن و روش ارزیابی (استاتیک یا پویا) (۱۴) و همچنین فراوانی ارزیابی ها نسبت به گروه سنی (۱۵) یا ماهیت و شدت فعالیت بدنی، تنوع در ساختار پا و فشار کف پا وجود دارد. در زمینه افراد، همبستگی معکوس قابل توجهی بین فشار کف پا و سطح فعالیت بدنی ثبت شده است (۱۶). ارزیابی فشار کف پا می تواند تغییرات مختلفی را در وضعیت پا نشان دهد. علاوه بر این، می تواند داده های مربوط به نیروهایی که در حین ایستادن و راه رفتن بر پا وارد می شوند را در افراد سالم و افراد مبتلا به بیماری های مختلف، از جمله چاقی، ارائه دهد. فشار کف پا بینش هایی در مورد تغییرات مرتبط با شکایت درد در سطح اندام تحتانی (۱۷)، اختلالات پایداری یا حوادث سقوط ارائه می دهد (۱۸). خستگی به عنوان یک عامل فیزیولوژیکی مهم مؤثر بر حرکت و عملکرد انسان شناخته می شود (۱۹). از نظر فیزیولوژیکی، خستگی به عنوان ناتوانی یک عضله در تولید نیروی کافی برای حفظ یک فعالیت مشخص تعریف می شود (۲۰). تحقیقات قبلی نشان داده است که

خستگی منجر به کاهش قدرت عضلانی ارادی و ظرفیت عملکردی می‌شود. فعال‌سازی هماهنگ عضلات آگونیست و آنتاگونیست را مختل می‌کند و در نهایت عملکرد و کارایی کلی دستگاه عصبی - عضلانی را مختل می‌کند (۲۱، ۲۲). شواهد حاصل از مطالعات قبلی نشان می‌دهد که کاهش عملکرد عصبی - عضلانی ناشی از خستگی می‌تواند به‌طور قابل‌توجهی بر مکانیک حرکت و الگوهای فعالیت عصبی - عضلانی تأثیر بگذارد (۲۳). علاوه بر این، خستگی ممکن است سینتیک اندام تحتانی را تغییر دهد و در نتیجه خطر آسیب‌های اسکلتی - عضلانی را افزایش دهد (۲۴). در نتیجه، حالت‌های حاد مکرر خستگی بالا به‌عنوان یک عامل خطر اصلی برای آسیب‌های ناشی از خستگی (۲۵) در نظر گرفته می‌شوند و بنابراین نیاز به مدیریت دقیق دارند (۲۶)؛ بنابراین، درک تأثیر خستگی بر پرونیشن پا و پیامدهای بالقوه آن بر ساختار قوس پا در حوزه بیومکانیک از اهمیت قابل‌توجهی برخوردار است (۲۷). خستگی به‌عنوان یک زوال پیش‌رونده در عملکرد جسمی و ذهنی شناخته می‌شود (۲۸). به‌ویژه در حین انجام وظایف مداوم یا تکراری، خستگی ممکن است از سازوکارهای مختلفی از جمله کمبود مولکول‌های تأمین‌کننده انرژی و تجمع متابولیت‌ها در فیبرهای عضلانی و همچنین فرمان حرکتی غیربهینه ناشی از قشر حرکتی ناشی شود (۲۹). با این وجود، به‌طور فزاینده‌ای آشکار است که این روش ممکن است کل حرکت انسان را در برنگیرد، زیرا به‌خوبی ثابت شده است که تغییرات ناشی از خستگی می‌تواند تغییرات قابل‌توجهی در دینامیک راه‌رفتن (۳۰) و عملکردهای پا (۳۱) را در هر دو زمینه علوم ورزشی و بالینی ایجاد کند (۳۲). ورزشکارانی که در مسابقات استقامتی شرکت می‌کنند یا رژیم‌های تمرینی تکراری را تحمل می‌کنند، ممکن است با انحرافات در پرونیشن پا ناشی از خستگی مواجه شوند (۳۳) که می‌تواند احتمال بروز بیماری‌های التهابی مرتبط با ورزش (مانند آشیلو دینیا و شین اسپلینت) را افزایش داده و مانع عملکرد ورزشی شود (۳۴). به همین ترتیب، در محیط‌های بالینی، افرادی که با اختلالات یا آسیب‌شناسی‌های خاص پا مراجعه می‌کنند، ممکن است مکانیک پای اصلاح‌شده را صرفاً پس از شروع خستگی عصبی - عضلانی نشان دهند (۳۵) که این امر بر لزوم درک جامع‌تر این تغییرات ناشی از خستگی تأکید می‌کند؛ بنابراین، شناسایی تغییرات بیومکانیکی مرتبط با خستگی می‌تواند بینش‌های ارزشمندی برای پیشگیری از آسیب‌های ثانویه ارائه دهد. در این راستا، ارزیابی ویژگی‌های فشار کف پا قبل و بعد از خستگی توجه قابل‌توجهی را به خود جلب کرده است. تجزیه و تحلیل فشار کف پا، به‌عنوان یک شاخص کلیدی بیومکانیکی، می‌تواند اطلاعات ارزشمندی در مورد الگوهای توزیع وزن، جابجایی مرکز فشار (COP) و بیومکانیک وضعیتی ارائه دهد. چنین ارزیابی‌هایی ممکن است به درک بهتر سازگاری‌های بیومکانیکی مرتبط با خستگی، به‌ویژه در افراد مبتلا به پرونیشن پا با فرضیه‌های (۱) تأثیر خستگی بر مقادیر متغیرهای فشار کف پا در مردان دارای اضافه‌وزن مبتلا به پرونیته در حین راه‌رفتن معنی‌دار است. (۲) اثر تعاملی خستگی و اضافه‌وزن بر مقادیر متغیرهای فشار کف پا در حین راه‌رفتن معنی‌دار است، کمک کند؛ بنابراین، هدف از مطالعه حاضر بررسی تأثیر خستگی ناشی از دویدن بر متغیرهای فشار کف‌پایی در مردان دارای اضافه‌وزن با پای پرونیته طی راه‌رفتن است.

روش‌ها

طراحی مطالعه و شرکت‌کنندگان

باتوجه به اهداف مطالعه، از یک طرح تحقیقاتی نیمه‌تجربی با رویکرد پیش‌آزمون و پس‌آزمون استفاده شد. بر اساس داده‌های گزارش‌شده در مطالعات قبلی و تحلیل توان پیشین انجام‌شده با استفاده از نرم‌افزار G*Power، حداقل حجم نمونه موردنیاز برای دستیابی به اندازه اثر ۰.۸۰، سطح آلفای ۰.۰۵، ۴ گروه، تعداد اندازه‌گیری ۲ و همبستگی بین اندازه‌گیری‌های مکرر ۰.۵، ۱۰ شرکت‌کننده در هر گروه تخمین زده شد. براین اساس، در مجموع ۴۰ شرکت‌کننده مرد ۱۹ تا ۳۵ ساله از طریق نمونه‌گیری در دسترس از دانشجویان دانشگاه‌های استان اردبیل در سال ۱۴۰۲ انتخاب شدند. همه شرکت‌کنندگان در چهار گروه آزمایشی طبقه‌بندی شدند؛

بنابراین، چهل جوان کم‌تحرک بر اساس معیارهای مطالعه به چهار گروه اختصاص داده شدند. NN: افرادی با وزن بدن نرمال به‌عنوان مثال (کیلوگرم بر مترمربع $25 < BMI \leq 30$) و پاهای نرمال (به‌عنوان مثال، 10 میلی‌متر $< \text{افت ناویکولار}$ < 5 ، شاخص وضعیت پا بین 0 تا 6)؛ NP: افرادی با وزن بدن نرمال و پاهای پرونیت (به‌عنوان مثال، $19 < \text{افتادگی ناویکولار}$ < 10 میلی‌متر، $12 \leq$ شاخص وضعیت پا < 10)؛ ON: افرادی با وزن بدن بیش‌ازحد (به‌عنوان مثال، $25 \leq BMI \leq 35$ کیلوگرم بر مترمربع) و پاهای نرمال؛ OP: افرادی با وزن بدن بیش‌ازحد و چرخش به داخل پا. در مطالعه حاضر، از یک نسخه اصلاح شده از افتادگی ناویکولار که توسط برودی شرح داده شده است، برای تعیین جابجایی ناویکولار در صفحه ساجیتال بین حالت نشسته و ایستادن روی یک پا استفاده شد (۳۶). در طول آزمایش، شرکت‌کنندگان روی یک صندلی نشسته بودند و هر دو پا صاف روی زمین و زانوها با زاویه 90° درجه خم شده بودند. داخلی‌ترین قسمت ناویکولار علامت‌گذاری شد. ارتفاع ناویکولار با استفاده از خط‌کش اندازه‌گیری شد. پس از آن، از شرکت‌کننده خواسته شد تا با خم کردن زانوی طرف مقابل، روی یک پا بایستد (۳۷). مجدداً، ارتفاع استخوان ناویکولار با استفاده از خط‌کش اندازه‌گیری شد. تفاوت بین ارتفاع استخوان ناویکولار در حالت نشسته در مقابل ایستاده روی یک پا به‌عنوان افتادگی استخوان ناویکولار ثبت شد. شاخص وضعیت پا شامل شش مورد است که برای تعیین کمیت و طبقه‌بندی وضعیت پا استفاده می‌شود (۳۸). شایان‌ذکر است، مقادیر 10 تا 12 در شاخص وضعیت پا به‌عنوان پاهای بیش‌ازحد پرونیشن طبقه‌بندی شدند و برای گروه سالم هم بین $0-6$ بود (۳۸). جدول ۱ ویژگی‌های (سن، وزن، قد، شاخص توده بدنی و افت ناوی) گروه را نشان می‌دهد. فقط افراد کم‌تحرک انتخاب شده برای شرکت در این مطالعه در نظر گرفته شدند. ما همچنین کمتر از 1000 قدم روزانه (ثبت شده با استفاده از برنامه گام‌شمار که روی تلفن همراه شرکت‌کنندگان نصب شده بود) و عدم انجام ورزش منظم (پرسش‌نامه) را که به‌عنوان کمتر از یک جلسه ورزش هفتگی تعریف شده بود، به‌عنوان سبک زندگی کم‌تحرک در نظر گرفتیم (۳۹). معیارهای خروج برای همه گروه‌ها به شرح زیر بود: تمرین هفتگی 2 تا 3 جلسه ورزش بدنی؛ سابقه جراحی اسکلتی عضلانی در تنه و/یا اندام تحتانی، اختلالات قلبی - تنفسی، عصبی - عضلانی یا ارتوپدی (به جز پرونیشن پا برای شرکت‌کنندگان وزن نرمال با پای پرونیت و اضافه‌وزن با پای پرونیت) و اختلاف طول اندام تحتانی بزرگ‌تر از 5 میلی‌متر. همه شرکت‌کنندگان طبق داده‌های کینماتیکی، پاشنه - پنجه راه می‌رفتند. قبل از شرکت، همه افراد در مورد هدف و رویه‌های مطالعه مطلع شدند و رضایت کتبی آگاهانه ارائه دادند. شرکت در مطالعه داوطلبانه بود و شرکت‌کنندگان می‌توانستند در هر مرحله بدون جریمه از مطالعه خارج شوند. محرمانه بودن و ناشناس بودن تمام اطلاعات شخصی در طول فرآیند تحقیق تضمین شد. همه مراحل مطابق با اصول اخلاقی مندرج در بیانیه هلسینکی انجام شد.

جدول ۱. شاخص‌های دموگرافیک آزمودنی‌های ۴ گروه مختلف مورد بررسی (میانگین $\pm$ انحراف معیار)

متغیرها	گروه وزن نرمال با پای نرمال	گروه افراد اضافه‌وزن با پای پرونیت	گروه افراد اضافه‌وزن با پای نرمال	گروه افراد نرمال با پرونیشن پا
سن (سال)	$23/1 \pm 2/1$	$22/1 \pm 4/8$	$25/1 \pm 24/8$	$26/2 \pm 2/5$
جرم (کیلوگرم)	$67/5 \pm 7/14$	$84/8 \pm 14/02^*$	$85/4 \pm 36/79^*$	$69/4 \pm 15/01$
قد (سانتی‌متر)	$171/2 \pm 7/01$	$169/0 \pm 7/78$	$168/3 \pm 1/27$	$170/2 \pm 0/37$
شاخص توده بدنی (کیلوگرم بر مترمربع)	$22/1 \pm 2/04$	$28/2 \pm 4/9^*$	$37/1 \pm 4/9^*$	$21/1 \pm 4/75$
افت ناوی (سانتی‌متر)	$5/0 \pm 3/7$	$12/1 \pm 7/01^*$	$5/1 \pm 9/1$	$11 \pm 1/71^*$

* یادداشت: داده‌ها به‌صورت (میانگین $\pm$ انحراف معیار) گزارش شده‌اند و سطح معناداری با علامت (*) مشخص شده است ($p < 0.05$).

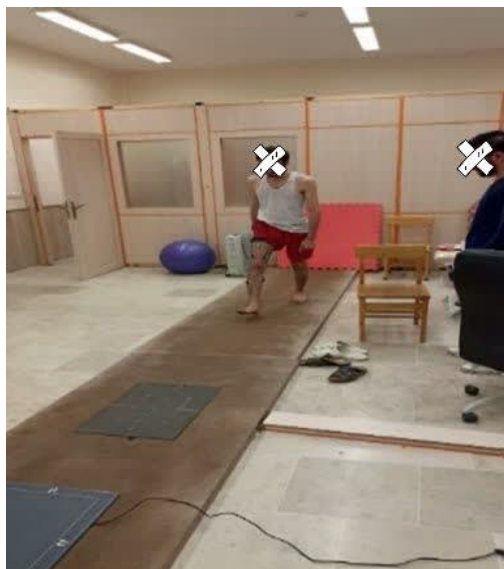
علاوه بر این، پروتکل مطالعه توسط کمیته اخلاق پژوهشی دانشگاه محقق اردبیلی، ایران (IR.UMA.REC.1402.011) بررسی و تأیید شد. اقدامات ایمنی مناسب در طول پروتکل خستگی و رویه‌های آزمایش برای به حداقل رساندن خطر آسیب یا ناراحتی برای شرکت‌کنندگان اجرا شد.

پروتکل آزمایشی

پروتکل آزمایشی با گرم کردن بدن با حرکات کششی و راه رفتن به مدت ۵ دقیقه آغاز شد. سپس، شرکت‌کنندگان با مسیر پیاده‌روی ۱۸ متری روی زمین که یک اسکن پا در نقطه میانی آن تعبیه شده بود، آشنا شدند. تکلیف حرکتی شرکت‌کنندگان این بود که با سرعت ثابت (حدود ۱٫۱ متر بر ثانیه) درحالی که پای غالب آن‌ها در وسط اسکن پا قرار داشت (۴۰)، پابره‌نه در مسیر پیاده‌روی راه بروند (شکل ۱). این سرعت باتوجه به طول مسیر هم در مرحله پیش‌آزمون و هم در مرحله پس‌آزمون با استفاده از یک کرومومتر کنترل می‌شد. چندین آزمایش آشنایی برای شرکت‌کنندگان انجام شد تا سرعت موردنیاز راه رفتن و قرارگیری پا روی اسکن پا را درک کنند. پس از آشنایی، شرکت‌کنندگان چهار آزمایش راه رفتن انجام دادند که در آن‌ها فشار کف پا و نیروهای مرتبط در ده ناحیه از پا ثبت شد. اگر شرکت‌کننده پای غالب خود را به‌طور کامل در محدوده اسکن پا قرار نمی‌داد، الگوی راه رفتن را برای رسیدن به اسکن پا را تغییر می‌داد، یا اگر سرعت راه رفتن بالاتر یا پایین‌تر از ۱۰٪ از سرعت هدف بود، آزمایش‌ها تکرار می‌شدند.

جمع‌آوری و تجزیه و تحلیل داده‌ها

جمع‌آوری داده‌ها با استفاده از دستگاه فورس پلیت برای اندازه‌گیری وزن بدن و یک قد سنج برای ارزیابی قد برای محاسبه شاخص توده بدنی (BMI) انجام شد. از یک تردمیل مجهز به دستگاه ثبت داده‌ها و یک مانیتور ضربان قلب بی‌سیم برای ایجاد و پایش خستگی استفاده شد. از دستگاه فوت اسکن پا (RsScan International، بلژیک، ۵۷۸ میلی‌متر * ۴۱۸ متر * ۱۲ میلی‌متر، ۴۰۹۶ حسگر) با فرکانس ۲۵۳ هرتز برای اندازه‌گیری متغیرهای فشار کف پا و جابجایی مرکز فشار (CoP) در حین راه رفتن استفاده شد.

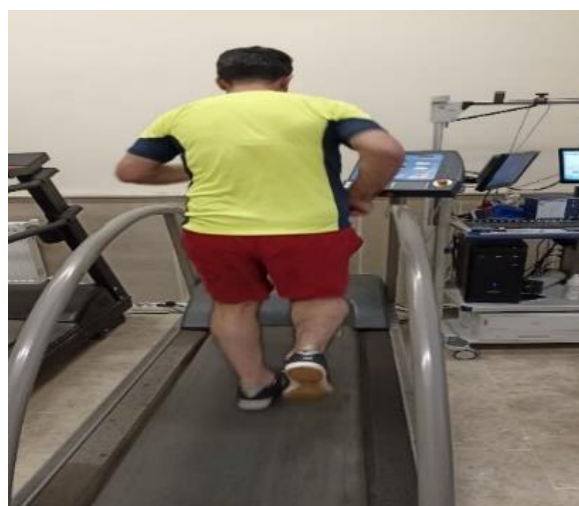


شکل ۱. اجرای پروتکل آزمایشی راه رفتن، قبل و بعد از پروتکل خستگی.

شرکت کنندگان به مدت ۵ ثانیه روی صفحه دستگاه فوت اسکن بی حرکت ایستادند و داده‌های این دوره زمانی ثبت و میانگین‌گیری شد (شکل ۲). نرم افزار دستگاه به طور خودکار پا را در ده ناحیه آناتومیکی شامل پاشنه داخلی، پاشنه خارجی، قسمت میانی پا، متاتارس‌های ۱ تا ۵ (M1-5)، انگشت شست پا (T1) و انگشتان دوم تا پنجم پا (T2-5) اسکن کرد (۴۱). میانگین چهار تکرار در این حالت به عنوان پیش‌آزمون در نظر گرفته شد. همچنین، پس از اجرای خستگی ناشی از دویدن، پس‌آزمون مانند پیش‌آزمون ثبت شد و اثر عامل درون‌گروهی (اثر خستگی) عامل برون‌گروهی (اثر عامل گروه) و اثر متقابل خستگی و گروه برای چهار گروه اندازه‌گیری گردید. متغیرهای بیومکانیکی منتخب مورد بررسی در این تحقیق شامل حداکثر فشار و توزیع نیرو در ۱۰ ناحیه از پا شامل: انگشت اول پا، انگشت دوم تا پنجم پا، متاتارس اول تا پنجم (M1-5)، میانه پا، پاشنه داخلی و پاشنه خارجی است. پروتکل خستگی، یک آزمون خستگی ناشی از دویدن برای هر شرکت کننده با استفاده از تردمیل انجام شد (شکل ۳). قبل از آزمایش، مقیاس



شکل ۲. ایستادن آزمودنی روی دستگاه فوت اسکن جهت اسکن پا



شکل ۳. اجرای پروتکل خستگی ناشی از دویدن

خستگی از ۶ امتیازی (وضعیت عادی) تا ۲۰ امتیازی (خستگی کامل) برای شرکت‌کنندگان توضیح داده شد. سرعت تردمیل در ابتدا روی ۶ کیلومتر در ساعت تنظیم شد و سپس هر دقیقه ۱ کیلومتر در ساعت افزایش یافت. نمرات تلاش درک شده شرکت‌کنندگان در پایان هر مرحله با استفاده از یک مقیاس ۶ تا ۲۰ امتیازی جمع‌آوری شد (۴۲). در هر افزایش سرعت، از شرکت‌کنندگان خواسته شد تا سطح خستگی درک شده خود را گزارش دهند. هنگامی که سطح خستگی یک شرکت‌کننده به ۱۳ رسید، سرعت تردمیل ثابت ماند و شرکت‌کننده با آن سرعت به دویدن ادامه داد. آزمون دو دقیقه پس از گزارش سطح خستگی ۱۷ توسط شرکت‌کننده یا رسیدن فرد به ۸۰٪ حداکثر ضربان قلب خود، خاتمه می‌یافت (۴۳).

تحلیل‌های آماری

توزیع نرمال بودن داده‌ها با استفاده از آزمون شاپیرو-ویلک و برای همگنی واریانس‌ها از آزمون لون استفاده شد. برای تحلیل آماری از تحلیل واریانس دوطرفه با اندازه‌گیری‌های تکراری استفاده شد. در تحلیل آماری از تصحیح بونفرونی برای مقایسه‌های چندگانه استفاده شد. اندازه‌های اثر با استفاده از مربع ETA تخمین زده شدند ($0.06 \leq \text{ETA} < 0.1$: اندازه اثر کوچک (ES)؛ $0.14 < \text{ETA} < 0.06$: اندازه اثر متوسط؛ $0.14 \leq \text{ETA}$: اندازه اثر بزرگ). سطح معنی‌داری در $p < 0.05$ تنظیم شد. همه تحلیل‌ها با استفاده از نرم‌افزار SPSS (نسخه ۲۸) انجام شد.

یافته‌ها

ویژگی‌های جمعیت‌شناختی شرکت‌کنندگان در جدول ۱ گزارش شده است.

یافته‌ها نشان داد که اثر عامل خستگی برای نیروی اعمال شده بر استخوان متاتارس اول ($p < 0.037$)، پاشنه داخلی ($p < 0.001$) و پاشنه خارجی ($p < 0.002$) از نظر آماری معنی‌دار بود. مقایسه‌های زوجی نشان داد که نیروی اعمال شده در ناحیه متاتارس اول پس از خستگی در مقایسه با قبل از خستگی به‌طور قابل‌توجهی کمتر بود. مقایسه‌های زوجی همچنین نشان داد که مقادیر نیرو در نواحی پاشنه داخلی و خارجی پس از خستگی به‌طور قابل‌توجهی بیشتر از قبل از خستگی بود. اثر عامل گروه برای نیروی اعمال شده بر انگشت اول پا ($p < 0.001$)، استخوان متاتارس اول ($p < 0.005$)، استخوان متاتارس دوم ($p < 0.003$)، ناحیه میانی پا ($p < 0.001$)، پاشنه داخلی ($p < 0.010$) و پاشنه خارجی ($p < 0.001$) از نظر آماری معنی‌دار بود.

مقایسه‌های دوبه‌دو نشان داد که مقادیر در ناحیه میانی پا برای گروه دارای اضافه‌وزن با پای پرونیت در مقایسه با سایر گروه‌ها بیشتر بود. مقایسه‌های دوبه‌دو همچنین نشان داد که مقادیر در نواحی متاتارس اول و دوم برای گروه دارای اضافه‌وزن با پای طبیعی در مقایسه با سایر گروه‌ها بیشتر بود (جدول ۲).

بر اساس (جدول ۳) یافته‌ها نشان داد که اثر عامل خستگی برای فشار بر استخوان‌های پاشنه داخلی ($p < 0.011$) و استخوان‌های پاشنه خارجی ($p < 0.013$) از نظر آماری معنی‌دار بود. اثر گروه برای انگشت اول پا ($p < 0.001$)، انگشتان دوم تا پنجم پا ($p < 0.020$)، استخوان متاتارس اول ($p < 0.009$)، استخوان متاتارس دوم ($p < 0.016$)، ناحیه میانی پا ($p < 0.001$)، پاشنه داخلی ($p < 0.020$)، p و پاشنه خارجی ($p < 0.003$)، از نظر آماری معنی‌دار بود. علاوه بر این، یافته‌ها هیچ تفاوت معنی‌داری را برای اثر متقابل خستگی و گروه نشان ندادند ($p < 0.05$).

جدول ۲. میانگین و انحراف معیار نیروهای کفپایی هنگام راه رفتن در بین چهار گروه قبل و بعد از پروتکل خستگی.

متغیر	وزن نرمال - پای پرونیت	وزن نرمال - پا نرمال	اضافه وزن - پای پرونیت	اضافه وزن - پای نرمال	عامل خستگی p (اندازه اثر)	عامل گروه p (اندازه اثر)	گروه * خستگی p (اندازه اثر)
	قبل از خستگی	بعد از خستگی	قبل از خستگی	بعد از خستگی			
Force Toe 1	۲۲۱/۳۳±۶۶/۰۶	۲۲۳/۶۴±۴۲/۳۵	۱۴۵/۱۳±۶۰/۵۱	۱۳۱/۱۳±۴۷/۰۸	۰/۰۰۱ * (۰/۳۴۵)	۰/۰۰۱ * (۰/۳۴۵)	۰/۰۰۱ * (۰/۳۴۵)
Force Toe 2-5	۵۴/۷۴±۳۷/۱۵	۵۰/۱۲±۳۱/۴۴	۵۰/۰۵±۱۹/۲۶	۴۷/۴۷±۲۳/۷۹	۰/۰۰۱ * (۰/۱۳۰)	۰/۰۰۱ * (۰/۱۳۰)	۰/۰۰۱ * (۰/۱۳۰)
Force Metatarsal 1	۱۹۲/۹۷±۸۳/۳۷	۲۰۶/۲۴±۶۵/۰۴	۱۹۸/۴۷±۱۰۴/۴۸	۱۷۸/۱۳±۶۱/۰۴	۰/۰۰۱ * (۰/۲۹۵)	۰/۰۰۱ * (۰/۲۹۵)	۰/۰۰۱ * (۰/۲۹۵)
Force Metatarsal 2	۱۲۵/۴۰±۳۸/۰۹	۱۲۸/۴۶±۴۴/۴۲	۱۸۳/۲۵±۵۷/۸۲	۱۶۶/۸۷±۶۰/۱۰	۰/۰۰۱ * (۰/۳۱۴)	۰/۰۰۱ * (۰/۳۱۴)	۰/۰۰۱ * (۰/۳۱۴)
Force Metatarsal 3	۱۶۰/۲۹±۷۳/۴۴	۱۶۳/۹۷±۶۳/۰۰	۱۸۳/۳۰±۸۰/۹۱	۱۷۱/۴۱±۶۰/۰۰	۰/۰۰۱ * (۰/۱۷۰)	۰/۰۰۱ * (۰/۱۷۰)	۰/۰۰۱ * (۰/۱۷۰)
Force Metatarsal4	۱۰۷/۰۱±۴۵/۷۳	۱۰۴/۸۸±۳۵/۰۶	۱۲۶/۶۲±۷۳/۶۸	۱۱۴/۵۰±۵۰/۲۰	۰/۰۰۵ * (۰/۱۷۴)	۰/۰۰۵ * (۰/۱۷۴)	۰/۰۰۵ * (۰/۱۷۴)
Force Metatarsal5	۵۳/۷۴±۲۵/۶۷	۵۲/۷۷±۲۹/۸۸	۶۸/۵۲±۵۱/۳۶	۶۹/۲۶±۵۵/۲۲	۰/۰۰۳ * (۰/۱۱۷)	۰/۰۰۳ * (۰/۱۱۷)	۰/۰۰۳ * (۰/۱۱۷)
Force MidFoot	۱۵۴/۲۰±۷۳/۵۱	۱۶۵/۹۸±۷۸/۷۰	۱۲۸/۳۱±۶۷/۷۶	۱۲۲/۱۷±۵۵/۲۰	۰/۰۰۱ * (۰/۴۹۶)	۰/۰۰۱ * (۰/۴۹۶)	۰/۰۰۱ * (۰/۴۹۶)
Force HeelMedius	۴۱۱/۰۵±۹۵/۵۳	۴۵۴/۷۹±۱۲۶/۱۷	۴۰۲/۶۹±۱۴۰/۷۷	۴۰۷/۰۳±۱۴۵/۸۴	۰/۰۰۱ * (۰/۲۶۷)	۰/۰۰۱ * (۰/۲۶۷)	۰/۰۰۱ * (۰/۲۶۷)
Force HeelLatral	۲۸۰/۴۴±۶۶/۹۴	۳۲۷/۷۰±۶۸/۴۳	۲۵۹/۷۸±۵۳/۵۱	۲۷۰/۶۷±۶۸/۲۶	۰/۰۰۱ * (۰/۴۱۱)	۰/۰۰۱ * (۰/۴۱۱)	۰/۰۰۱ * (۰/۴۱۱)

یادداشت: داده‌ها به صورت (میانگین ± انحراف معیار) گزارش شده‌اند و سطح معناداری با علامت (*) مشخص شده است ($P < 0.05$).

جدول ۳. میانگین و انحراف معیار متغیرهای فشار کف پای هنگام راه رفتن در بین چهار گروه قبل و بعد از پروتکل خستگی.

متغیر	وزن نرمال - پای پرونیت		وزن نرمال - پای نرمال		اضافه وزن - پای پرونیت		اضافه وزن - پای نرمال		عامل خستگی	عامل گروه	گروه * خستگی
	قبل از خستگی	بعد از خستگی	قبل از خستگی	بعد از خستگی	قبل از خستگی	بعد از خستگی	قبل از خستگی	بعد از خستگی	p (اندازه اثر)	p (اندازه اثر)	p (اندازه اثر)
Pressure Toe1	۱۶/۴۳±۳/۴۹	۱۷/۶۲±۳/۹۰	۱۰/۹۳±۵/۰۹	۱۰/۲۱±۴/۴۳	۲۰/۰۲±۵/۹۶	۲۱/۷۳±۵/۶۰	۱۸/۷۴±۹/۰۳	۱۷/۷۵±۶/۸۱	۰/۷۱۷ (۰/۰۰۴)	۰/۰۰۱ (۰/۳۷۶)	۰/۵۵۳ (۰/۰۵۶)
Force Toe 2-5	۵/۱۰±۱/۵۴	۴/۶۵±۱/۳۲	۴/۵۱±۱/۴۴	۴/۳۵±۱/۹۰	۵/۴۹±۱/۰۲	۶/۱۵±۱/۰۲	۶/۴۵±۲/۵۴	۶/۶۱±۲/۲۵	۰/۸۲۸ (۰/۰۰۱)	۰/۰۲۰ (۰/۲۳۷)	۰/۳۹۰ (۰/۰۷۹)
Pressure Metatarsal 1	۱۰/۶۸±۴/۹۴	۱۰/۹۷±۳/۶۰	۱۱/۱۵±۵/۱۲	۹/۹۶±۳/۲۸	۱۳/۱۰±۳/۶۸	۱۳/۳۱±۴/۴۱	۱۶/۳۲±۵/۲۷	۱۶/۸۵±۶/۱۲	۰/۹۴۷ (۰/۰۰۱)	۰/۰۰۹ (۰/۲۷۱)	۰/۷۸۰ (۰/۰۲۹)
Pressure Metatarsal 2	۱۳/۰۱±۴/۰۸	۱۳/۶۹±۴/۳۶	۲۰/۱۷±۷/۱۴	۱۷/۵۹±۶/۰۳	۱۹/۰۹±۸/۰۱	۱۸/۷۱±۷/۱۴	۲۵/۰۴±۱۱/۹۱	۲۴/۹۶±۱۰/۲۱	۰/۳۰۳ (۰/۰۲۹)	۰/۰۱۶ (۰/۲۴۷)	۰/۲۲۲ (۰/۱۱۴)
Pressure Metatarsal 3	۱۳/۸۰±۴/۰۳	۱۴/۳۵±۴/۱۱	۱۶/۵۹±۷/۰۴	۱۵/۵۷±۵/۸۷	۱۸/۱۶±۶/۵۱	۱۸/۲۹±۵/۶۱	۱۸/۹۲±۷/۶۹	۱۹/۳۲±۶/۲۳	۰/۹۷۶ (۰/۰۰۱)	۰/۲۱۶ (۰/۱۱۵)	۰/۷۷۳ (۰/۰۳۰)
Pressure Metatarsal4	۹/۵۳±۲/۷۳	۹/۲۳±۲/۴۶	۱۱/۵۳±۷/۰۴	۱۰/۲۹±۴/۸۱	۱۲/۱۷±۴/۴۰	۱۱/۱۶±۳/۷۰	۱۴/۶۵±۷/۰۱	۱۵/۰۵±۵/۶۰	۰/۲۹۴ (۰/۰۳۰)	۰/۶۵۸ (۰/۱۶۴)	۰/۰۸۸ (۰/۰۴۳)
Pressure Metatarsal5	۶/۱۳±۲/۵۴	۵/۹۱±۲/۴۹	۷/۶۳±۵/۱۲	۷/۸۶±۵/۸۲	۶/۵۳±۱/۹۶	۵/۶۷±۱/۲۱	۸/۶۶±۴/۶۰	۸/۹۵±۳/۵۶	۰/۷۱۵ (۰/۰۰۴)	۰/۷۱۳ (۰/۱۰۹)	۰/۲۴۱ (۰/۰۳۷)
Pressure MidFoot	۴/۸۳±۱/۱۵	۵/۰۱±۱/۲۱	۵/۰۱±۱/۸۲	۴/۷۵±۱/۳۶	۷/۶۸±۲/۰۴	۸/۳۱±۲/۰۸	۵/۹۸±۱/۵۵	۶/۳۷±۱/۸۰	۰/۱۴۳ (۰/۰۵۹)	۰/۰۰۱ (۰/۴۱۴)	۰/۲۵۲ (۰/۱۰۶)
Pressure HeelMedius	۲۰/۷۲±۵/۳۱	۲۲/۴۸±۶/۲۱	۲۰/۸۵±۷/۱۷	۲۰/۴۶±۷/۵۴	۱۹/۷۱±۲/۲۶	۲۱/۱۶±۲/۲۸	۲۵/۸۱±۵/۵۷	۲۸/۷۵±۵/۵۹	۰/۰۱۱ (۰/۱۶۵)	۰/۰۲۰ (۰/۲۳۷)	۰/۲۰۱ (۰/۱۱۹)
Pressure HeelLateral	۱۵/۴۹±۳/۸۸	۱۷/۷۳±۳/۷۰	۱۴/۷۵±۳/۴۸	۱۵/۱۵±۴/۴۲	۱۶/۳۹±۰/۸۱	۱۷/۴۳±۲/۹۵	۲۰/۴۰±۳/۶۵	۲۱/۳۶±۵/۰۰	۰/۰۱۳ (۰/۱۶۰)	۰/۰۰۳ (۰/۳۱۲)	۰/۵۱۹ (۰/۰۶۰)

یادداشت: داده‌ها به صورت (میانگین ± انحراف معیار) گزارش شده‌اند و سطح معناداری با علامت (*) مشخص شده است ($p < ۰/۰۵$).

بحث

یافته‌ها نشان داد که نیروی اعمال شده در ناحیه متاتارس اول پس از خستگی در مقایسه با قبل از خستگی در حین راه رفتن کمتر بود. این یافته‌ها با نتایج گارسیا - پرز و همکارانش مطابقت دارد که دریافتند دویدن روی تردمیل باعث افزایش تماس با زمین و کاهش فشار اوج در پاشنه، متاتارس و شست پا می‌شود. همچنین باعث کاهش فرکانس گام، کاهش فشار اوج در پاشنه جانبی و شست پا و افزایش بار نسبی در قوس داخلی می‌شود. (۴۴). علاوه بر این، مقادیر نیرو در نواحی پاشنه داخلی و خارجی پس از خستگی به‌طور قابل توجهی بیشتر از قبل از خستگی بود. خستگی عضلانی عضلات پا و مچ پا در حین راه رفتن با تغییراتی در کینماتیک غلتش پا و حرکت مچ پا (۴۵) همراه است که منجر به مکانیک دویدن غیربهینه می‌شود (۴۶). در واقع، مشاهده شده است که خستگی عضلات پا، فشار دینامیکی کف پا را به قسمت داخلی جلوی پا منتقل می‌کند (۴۷) که نشان‌دهنده پرونیشن بیش‌ازحد است. بالین‌حال، نتایج ما نشان داد که خستگی ناشی از دویدن، نیروهای دینامیکی کف پا را به نواحی پاشنه منتقل می‌کند. این نتایج با یافته‌های ویلیام و همکاران و عبداللہی و همکاران که گزارش دادند بار روی پاشنه میانی پس از خستگی افزایش می‌یابد، مطابقت دارد (۴۸، ۴۹).

یافته‌ها نشان داد که مقادیر نیرو در ناحیه میانی پا برای گروه دارای اضافه‌وزن با پای پرونیته در مقایسه با سایر گروه‌ها بیشتر بود. این افراد در مقایسه با افراد با وزن طبیعی، مقادیر افزایش‌یافته‌ای از فشار کف‌پایی، فشار میانی پا و فشار زیر ناحیه سر دومین استخوان متاتارس را نیز نشان دادند (۵۰)؛ بنابراین، تفاوت در توزیع فشار کف پا ممکن است مربوط به پیامدهای مکانیکی تغییرات الگوی حرکتی ناشی از خستگی باشد. در شرایط خستگی، کاهش کنترل عضلانی مفاصل ساق پا ممکن است توانایی مقاومت پویا در برابر چرخش یا وارونگی را مختل کند (۵۱). نویسندگان متوجه شدند که به نظر می‌رسد افراد دارای اضافه‌وزن با پای پرونیته در حین راه رفتن، قسمت میانی پا را صاف می‌کنند. در افراد چاق و دارای اضافه‌وزن، شاید مهم‌تر از ایجاد خستگی عضلانی، این باشد که چگونه گزارش شده است که توده بدنی بالای آن‌ها بر الگوی فشار و نیروی کف پا (۵۲)، استراتژی‌های راه رفتن (۵۳) و وضعیت پا (۵۴) تأثیر می‌گذارد، به‌طوری که آن‌ها در مقایسه با افراد با وزن طبیعی در معرض خطر بیشتری برای ناراحتی و/یا آسیب‌های پا قرار دارند (۱۷). یک مطالعه قبلی نشان داد که افراد دارای اضافه‌وزن در مقایسه با افراد با وزن طبیعی از نظر جنسیت، سن و قد، حساسیت پا و حساسیت مشابهی در نواحی خاصی از پا دارند (۵۵). نتیجه‌گیری‌ها نشان می‌دهد که به دلیل افزایش فشار کف پا و کاهش حساسیت پا، افراد چاق مستعد خطر بیشتر آسیب پا و محدودیت در عملکرد فعالیت هستند (۵۵). مشاهده ما از تفاوت‌های قابل توجه در ویژگی‌های بارگذاری کف پا بین شرکت‌کنندگان چاق و غیر چاق با تحقیقات قبلی که فشارهای اوج بالاتری را در زیر پای افراد چاق شناسایی کرده است، سازگار است (۶). ویلسون و کرنوزک (۵۶) نشان دادند که پس از خستگی، دوندگان تکنیک دویدن و ویژگی‌های بارگذاری سطح کف پا را تغییر می‌دهند. فورچت و همکاران (۴۶) دریافتند که بارگذاری در زیر قوس داخلی در حالت خستگی افزایش می‌یابد. الگوهای افزایش بارگذاری پا در قسمت میانی پا در شرکت‌کنندگان چاق که در این مطالعه مشاهده شد، نشان می‌دهد که در هنگام راه رفتن، تماس زمین در قسمت میانی پا افزایش می‌یابد که می‌تواند به بافت چربی بیش‌ازحد در قوس داخلی نیز مربوط باشد. ویرینگ و همکاران (۵۷) نشان می‌دهند که توده چربی، به‌جای تغییرات در ساختار پا، ممکن است علت افزایش فشار کف پا در ناحیه میانی پا و ظاهر بیرونی کف پای «صاف» در افراد چاق باشد. افزایش توده بدنی به‌عنوان عاملی در افزایش فشار کف پا شناخته شده است و افزایش فشار کف پا با درد پا مرتبط است (۵۸). تغییر در توده بدنی به‌طور قابل توجهی با تغییر در شدت درد پا مرتبط نبود، اما همبستگی مثبت و معنی‌داری بین تغییر در شدت درد پا و تغییر در فشار اوج پاشنه و میانه پا

وجود داشت. این با یافته‌های عنبریان و اسماعیلی که تأثیر خستگی دویدن را بر الگوی غلتیدن دوندگان مبتدی بررسی کردند، مطابقت دارد و نشان‌دهنده افزایش فشار بر قسمت‌های قدامی و داخلی پا است (۵۹). اما این نتایج با یافته‌های بیزیو و مورتو مبنی بر کاهش فشار اوج در نواحی پاشنه و میانه پا مغایرت دارد. بیزیو مورتو این تغییر فشار را به تغییر مرکز فشار به سمت جلوی پا پس از خستگی نسبت می‌دهد (۶۰).

نتایج نشان داد که مقادیر اوج فشار در نواحی متاتارس اول و دوم برای گروه دارای اضافه‌وزن با پای طبیعی در مقایسه با سایر گروه‌ها بیشتر بود. با این حال، هیچ مطالعه‌ای ساختار پا و تغییرات عملکرد آن را در افراد چاق تجزیه و تحلیل نکرده است. پاها در افراد چاق در طول راه‌رفتن طبیعی دائماً در معرض فشارهای تحمل وزن قرار دارند، وزن پاها تقریباً $1/3$ برابر وزن بدن است (۶۱). در افراد چاق، تحمل وزن روی قوس طولی داخلی تقریباً 3 برابر بیشتر از افراد با وزن طبیعی است (۵۷) که می‌تواند باعث تغییرات بیو دینامیکی منفی شود که به‌طور بالقوه ممکن است کیفیت زندگی را کاهش داده و فعالیت بدنی را محدود کند (۶۲). در طی یک مطالعه آینده‌نگر، تیجس و همکاران (۶۳) عوامل خطر مرتبط با درد پاتلوفمورال را بررسی کردند. آن‌ها گزارش دادند که بارگذاری بیشتر روی استخوان‌های کف‌پایی دوم و سوم، عامل مهمی برای درد پاتلوفمورال است (۶۳). در نتیجه، می‌توان گفت که خستگی، دوندگان مبتدی با قوس کم را در معرض خطر درد پاتلوفمورال قرار می‌دهد. علاوه بر این، یکی از علل درد پاتلوفمورال را می‌توان به انحراف اضافی در قسمت عقب پا (۶۴) اشاره کرد. افزایش فشار و بارگذاری ناحیه داخلی جلوی پا، نشانه‌ای از افزایش انحراف قسمت عقب پا (۶۵) است و می‌تواند به‌عنوان یک عامل خطر برای درد پاتلوفمورال در دوندگان مبتدی با قوس کم در نظر گرفته شود. علاوه بر این، کاهش فعالیت بدنی می‌تواند به دلیل محدودیت حرکت منجر به تضعیف قدرت عضلات شود (۶۶). تحمل وزن بیش‌ازحد روی پاها به دلیل چاقی باعث تغییرات ساختاری و عملکردی غیرطبیعی در پا می‌شود. علاوه بر این، منجر به کاهش فعالیت بدنی و تضعیف عضلات می‌شود و منجر به مجموعه‌ای از علائم ناخوشایند می‌شود. این عوارض ممکن است هزینه‌های اجتماعی - اقتصادی مرتبط با چاقی را افزایش دهد و از این‌رو، پیشگیری از چاقی مهم است. ویست و همکاران (۴۷) نشان دادند که پس از خستگی، اوج نیرو، اوج فشار و تکانه در زیر ناحیه متاتارس دوم و سوم و میانی پا افزایش می‌یابد (۴۷). آن‌ها اظهار داشتند که این تغییرات در فرایند غلتش می‌تواند به تشخیص شکستگی استرسی متاتارس در شرایط خستگی کمک کند (۴۷). الیوت و آکلند (۶۷) اظهار داشتند که تغییرات مکانیک پا در حین دویدن حداکثر تأثیر را بر مکانیک دویدن و عملکرد کلی دارد (۶۷). در نتیجه، تغییرات مشاهده شده نشان‌دهنده ازدست‌دادن بیومکانیک بهینه دویدن است. بیومکانیک غیربهینه خود عاملی برای بروز آسیب‌های مرتبط با دویدن است (۶۸). مطالعات اخیر روی کف پای صاف، اهمیت بررسی پاتوفیزیولوژی التهاب فاشیای کف پا و ناهنجاری‌های پا در بزرگسالان زن چاق را نشان داده است (۶۹). چاقی یک عامل خطر برای التهاب فاشیای کف پا است (۷۰) و میانگین ضخامت فاشیای کف پا $4/8$ میلی‌متر در بیماران مبتلا به التهاب فاشیای کف پا گزارش شده است (۷۱). با این حال، میانگین ضخامت فاشیای کف پا در بیماران چاق در این مطالعه $4/2$ میلی‌متر بود که $0/6$ میلی‌متر کمتر از میانگین ضخامت مشاهده شده در بیماران مبتلا به التهاب فاشیای کف پا است. بیماران چاق و دارای اضافه‌وزن میانگین فشار کف‌پایی بالاتری نسبت به افراد با وزن طبیعی دارند (۷۲). مطالعات قبلی افزایش فشار کف پا بر روی پاشنه و استخوان‌های متاتارس دوم و چهارم را در شرکت‌کنندگان مرد با شاخص توده بدنی (BMI) برابر یا بیشتر از 25 کیلوگرم بر مترمربع گزارش کرده‌اند (۵۷). ویلمز و همکاران. (۶۵). در یک مطالعه آینده‌نگر، شواهدی ارائه داد که نشان می‌دهد تمرکز بار روی قسمت‌های داخلی پا در حین دویدن، یک عامل خطر برای پیچ‌خوردگی مچ پا در دانشجویان جوان تربیت‌بدنی دختر و پسر است. همچنین گزارش شده است که انتقال بار به سمت قسمت داخلی پا با خطر آسیب

پیچ خوردگی مچ پا مرتبط است (۷۳). تجمع و تمرکز بار پا در قسمت داخلی پا، خطر پیچ خوردگی مچ پا را افزایش می دهد (۷۴). فشار و ضربه بیشتر در زیر ناحیه متاتارس اول نیز یک عامل خطر برای پیچ خوردگی مچ پا در نظر گرفته می شود (۶۵). نشان داده شده است که افزایش بار متاتارس با شکستگی استرسی متاتارس مرتبط است (۷۵). هرچه بار بیشتری در زیر متاتارس های اول، دوم و سوم در حالت خستگی مشاهده شود، می تواند یک عامل خطر برای شکستگی استرسی متاتارس باشد؛ بنابراین، خستگی ناشی از دویدن، خطر درد کشکک زانو، پیچ خوردگی مچ پا و شکستگی فشاری استخوان های کف پای میانی را در دوندگان با قوس کم افزایش می دهد.

اثر گروه برای حداکثر فشار در انگشت اول پا، انگشتان دوم تا پنجم پا، استخوان متاتارس اول، استخوان متاتارس دوم، ناحیه میانی پا، پاشنه داخلی و نواحی پاشنه جانبی از نظر آماری معنی دار بود. این تغییرات می توانند بار اضافی بر اندام تحتانی را تعیین کنند که از نظر بالینی با درد و ناراحتی بیان می شود (۷۶). به دلیل فشارهای اوج بالاتر در زیر قسمت های جانبی جلوی پا، میانی پا و عقب پا هنگام دویدن در مقایسه با دویدن سریع، دویدن ممکن است باعث مشکلات پا شود (۷۷). حمزوی و اسماعیلی (۲۰۲۱) گزارش دادند که در گروه ضربه پاشنه، پس از خستگی، فشار بر قسمت های داخلی و خارجی پاشنه، متاتارس اول و انگشت شست پا افزایش یافت. همچنین، نسبت نیروی داخلی - خارجی در برخی مراحل کاهش یافت. در گروه ضربه پنجه پا، پس از خستگی، فشار روی متاتارس های اول تا سوم افزایش و فشار روی متاتارس پنجم کاهش یافت؛ نسبت نیروی داخلی - خارجی در مراحل خاصی افزایش یافت. در هر دو گروه، زمان تماس پس از خستگی افزایش یافت. در نهایت، آن ها نتیجه گرفتند که: خستگی اثرات متفاوتی بر توزیع فشار دارد که به نوع ضربه پا بستگی دارد، یعنی استراتژی تطبیقی پا با ضربه متفاوت است (۷۸). افراد دارای اضافه وزن با فعالیت بدنی روزانه کاهش یافته، در مقایسه با افراد دارای وزن طبیعی و افراد دارای اضافه وزن با فعالیت بدنی افزایش یافته، فشارهای کف پای بالاتری را در پنجه پا و میانه پا ایجاد می کنند (۷۹). توزیع دینامیکی فشار کف پا افزایش می یابد و حداکثر آن در پنجه پا (متاتارس دوم تا پنجم) و میانه پا (به ویژه قسمت داخلی) است (۸۰). ارزیابی فشار استاتیک کف پا نشان می دهد که افراد دارای اضافه وزن و چاق، نیروهای بیشتری را در ناحیه بالاتر پا ایجاد می کنند و فشارهای کف پای بیشتری را در مقایسه با افراد دارای وزن طبیعی، به ویژه برای میانه پا و زیر سر متاتارس دوم تا پنجم، ایجاد می کنند (۸۱).

علاوه بر این، یافته ها هیچ تفاوت معناداری را در مورد اثر متقابل خستگی و گروه نشان ندادند؛ بنابراین با توجه به اینکه اثر متغیرهای گروه و خستگی در اغلب متغیرهای پژوهش حاضر معنادار نبوده است، باید این موضوع را مدنظر قرارداد که پاسخ گروه های مختلف پروتکل خستگی تقریباً مشابه بوده است. این مشاهدات با نتایج مطالعه ی مسکیتا و همکاران (۷۶) که نتیجه گرفتند در افراد چاق، توزیع فشار کف پا در حین دویدن تغییر می کند، مغایرت دارد. نتایج این مطالعه نشان داد که هنگام دویدن، افراد چاق در مقایسه با افراد با وزن کمتر، نیروهای بیشتری تولید می کنند. شاخص توده بدنی (BMI) با اوج فشار برای کل پا، قسمت میانی پا و جلوی پا همبستگی مثبت داشت. آن ها سطح تماس بیشتری در زیر تمام نواحی پا داشتند؛ بنابراین، این مطالعه نشان می دهد که چاقی با افزایش فشار کف پا در حین دویدن با سرعت های انتخابی خود سرعت هایی که به عنوان میانگین سرعت راه رفتن / دویدن پنج آزمایش روی زمین در یک مسیر ۱۰ متری شناسایی شده اند (۸۲) مرتبط است. علاوه بر این، این فرضیه را مطرح کرد که افراد چاق در معرض خطر بیشتری برای ابتلا به ناراحتی و درد پا هستند.

اثرات فیزیولوژیکی خستگی بر تحریک و کارایی مکانیسم عضلانی، باعث اختلال در الگوی راه رفتن می شود. هاوس ویرت و همکارانش (۸۳) نشان دادند که هم طول گام و هم فرکانس در پایان یک دویدن طولانی تغییر می کنند. میزراهی و همکاران (۸۴)

نشان دادند که سرعت گام در دویدن روی تردمیل با سرعت مشخص با خستگی طولانی مدت دویدن کاهش می‌یابد. از دیدگاه مکانیکی، تغییرات در الگوی راهرفتن لزوماً باعث ایجاد تغییراتی در نیروی واکنش زمین می‌شود. محدودیت‌هایی در این مطالعه وجود دارد، از جمله تعداد محدود آزمودنی‌ها، عدم ثبت متغیرهای کینماتیکی به صورت سه بعدی و استفاده از راهرفتن پابرهنه، بنابراین نتایج این مطالعه را نمی‌توان به راهرفتن با کفش تعمیم داد؛ بنابراین، پیشنهاد می‌شود که این مسائل در مطالعات آینده بررسی شوند. باتوجه به اینکه متغیرهای وابسته فشار و نیروی کف‌پایی در نواحی مختلف پا بالا بود و احتمال افزایش خطای نوع اول وجود دارد، نتایج پژوهش حاضر را باید با احتیاط تفسیر کرد. علاوه بر این، فعالیت عضلات الکترومیوگرافی ارزیابی نشد. ثبت فعالیت الکترومیوگرافی می‌تواند به تفسیر بهتر سازگاری‌های عصبی - عضلانی کمک کند و توضیح واضح‌تری برای تغییرات مرتبط با فشار ارائه دهد.

نتیجه‌گیری نهایی

نتایج این مطالعه نشان داد که خستگی ناشی از دویدن ممکن است با تغییراتی در الگوی توزیع نیرو و فشار کف پا مرتبط باشد. به نظر می‌رسد که پس از خستگی، بارگذاری از برخی نواحی جلوی پا به پاشنه منتقل می‌شود که احتمالاً می‌تواند مربوط به تغییرات در کنترل عصبی - عضلانی باشد. همچنین، افراد دارای اضافه‌وزن، به‌ویژه افرادی که پاهایشان به داخل متمایل است، مقادیر بیشتری از نیرو و فشار را در برخی نواحی کف پا، به‌ویژه قسمت میانی پا، نشان دادند. این یافته‌ها نشان می‌دهد که اضافه‌وزن و وضعیت ساختاری پا ممکن است بر الگوی بارگذاری کف پا تأثیر بگذارد. با این حال، عدم وجود تعامل معنی‌دار بین خستگی و گروه‌ها نشان داد که پاسخ گروه‌های مختلف به پروتکل خستگی تا حد زیادی مشابه بوده است. برای توضیح دقیق‌تر سازوکارهای مؤثر بر این تغییرات، مطالعات آینده توصیه می‌شود که به‌طور هم‌زمان متغیرهای کینماتیکی و فعالیت عضلانی را بررسی کنند.

تشکر و قدردانی:

مقاله حاضر حاصل پایان‌نامه دانشجوی کارشناسی ارشد حسین فرض الهی دانشگاه محقق اردبیلی است. نویسندگان صمیمانه از شرکت‌کنندگان در این مطالعه به‌خاطر مشارکت داوطلبانه‌شان تشکر می‌کنند.

ملاحظات اخلاقی

بیرونی از اصول اخلاق پژوهش

تمامی اصول اخلاقی در این پژوهش رعایت شده است. کلیه ملاحظات اخلاقی به‌صورت شفاف برای شرکت‌کنندگان توضیح داده شد. تمامی شرکت‌کنندگان به‌صورت داوطلبانه در پژوهش شرکت کردند سپس، رضایت‌نامه آگاهانه کتبی از شرکت‌کنندگان اخذ گردید. بر اساس این اصول، رعایت حقوق آزمودنی‌ها از جمله اختیار در مشارکت یا انصراف از مطالعه در هر مرحله، حفظ محرمانگی اطلاعات شخصی و عدم تحمیل هیچ‌گونه آسیب روانی یا جسمی، مورد تأکید قرار گرفت. این پژوهش مطابق با اصول اخلاقی کمیته‌های پژوهشی ذی‌صلاح و مفاد بیانیه هلسینکی انجام شد این پژوهش به تأیید کمیته اخلاق دانشگاه محقق اردبیلی رسیده است (IR.UMA.REC.1402.011).

حامی مالی

این پژوهش هیچ‌گونه حمایت مالی ویژه‌ای از سازمان‌های دولتی، تجاری یا مؤسسات غیرانتفاعی دریافت نکرده است.

مشارکت نویسندگان

حسین فرض الهی مفهوم‌پردازی، روش‌شناسی، تحلیل، مدیریت اجرایی پروژه، نگارش پیش‌نویس اولیه، بازبینی و ویرایش متن.
امیرعلی جعفرنژادگرو مفهوم‌پردازی، روش‌شناسی، نگارش پیش‌نویس اولیه، نظارت، بازبینی و ویرایش متن.
عارفه مختاری ملک‌آبادی در مفهوم‌پردازی، نگارش پیش‌نویس اولیه، جمع‌آوری داده‌ها مشارکت داشته است.
تمامی نویسندگان نسخه نهایی مقاله را مطالعه و تأیید کردند.

تعارض

نویسندگان اعلام می‌کنند که در ارتباط با انتشار این مقاله هیچ‌گونه تعارض منافی وجود ندارد.

References

1. Catan L, Amaricai E, Onofrei RR, Popoiu CM, Iacob ER, Stanciulescu CM, et al. The impact of overweight and obesity on plantar pressure in children and adolescents: a systematic review. *International Journal of Environmental Research and Public Health*. 2020;17(18):6600. [DOI:10.3390/ijerph17186600]
2. Thomas D, Elliott EJ. Low glycaemic index, or low glycaemic load, diets for diabetes mellitus. *Cochrane Database of Systematic Reviews*. 2009;(1):CD006296. [DOI:10.1002/14651858.CD006296.pub2]
3. Anandacoomarasamy A, Caterson I, Sambrook P, Fransen M, March L. The impact of obesity on the musculoskeletal system. *International Journal of Obesity*. 2008;32(2):211-222. [DOI:10.1038/sj.ijo.0803715]
4. Piri E, Jafarnezhadgero AA. A review of running mechanics in obese or overweight individuals. *Journal of Sport Biomechanics*. 2023;9(1):16-31. [DOI:10.61186/JSportBiomech.9.1.16]
5. Butterworth PA, Landorf KB, Smith S, Menz HB. The association between body mass index and musculoskeletal foot disorders: a systematic review. *Obesity Reviews*. 2012;13(7):630-642. [DOI:10.1111/j.1467-789X.2012.00996.x]
6. Hills A, Hennig E, McDonald M, Bar-Or O. Plantar pressure differences between obese and non-obese adults: a biomechanical analysis. *International Journal of Obesity*. 2001;25(11):1674-1679. [DOI:10.1038/sj.ijo.0801785]
7. Menz HB, Morris ME. Clinical determinants of plantar forces and pressures during walking in older people. *Gait & Posture*. 2006;24(2):229-236. [DOI:10.1016/j.gaitpost.2005.09.002]
8. Jafarnezhadgero A, Fatollahi A, Amirzadeh N, Siahkouhian M, Granacher U. Ground reaction forces and muscle activity while walking on sand versus stable ground in individuals with pronated feet compared with healthy controls. *PLOS ONE*. 2019;14(9):e0223219. [DOI:10.1371/journal.pone.0223219]
9. Koreili Z, Fatahi A, Azarbaijany MA, Sharifnezhad A. Comparison of static balance performance and plantar selected parameters of dominant and non-dominant leg in active adolescent's female with ankle pronation. *The Scientific Journal of Rehabilitation Medicine*. 2023;12(2):306-319. [DOI:10.32598/SJRM.12.2.7]

10. Valizade-Orang A, Siahkoohian M, Jafarnezhadgero A, Bolboli L, Ghorbanlou F. Investigating the effects of long-term use of motion control shoes on the frequency spectrum of ground reaction force during running in the runners with pronated feet. *The Scientific Journal of Rehabilitation Medicine*. 2019;8(4):123-131.
11. Hertling D, Kessler RM. *Management of Common Musculoskeletal Disorders*. Philadelphia: Lippincott Williams & Wilkins; 2014.
12. Telfer S, Bigham J. The influence of population characteristics and measurement system on barefoot plantar pressures: a systematic review and meta-regression analysis. *Gait & Posture*. 2019;67:269-276. [DOI:10.1016/j.gaitpost.2018.10.030]
13. Buldt AK, Allan JJ, Landorf KB, Menz HB. The relationship between foot posture and plantar pressure during walking in adults: a systematic review. *Gait & Posture*. 2018;62:56-67. [DOI:10.1016/j.gaitpost.2018.02.026]
14. Jafarnezhadgero A, Ghorbanloo F, Malekabadi AM, Ghasemi S. The acute effect of knee brace on the electromyography activity of lower limb muscles in individuals with genu valgus during walking. *Medical Journal of Tabriz University of Medical Sciences*. 2021;43(1):116-123. [DOI:10.34172/mj.2021.036]
15. Franco PS, Moro CF, Figueiredo MM, Azevedo RR, Ceccon FG, Carpes FP. Within and between-days repeatability and variability of plantar pressure measurement during walking in children, adults and older adults. *Advances in Rheumatology*. 2018;58:15. [DOI:10.1186/s42358-018-0014-z]
16. Štefan L, Kasović M, Zvonar M. Association between the levels of physical activity and plantar pressure in 6-14-year-old children. *PeerJ*. 2020;8:e8551. [DOI:10.7717/peerj.8551]
17. Walsh TP, Butterworth PA, Urquhart DM, Cicuttini FM, Landorf KB, Wluka AE, et al. Increase in body weight over a two-year period is associated with an increase in midfoot pressure and foot pain. *Journal of Foot and Ankle Research*. 2017;10(1):31. [DOI:10.1186/s13047-017-0214-5]
18. Neri SGR, Gadelha AB, Correia ALM, Pereira JC, de David AC, Lima RM. Obesity is associated with altered plantar pressure distribution in older women. *Journal of Applied Biomechanics*. 2017;33(5):323-329. [DOI:10.1123/jab.2016-0357]
19. Naderi A, Baloochi R, Rostami KD, Fourchet F, Degens H. Obesity and foot muscle strength are associated with high dynamic plantar pressure during running. *The Foot*. 2020;44:101683. [DOI:10.1016/j.foot.2020.101683]
20. Behrens M, Gube M, Chaabene H, Prieske O, Zenon A, Broscheid KC, et al. Fatigue and human performance: an updated framework. *Sports Medicine*. 2023;53(1):7-31. [DOI:10.1007/s40279-022-01748-2]
21. Liu Z, Yang C, Yu J, Zhao X, Wu J, Zhang Y, et al. The effect of muscles fatigue on the knee's kinetics and kinematics characteristics. *Sustainability*. 2023;15(4):3029. [DOI:10.3390/su15043029]
22. Farrokhi Parashkoh M, Amirseyfaddini M, Naderi S. Effects of Fatigue on Lower-Limb Coordination and Its Variability During Running in Semi-Professional Soccer Players. 2026;12(1):2-18. [DOI:10.61882/JSportBiomech.12.1.2]
23. Jones DA. Muscle fatigue due to changes beyond the neuromuscular junction. In: Porter R, Whelan J, editors. *Human Muscle Fatigue: Physiological Mechanisms*. Ciba Foundation Symposium 82. London: Pitman Medical; 1981. p. 178-196. [DOI:10.1002/9780470715420.ch11]

24. Gerlach KE, White SC, Burton HW, Dorn JM, Leddy JJ, Horvath PJ. Kinetic changes with fatigue and relationship to injury in female runners. *Medicine & Science in Sports & Exercise*. 2005;37(4):657-663. [DOI:10.1249/01.MSS.0000158994.29358.71]
25. Dempster J, Dutheil F, Ugbole UC. The prevalence of lower extremity injuries in running and associated risk factors: a systematic review. *Physical Activity and Health*. 2021;5(1):133-145. [DOI:10.5334/paah.109]
26. Clansey AC, Hanlon M, Wallace ES, Lake MJ. Effects of fatigue on running mechanics associated with tibial stress fracture risk. *Medicine & Science in Sports & Exercise*. 2012;44(10):1917-1923. [DOI:10.1249/MSS.0b013e318259480d]
27. Headlee DL, Leonard JL, Hart JM, Ingersoll CD, Hertel J. Fatigue of the plantar intrinsic foot muscles increases navicular drop. *Journal of Electromyography and Kinesiology*. 2008;18(3):420-425. [DOI:10.1016/j.jelekin.2006.11.004]
28. Malekabadi AM, Jafarnezhadgero A. The acute effect of using of texture foot orthoses on ground reaction forces in older adults during walking. *Medical Journal of Tabriz University of Medical Sciences*. 2021;42(6):756-763. [DOI:10.34172/mj.2021.017]
29. Enoka RM, Duchateau J. Muscle fatigue: what, why and how it influences muscle function. *The Journal of Physiology*. 2008;586(1):11-23. [DOI:10.1113/jphysiol.2007.139477]
30. Balakrishnan A, Medikonda J, Namboothiri PK. Analysis of the effect of muscle fatigue on gait characteristics using data acquired by wearable sensors. In: 2020 IEEE International Conference on Distributed Computing, VLSI, Electrical Circuits and Robotics (DISCOVER). IEEE; 2020. p. 137-140. [DOI:10.1109/DISCOVER50404.2020.9278096]
31. Lee CR, Kim MK, Cho MS. The relationship between balance and foot pressure in fatigue of the plantar intrinsic foot muscles of adults with flexible flatfoot. *Journal of Physical Therapy Science*. 2012;24(8):699-701. [DOI:10.1589/jpts.24.699]
32. Bartaguiz E, Dindorf C, Dully J, Becker S, Fröhlich M. Effects of increasing physical load and fatigue on the biomechanics of elite cyclists. *Scientific Journal of Sport and Performance*. 2023;2(1):59-69. [DOI:10.55860/NBMD9425]
33. Saburi L, Piri E. The effect of different types of training interventions on walking and running mechanics in people with foot pronation: a systematic review. *Journal of Sport Biomechanics*. 2026;12(2):242-263. [DOI:10.66224/JSportBiomech.12.2.242]
34. Jiang X, Sárosi J, Bíró I. Characteristics of lower limb running-related injuries in trail runners: a systematic review. *Physical Activity and Health*. 2024;8(1):137-147. [DOI:10.5334/paah.375]
35. Wang H, Frame J, Ozimek E, Leib D, Dugan EL. The effects of load carriage and muscle fatigue on lower-extremity joint mechanics. *Research Quarterly for Exercise and Sport*. 2013;84(3):305-312. [DOI:10.1080/02701367.2013.814097]
36. Brody DM. Techniques in the evaluation and treatment of the injured runner. *Orthopedic Clinics of North America*. 1982;13(3):541-558. [DOI:10.1016/S0030-5898(20)30252-2]
37. McPoil TG, Cornwall MW. Relationship between three static angles of the rearfoot and the pattern of rearfoot motion during walking. *Journal of Orthopaedic & Sports Physical Therapy*. 1996;23(6):370-375. [DOI:10.2519/jospt.1996.23.6.370]
38. Gijon-Nogueron G, Sanchez-Rodriguez R, Lopezosa-Reca E, Cervera-Marin JA, Martinez-Quintana R, Martinez-Nova A. Normal values of the Foot Posture Index in a young adult Spanish population: a cross-sectional study. *Journal of the American Podiatric Medical Association*. 2015;105(1):42-46. [DOI:10.7547/8750-7315-105.1.42]

39. Wang Y, Guo X, Liu L, Xie M, Lam WK. Effects of Tai-chi and running exercises on cardiorespiratory fitness and biomarkers in sedentary middle-aged males: a 24-week supervised training study. *Biology*. 2022;11(3):375. [DOI:10.3390/biology11030375]
40. Jafarnezhadgero AA, Sorkhe E, Oliveira AS. Motion-control shoes help maintaining low loading rate levels during fatiguing running in pronated female runners. *Gait & Posture*. 2019;73:65-70. [DOI:10.1016/j.gaitpost.2019.07.133]
41. Farzaneh Herabad N, Anbarian M, Rahbar S. The effects of foot structures on plantar pressure characteristics in overweight girls aged 10-13 years during walking. *Journal of Paramedical Sciences & Rehabilitation*. 2024;12(4):14-25.
42. Williams N. The Borg rating of perceived exertion (RPE) scale. *Occupational Medicine*. 2017;67(5):404-405. [DOI:10.1093/occmed/kqx063]
43. Camic CL, Hahn CJ, Hendrickson BC, Jagim AR. Validation of the physical working capacity at the fatigue threshold treadmill test. *Kinesiology*. 2017;49(2):146-152. [DOI:10.26582/k.49.2.13]
44. García-Pérez JA, Pérez-Soriano P, Llana S, Martínez-Nova A, Sánchez-Zuriaga D. Effect of overground vs treadmill running on plantar pressure: influence of fatigue. *Gait & Posture*. 2013;38(4):929-933. [DOI:10.1016/j.gaitpost.2013.04.026]
45. Debenham J, Travers M, Gibson W, Campbell A, Allison G. Eccentric fatigue modulates stretch-shortening cycle effectiveness: a possible role in lower limb overuse injuries. *International Journal of Sports Medicine*. 2016;37(1):50-55. [DOI:10.1055/s-0035-1549923]
46. Fourchet F, Kelly L, Horobeanu C, Loepelt H, Taiar R, Millet G. High-intensity running and plantar-flexor fatigability and plantar-pressure distribution in adolescent runners. *Journal of Athletic Training*. 2015;50(2):117-125. [DOI:10.4085/1062-6050-49.3.90]
47. Weist R, Eils E, Rosenbaum D. The influence of muscle fatigue on electromyogram and plantar pressure patterns as an explanation for the incidence of metatarsal stress fractures. *The American Journal of Sports Medicine*. 2004;32(8):1893-1898. [DOI:10.1177/0363546504265191]
48. Willems TM, De Ridder R, Roosen P. The effect of fatigue on plantar pressure distribution during running in view of running injuries. *Journal of Foot and Ankle Research*. 2012;5(Suppl 1):P33. [DOI:10.1186/1757-1146-5-S1-P33]
49. Abdollahi. Studying the effect of fatigue on balance, proprioception, and plantar pressure distribution pattern in girls over 18 years old with scoliosis. Research Ethics Working Group, Shahrood University of Technology; 2025.
50. Naderi A, Zagatto AM, Akbari F, Sakinipoor A. Body composition and lipid profile of regular recreational table tennis participants: a cross-sectional study of older adult men. *Sport Sciences for Health*. 2018;14(2):265-274. [DOI:10.1007/s11332-017-0422-1]
51. Gefen A. Biomechanical analysis of fatigue-related foot injury mechanisms in athletes and recruits during intensive marching. *Medical and Biological Engineering and Computing*. 2002;40(3):302-310. [DOI:10.1007/BF02344212]
52. Yan SH, Zhang K, Tan GQ, Yang J, Liu ZC. Effects of obesity on dynamic plantar pressure distribution in Chinese prepubescent children during walking. *Gait & Posture*. 2013;37(1):37-42. [DOI:10.1016/j.gaitpost.2012.05.018]
53. Butterworth PA, Urquhart DM, Landorf KB, Wluka AE, Cicuttini FM, Menz HB. Foot posture, range of motion and plantar pressure characteristics in obese and non-obese individuals. *Gait & Posture*. 2015;41(2):465-469. [DOI:10.1016/j.gaitpost.2014.11.010]

54. Zhao X, Tsujimoto T, Kim B, Katayama Y, Ogiso K, Takenaka M, et al. Does weight reduction affect foot structure and the strength of the muscles that move the ankle in obese Japanese adults? The Journal of Foot and Ankle Surgery. 2018;57(2):281-284. [DOI:10.1053/j.jfas.2017.09.010]
55. Da Rocha ES, Bratz DTK, Gubert LC, de David A, Carpes FP. Obese children experience higher plantar pressure and lower foot sensitivity than non-obese. Clinical Biomechanics. 2014;29(7):822-827. [DOI:10.1016/j.clinbiomech.2014.05.006]
56. Willson JD, Kernozek TW. Plantar loading and cadence alterations with fatigue. Medicine & Science in Sports & Exercise. 1999;31(12):1828-1833. [DOI:10.1097/00005768-199912000-00020]
57. Wearing SC, Grigg NL, Lau HC, Smeathers JE. Footprint-based estimates of arch structure are confounded by body composition in adults. Journal of Orthopaedic Research. 2012;30(8):1351-1354. [DOI:10.1002/jor.22058]
58. Menz HB, Fotoohabadi MR, Munteanu SE, Zammit GV, Gilheany MF. Plantar pressures and relative lesser metatarsal lengths in older people with and without forefoot pain. Journal of Orthopaedic Research. 2013;31(3):427-433. [DOI:10.1002/jor.22229]
59. Anbarian M, Esmaeili H. The effect of running-induced fatigue on foot roll-over pattern in novice runners. Journal of Paramedical Sciences & Rehabilitation. 2016;5(4):23-32.
60. Bisiaux M, Moretto P. The effects of fatigue on plantar pressure distribution in walking. Gait & Posture. 2008;28(4):693-698. [DOI:10.1016/j.gaitpost.2008.05.009]
61. Jacob H. Forces acting in the forefoot during normal gait: an estimate. Clinical Biomechanics. 2001;16(9):783-792. [DOI:10.1016/S0268-0033(01)00070-5]
62. Garrow AP, Papageorgiou A, Silman AJ, Thomas E, Jayson M, Macfarlane GJ. The grading of hallux valgus: the Manchester Scale. Journal of the American Podiatric Medical Association. 2001;91(2):74-78. [DOI:10.7547/87507315-91-2-74]
63. Thijs Y, De Clercq D, Roosen P, Witvrouw E. Gait-related intrinsic risk factors for patellofemoral pain in novice recreational runners. British Journal of Sports Medicine. 2008;42(6):466-471. [DOI:10.1136/bjsm.2008.046649]
64. Powers CM, Chen PY, Reischl SF, Perry J. Comparison of foot pronation and lower extremity rotation in persons with and without patellofemoral pain. Foot & Ankle International. 2002;23(7):634-640. [DOI:10.1177/107110070202300709]
65. Willems T, Witvrouw E, Delbaere K, De Cock A, De Clercq D. Relationship between gait biomechanics and inversion sprains: a prospective study of risk factors. Gait & Posture. 2005;21(4):379-387. [DOI:10.1016/j.gaitpost.2004.04.002]
66. Redmond AC, Crosbie J, Ouvrier RA. Development and validation of a novel rating system for scoring standing foot posture: the Foot Posture Index. Clinical Biomechanics. 2006;21(1):89-98. [DOI:10.1016/j.clinbiomech.2005.08.002]
67. Elliot B, Ackland T. Biomechanical effects of fatigue on 10,000 meter running technique. Research Quarterly for Exercise and Sport. 1981;52(2):160-166. [DOI:10.1080/02701367.1981.10607853]
68. Hreljac A. Etiology, prevention, and early intervention of overuse injuries in runners: a biomechanical perspective. Physical Medicine and Rehabilitation Clinics of North America. 2005;16(3):651-667. [DOI:10.1016/j.pmr.2005.02.002]

69. Menz HB, Munteanu SE. Validity of 3 clinical techniques for the measurement of static foot posture in older people. *Journal of Orthopaedic & Sports Physical Therapy*. 2005;35(8):479-486. [DOI:10.2519/jospt.2005.35.8.479]
70. Riddle DL, Pulisic M, Pidcoe P, Johnson RE. Risk factors for plantar fasciitis: a matched case-control study. *The Journal of Bone and Joint Surgery. American Volume*. 2003;85(5):872-877. [DOI:10.2106/00004623-200305000-00015]
71. Karabay N, Toros T, Hurel C. Ultrasonographic evaluation in plantar fasciitis. *The Journal of Foot and Ankle Surgery*. 2007;46(6):442-446. [DOI:10.1053/j.jfas.2007.08.006]
72. Mickel KJ, Steele JR, Munro BJ. Does excess mass affect plantar pressure in young children? *International Journal of Pediatric Obesity*. 2006;1(3):183-188. [DOI:10.1080/17477160600881734]
73. Rice H, Nunns M, House C, Fallowfield J, Allsopp A, Dixon S. High medial plantar pressures during barefoot running are associated with increased risk of ankle inversion injury in Royal Marine recruits. *Gait & Posture*. 2013;38(4):614-618. [DOI:10.1016/j.gaitpost.2013.02.001]
74. Mei-Dan O, Kahn G, Zeev A, Rubin A, Constantini N, Even A, et al. The medial longitudinal arch as a possible risk factor for ankle sprains: a prospective study in 83 female infantry recruits. *Foot & Ankle International*. 2005;26(2):180-183. [DOI:10.1177/107110070502600211]
75. Nagel A, Fernholz F, Kibele C, Rosenbaum D. Long distance running increases plantar pressures beneath the metatarsal heads: a barefoot walking investigation of 200 marathon runners. *Gait & Posture*. 2008;27(1):152-155. [DOI:10.1016/j.gaitpost.2006.12.012]
76. Mesquita PR, Neri SGR, Lima RM, Carpes FP, de David AC. Childhood obesity is associated with altered plantar pressure distribution during running. *Gait & Posture*. 2018;62:202-205. [DOI:10.1016/j.gaitpost.2018.03.025]
77. Song-Hua Y, Lu W, Kuan Z. Effects of different movement modes on plantar pressure distribution patterns in obese and non-obese Chinese children. *Gait & Posture*. 2017;57:28-34. [DOI:10.1016/j.gaitpost.2017.05.001]
78. Hamzavi B, Esmaeili H. Effects of running-induced fatigue on plantar pressure distribution in runners with different strike types. *Gait & Posture*. 2021;88:132-137. [DOI:10.1016/j.gaitpost.2021.05.018]
79. Riddiford-Harland DL, Steele JR, Cliff DP, Okely AD, Morgan PJ, Jones RA, et al. Lower activity levels are related to higher plantar pressures in overweight children. *Medicine & Science in Sports & Exercise*. 2015;47(2):357-362. [DOI:10.1249/MSS.0000000000000403]
80. Mueller S, Carlsohn A, Mueller J, Baur H, Mayer F. Influence of obesity on foot loading characteristics in gait for children aged 1 to 12 years. *PLOS ONE*. 2016;11(2):e0149924. [DOI:10.1371/journal.pone.0149924]
81. Pau M, Galli M, Crivellini M, Albertini G. Relationship between obesity and plantar pressure distribution in youths with Down syndrome. *American Journal of Physical Medicine & Rehabilitation*. 2013;92(10):889-897. [DOI:10.1097/PHM.0b013e3182922ff1]
82. Steinberg N, Rubinstein M, Nemet D, Ayalon M, Zeev A, Pantanowitz M, et al. Effects of a program for improving biomechanical characteristics during walking and running in children who are obese. *Pediatric Physical Therapy*. 2017;29(4):330-340. [DOI:10.1097/PEP.0000000000000440]
83. Hausswirth C, Bigard A, Guezennec C. Relationships between running mechanics and energy cost of running at the end of a triathlon and a marathon. *International Journal of Sports Medicine*. 1997;18(5):330-339. [DOI:10.1055/s-2007-972642]

84. Mizrahi J, Verbitsky O, Isakov E, Daily D. Effect of fatigue on leg kinematics and impact acceleration in long distance running. Human Movement Science. 2000;19(2):139-151. [DOI:10.1016/S0167-9457(00)00013-0]