Journal of
Sport Biomechanics

Autumn 2025. Vol 11. Issue 3

Research Paper

The Effects of Training at Different Uphill Gradients on the Kinematic Characteristics of Middle-Distance Runners

***Yehualaw Alemu[1], Tefera Tadesse[2], Zerihun Birhanu[1]**

1. Sport Academy, Bahir Dar University, Bahir Dar, Ethiopia.
2. Educational Development and Quality Center, University of Global Health Equity, Kigali, Rwanda.

Use your device to scan and read the article online

Citation: Alemu Y, Tadesse T, Birhanu Z. The Effects of Training at Different Uphill Gradients on the Kinematic Characteristics of Middle-Distance Runners. Journal of Sport Biomechanics.2025;11(3):208-234. https://doi.org/10.61186/JSportBiomech.11.3.208

https://doi.org/10.61186/JSportBiomech.11.3.208

Article Info:

Received: 13 June 2025
Accepted: 28 June 2025
Available Online: 28 June 2025

Keywords:

Uphill training, Kinematics, Maximal velocity, Middle-distance running, Hill gradients

ABSTRACT

Objective This study aimed to investigate the effects of three different uphill training gradients—7.6%, 5.1%, and 2.5%—on selected kinematic characteristics of middle-distance runners.

Methods Forty middle-distance runners performed a 30-meter maximal sprint test to assess their kinematic characteristics. Participants were randomly assigned to one of three uphill training groups or a control group. Pre- and post-training assessments were conducted to evaluate the effects of 8 weeks of uphill training on maximal velocity (Vmax), step rate (SR), step length (SL), contact time (CT), and flight time (FT).

Results The steeper hill group (STHG) showed significant improvements in Vmax (from 7.47 ± 0.75 to 8.74 ± 0.55 m/s, $p < .001$), SR (from 4.13 ± 0.41 to 5.08 ± 0.51 steps/s, $p < .001$), and SL (from 1.77 ± 0.10 to 1.80 ± 0.08 m, $p < .001$). The intermediate hill group (IHG) also demonstrated increases in Vmax (7.34 ± 1.06 to 7.93 ± 0.79 m/s, $p < .001$), SR (4.09 ± 0.53 to 4.70 ± 0.39 steps/s, $p < .001$), and SL (1.75 ± 0.08 to 1.78 ± 0.08 m, $p < .001$). The shallow hill group (SHG) showed a smaller improvement in Vmax (7.31 ± 0.50 to 7.65 ± 0.55 m/s, $p < .001$), with no significant changes in the other variables.

Conclusion These findings suggest that uphill training, particularly at steeper gradients, can significantly enhance key kinematic characteristics in middle-distance runners, with steeper inclines yielding the most substantial benefits.

*** *Corresponding Author:***
Yehualaw Alemu
Address: Sport Academy, Bahir Dar University, Bahir Dar, Ethiopia.
Tel: +251 (912) 162055
E-mail: yehualaw@gmail.com or bdu1402098@bdu.edu.et

1. Introduction

Performance in middle-distance running is unique and characterized by intermediate factors of biomechanics (1, 2) and physiology (3, 4), with the challenge being to run at high velocities while still maintaining economical movement (5). Understanding the biomechanical principles, including stride length, stride frequency, flight time, and ground contact time, can make a significant difference in middle-distance running performance (6, 7). Running involves a cycle of flight and support phases, with efficient running typically consisting of about 65% flight and 35% support (8). Key kinematic factors such as step length, contact time, flight time, and step frequency regulate this cycle (9, 10). Optimal stride length and frequency help minimize energy use while maximizing speed. Efficient biomechanics, including shorter ground contact and longer flight times, enhance running economy and performance (11, 12).

Swinnen et al. (13) indicated that runners tend to adopt a stride frequency that minimizes energy consumption, with higher frequencies leading to reduced ground contact time and increased hip power during leg swing. Moreover, a systematic review by Van Hooren, Jukic (14) indicated that a higher cadence correlates with lower oxygen costs, suggesting that optimizing stride frequency can enhance running economy and performance. Experienced runners naturally select stride lengths that minimize oxygen uptake, demonstrating a capacity for self-optimization (15). In addition, differences in ground contact time significantly affect running economy, with shorter contact times linked to better performance, as seen in comparisons between North African and European runners (16).

Study reported that high-intensity interval training (HIIT) is a powerful method for enhancing muscle mass, strength, and aerobic power (17), all of which contribute to improvements in the biomechanical aspects of running performance. Uphill running serves as an effective form of resistance training because it closely mimics running biomechanics while offering sport-specific strength benefits. This aligns with findings from a study that highlighted how progressive resistance training can enhance performance and reduce injury risk across various sports disciplines (18).

Several studies have examined the acute effects of uphill running on the kinematic characteristics of a runner (12, 19-23). Forinstance, a study found a 4% increase in step frequency and a 4% decrease in stride length as incline increased from 0% to 7% (24). A similar study reported that running speed and step length decreased by 5.2% during uphill running compared to downhill running and were 3.0% slower compared to running on level surface (21). Another research also reported that, in comparison with running on flat ground, uphill running is characterized by a higher step frequency, more internal mechanical work, shorter swing/aerial phase duration, and a greater duty factor/contact time (25). This is because, to increase the body's potential energy during uphill running, lower limb muscles must perform a greater total mechanical effort than they do in level running. Uphill running also significantly raises metabolic costs, with a reported 53% increase in energy expenditure at steeper inclines (24). Moreover, shorter flight time and longer groung contact time during the stride cycle were characteristics of the uphill running (26), while higher step frequency (SF) is associated with steeper slopes during uphill running (27, 28). Steeper slopes (e.g., +20%) require greater muscle strength and energy expenditure, influencing running economy differently than level or shallow slopes (29). Transitioning from level to uphill running alters biomechanics, enhancing joint angles and range of motion, which can improve overall running mechanics.

Incorporating uphill running into training regimens can enhance performance by improving metabolic efficiency and kinematic adaptations (30). To enhance level running performance, coaches often incorporate uphill running into their training regimens to strengthen lower limb muscles. Research indicates that running on incline surface significantly increases muscle activation, particularly in the rectus femoris, vastus medialis, biceps femoris, and gastrocnemius, compared to level running (31). He found that uphill running leads to a 16.54% increase in lower limb muscle activation compared to level running. This muscle engagement is crucial for developing strength and endurance, which are essential for improved running efficiency. Previous study reported that MRS, step rate, contact time, and step time were improved significantly higher in the combined uphill-downhill group performed at ±3o incline after 8weeks of training by 4.3%, 4.3%, −5.1%, and −3.9% respectively (32) than in horizontal running relatively smaller improvements 1.7%, 1.2%, 1.7%, and 1.2% respectively. However, a similar study reported a 4.8% improved running speed from a 6-week combined uphill-downhill running on ±3o slope compared to horizontal running. However, no significant change observed in step rate and ground contact time (33). An other study reported that combined uphill-downhill training group increased their MRS by 3.7%, stride rate

by 3.1% at ($p < 0.05$), after training 6-weeks of training while no change observed in contact time and flight time as it compared to the horizontal training group (34).

While the focus of most of the previous studies was on the acute effects of uphill running on different physiological and biomechanical characteristics of athletes (10, 12, 21, 22, 24, 28, 29, 35-38), the chronic effects of training on sloped surface on the kinematics of characterstics of athletes in horizontal running performance are unclear (21). Although some recent long-term studies have explored the combined effects of uphill and downhill training compared to level or downhill running, there is still a notable gap in the literature regarding the isolated effects of uphill training and the relative effects of different hill gradients on running kinematics. This is important because uphill running imposes distinct biomechanical and muscular demands compared to flat or downhill running. Understanding how various uphill gradients influence long-term kinematic adaptations could provide valuable insights for coaches and athletes, enabling more targeted training strategies and performance improvements.Therefore, the present study aims to investigate the chronic effects of three distinct uphill gradients on the kinematic characteristics of middle-distance runners and to identify which gradient is most effective in enhancing these characteristics. Recent existing long-term studies were focused on comparing the effects of combined uphill-downhill training to horizontal and downhill running on different performance parameters. Still a gap in literature covering the relative effects of different uphill gradients and the separate effects of uphill training on the kinematic characteristics of athletes as uphill running demands a different effort and biomechanical behavior than running on a flat and downhills. Thus, understanding the long-term effects on kinematic parameters at several gradients may still important and might assist coaches and athletes in the training process and performance improvement by providing detailed feedback. Therefore, the present study aimed to determine the chronic effects of three different uphill gradients on the kinematic characteristics of middle-distance runners and to identify the most effective uphill gradient in improving those characteristics.

2. Methods

2.1. Participants

A total of forty moderately trained middle-distance runners (24 males and 16 females), with age (M-18.54±1.02, F-17.44 ± 1.09 years [mean ± SD], with 2.11 ± 0.74 years of structured training experience took part in the study. Written informed consent was obtained before the intervention, and the study was approved by the Ethics Committee of Bahir Dar University, Bahir Dar, Ethiopia (Protocol No. IRERC 05/2024). All procedures were conducted in accordance with the Declaration of Helsinki on the treatment of human subjects. Participants were told about the study's procedures, methods, benefits, and risks. After that, they read and signed the consent form to participate in the study. Participants were recruited based on predefined inclusion criteria. The inclusion criteria were healthy middle-distance runners from Bahirdar University Sports Academy who had no muscular, neurological, or tendon injuries and weren't taking any medication, athletes having at least 6-months of trainin experiance at regional or natonal level. The exclusion criteria were athletes who had less than 6 months of training, those with a lower-body injury in the last 3 months, and anyone taking medication. Eligible athletes were informed about the study through announcements at training sessions and were invited to participate voluntarily. Written informed consent was obtained from all participants prior to enrollment. Participants were randomly assigned to one of three training groups or the control group. Each group consisted of 10 participants (steep gradient group, 7.6%; moderate gradient group, 5.1%; shallow hill group, 2.5%; and control group). The inclusion of specific gradient levels is based on the premise that different gradients have different levels of intensity depending on the categories specified (39, 40). This helps to analyze how each intensity level affects kinematic characteristics, such as step rate (SR), step length (SL), contact time (CT), and flight time (FT). This variety allows researchers to determine which gradient provides the best balance between training load and performance improvement.

2.2. Study design

The study adopted a pre-post parallel group experimental design, with measurements conducted before and after the 8-week intervention period. The participants were randomly assigned to one of the three training groups or the control group. Each group included 10 participants (steeper hill group, 7.6%; intermediate hill group, 5.1%; shallow hill group, 2.5%; and control group). The reason behind including specific gradient levels is because different hill gradients provide varying levels of intensity based on the given

categories (41), which helps in examining how each intensity level affects kinematic measures. This variation allows researchers to determine which gradient offers the optimal balance between training load and kinematic improvements.

The study adhered to the CONSORT guidelines for improving the quality and clarity of reporting of experimental studies (42), and registered with pactr.samrc.ac.za (Registration Number NCT01234567) on 29/11/2024. We determined the appropriate sample size for our study using G*Power (43). Based on the results of a previous study (34). We assumed a normal distribution for all responses within a group and estimated the required sample size to be 36 participants to determine an effect size of 0.62 between the pre- and post-experimental groups with a power of 80% at a significance level of 0.05. In order to account for possible drop-outs, an additional 10% allowance was made for sample recruitment, and the required sample size was increased to 40.

To minimize potential bias, trained personnel were utilized to create the random allocation, enroll participants, and assign them to interventions. Given the small sample size and the simplicity of execution, a straight-forward random lottery approach was employed to assign participants across four study groups (each consisting of ten participants): steeper hill group (STHG), intermediate hill group (IHG), shallow hill group (SHG), and control group (CG) in a 1:1:1:1 ratio as illustrated in Fig. 1. Allocation concealment was guaranteed through the use of sealed envelopes. To reduce bias, blinding was implemented when possible. The outcome assessors remained unaware of the group assignments.

Participants underwent baseline assessments of the kinematic parameters from a 30m maximal sprint test prior to the intervention. The same research team oversaw all training and testing activities.

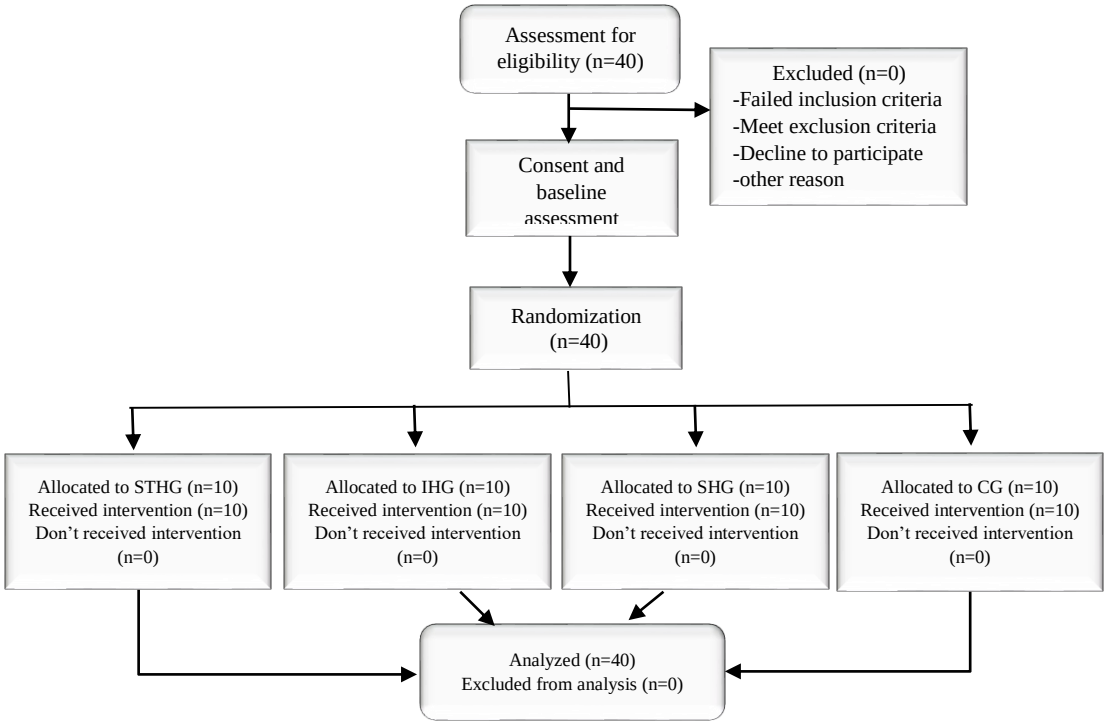


Fig. 1. Flow diagram of the phase of a parallel randomized trial of four groups (enrolment, allocation, intervention, follow-up, and data analysis)

2.3. Procedures

To assess the effects of uphill training on the spatial-temporal variables, a 30-m horizontal maximal sprint running test was used to measure stride rate (SR), step length (SL), contact time (CT), and flight time (FT). After completing a standard warm-up period of 10–15 min followed by dynamic stretching (44), a standard

flying 30's consisting of a 30 m acceleration zone to enable the runner to reach their maximum speed and a 30 m maximal velocity zone to reach maximal sprinting speed on a 400 m oval outdoor track at the university was used to test kinematic characteristics of runners, as in previous studies (45, 46). This is because, while middle-distance running primarily emphasizes aerobic capacity and endurance, short sprint tests such as the 30-meter sprint are commonly used in sports science to assess acceleration, neuromuscular power, and anaerobic performance, which are also relevant to middle-distance performance particularly during race starts, tactical surges, and final sprints. These elements can significantly influence race outcomes in competitive settings. Moreover, the 30-meter sprint test provides a standardized, reliable, and easily replicable measure of explosive speed and lower-limb power, which complements other physiological assessments. It was not intended to represent the entirety of middle-distance performance but rather to provide insight into specific physical qualities that contribute to overall athletic capability. The participants completed three sprint runs over a distance of 30 meters, beginning from a standing start and taking a recovery period of 6 to 8 minutes between each attempt. The fastest time was measured to two decimal places. The timing commenced when the athlete's torso crossed the starting cone at 30 meters and concluded at the 60-meter cone marker (47, 48).

Testing was conducted on the same day for all participants. The trials with the highest MRS values were chosen for further analysis of kinematic characteristics. A Canon SX70 HS camera, capable of recording in 1080p resolution at a sampling rate of 240 Hz, was utilized to capture a 30-meter sprint and the associated kinematic characteristics. The camera was positioned on a tripod at a height of 1.5 meters, located 7.5 meters from the side of the track, perpendicular to the direction of movement at the participant's sagittal plane. The recorded footage was analyzed later using Kinovea 0.9.5 motion analysis software. The kinematic characteristics examined included contact time (ms), flight time (ms), step length (m), and step frequency (Hz).

The step rate was determined by counting the number of steps taken in a 30m sprint run from video data using slow motion analysis and divided by the time used to complete the distance. In addition, step length was determined by dividing the running distance by the number of steps taken to complete the distance. The contact time (CT) and flight time (FT) were calculated by counting the frames in contact and flight on the video data, then dividing by the sampling rate, 240 (1 frame = 240 Hz ≈ 0.0042s). A full stride (2 consecutive steps of right and left foot) was used to analyze contact time. Although there was no significant difference in contact time between the right and left foot, the right foot was used throughout the analysis in contact time. The CT was defined and calculated as the time between initial contact with the ground and the last frame of contact before toe-off. The FT was defined and calculated as the time between toe-off and subsequent initial contact of the contralateral foot. Initial contact and toe-off were visually detected.

Training Protocol: Prior to the study, all participants consistently engaged in running training at varying intensities, averaging four times a week and covering about 21.748 miles weekly. During the intervention, researchers added a hill training program to their existing routine and replaced their strength training with uphill workouts on a Cybex 530T pro plus USA motorized treadmill. The intervention group completed two uphill training sessions each week for eight weeks while still maintaining their regular running training during the rest days from uphill sessions. In contrast, the control group adhered to their usual training regimen. Although the incline varied across groups, training intensity was standardized by controlling for running speed relative to each athlete's maximal sprinting capacity and by monitoring heart rate responses. This approach ensured that all participants trained at a comparable relative intensity, regardless of incline. Additionally, rest intervals were standardized to allow for consistent recovery across groups. The number of sets or and intervals were gradually increased over the course of the training program to systematically increase training load while allowing for adaptation and recovery. The steep uphill group involved 3-4 sets of 6-10 intervals lasting 30-90 seconds on a treadmill inclined at 7.6%, with participants running at 85-100% of their maximum heart rate and resting for 4-6 minutes between sets and 2-4 minutes between intervals. The intermediate uphill sessions included 2 sets of 6-10 intervals lasting 1-2 minutes on a treadmill set to a 5.1% incline, also at 85-100% HR max, with similar rest durations. The shallow uphill sessions consisted of 6-10 intervals lasting 2-3 minutes on a treadmill at a 2.5% incline, again at 85-100% HR max, with 2-4 minutes of rest between intervals, as detailed in Table 1. Participants in the control group continued with their standard weekly training programs.

2.4. Statistical analysis

Statistical analysis was conducted using IBM SPSS Statistics 27 (IBM Corporation). The results for the outcome variables are presented as mean ± standard deviation (SD). A two-way mixed (time [pre-post] X

group) repeated-measures analysis of variance (ANOVA) was employed to determine if there were significant differences between pre-training and post-training tests among the training groups and any interaction effects for each variable. If significant main effects or interactions were found, post hoc Tukey's HSD test with Bonferroni correction was applied for all pairwise comparisons. The normality of the data was assessed using the Shapiro-Wilk W test, and homogeneity of variance was evaluated with Levene's test. All dependent variables (MRS, SR, SL, FT, and CT) were analyzed at a significance level of $p < 0.05$. The interpretation of data included the magnitude of the mean ± SD of the mean difference (MΔ), 95% confidence interval (95% CI), and p-values (50).

3. Results

Table 2 presents a summary of the baseline descriptive data and the adjusted absolute changes in the kinematic characteristics of participants throughout the study. The statistical analysis of the pre-training assessments revealed no statistically significant differences between groups across all variables. This demonstrates that groups that were similar at baseline were created by the randomization process, which provides a solid foundation for comparing the three uphill groups to the control group.

A two-way mixed repeated measure ANOVA revealed a significant main effect of time on Vmax ($F(1, 36) = 173.68$, $p < 0.001$, $\eta_p^2 = 0.82$), indicating that Vmax significantly changed over the training period, as indicated in Table 3. Average Vmax were significantly higher on post-test result (M = 7.87 ± 0.86 m·s^{-1}) than pre-test result (M = 7.32 ± 0.77 m·s^{-1}). Additionally, there is a significant main effect of hill gradient level on Vmax ($F(3, 36) = 2.87$, $p = 0.049$, $\eta_p^2 = 0.20$), suggesting differences in Vmax between the different hill gradients as indicated in Table 3.

Table 1. 8-week uphill training protocols for groups (STHG, IHG, SHG, and CG)

	SHG (n=10)	IHG (n=10)	STHG (n=10)	CG (n=10)
Gradient	2.5%	5.1%	7.6%	NA
HRmax	85-100%	85-100%	85-100%	NA
Recovery b/n set	4-6min	4-6min	4-6min	NA
Recovery b/n rep.	2-4min	2-4min	2-4min	NA
Progression				
Week 1	6x2 min	2x6x60sec	4x6x30 sec	NA
Week 2	8x2 min	2x8x60 sec	4x8x30 sec	NA
Week 3	10x2 min	2x10x60 sec	4x10x30 sec	NA
Week 4	6x3 min	2x6x90 sec	4x6x45 sec	NA
Week 5	8x3 min	2x8x90 sec	4x8x45 sec	NA
Week 6	10x3min	2x10x90sec	3x10x60sec	NA
Week 7	6x4 min	2x6x2min	3x5x90 sec	NA
Week 8	8x4 min	2x8x2 min	3x7x90 **sec**	NA

NA: not applicable; HRmax: maximal heart rate; STHG: steeper hill group; IHG: intermediate hill group; SHG: shallow hill group; CG: control group. Note: the number of sets or and number of reps increased with number of weeks for progressive overload while maintaining recovery and adaptations. Adapted from a previous study (49).

Table 2. Mean ± SD of demographic and outcome variables for participants at baseline and follow-up (n=40)

Variables	STHG (n=10)		IHG (n=10)		SHG (n=10)		CG (n=10)	
	Baseline	Follow-Up	Baseline	Follow-Up	Baseline	Follow-Up	Baseline	Follow-Up
Age (years)	18.5 ± 0.97		18.6 ± 1.07		18.2 ± 0.63		17.1 ± 1.37	
Height (m)	1.71 ± 0.04		1.68 ± 0.05		1.71 ± 0.04		1.68 ± 0.05	
Weight (kg)	54.70 ± 3.83		54.10 ± 4.01		54.70 ± 3.83		54.10 ± 4.01	
BMI (kg/m^2)	18.66 ± 1.04		18.99 ± 1.50		18.72 ± 0.98		18.99 ± 1.50	
Vmax (m/s^{-1})	7.46 ± 0.75	8.74 ± 0.55†	7.34 ± 1.06	7.93 ± 0.79†	7.31 ± 0.50	7.65 ± 0.55†	7.17 ± 0.76	7.17 ± 0.76
SR (Hz)	4.13 ± 0.41	5.08 ± 0.51†	4.09 ± 0.53	4.70 ± 0.39†	4.11 ± 0.36	4.21 ± 0.38	4.09 ± 0.36	4.07 ± 0.45
SL (m)	1.74 ± 0.10	1.80 ± 0.08†	1.75 ± 0.08	1.78 ± 0.08†	1.69 ± 0.09	1.70 ± 0.09	1.70 ± 0.08	1.70 ± 0.07
CT (ms)	122 ± 3.33	122 ± 3.23	122 ± 4.33	121 ± 4.17	121 ± 4.42	120 ± 4.09	122 ± 4.20	123 ± 3.52
FT (ms)	119 ± 4.45	120 ± 3.20	118 ± 3.30	119 ± 2.83	117 ± 2.99	118 ± 2.10	118 ± 2.71	118 ± 3.21

† Significantly different from pre-test at ($P < 0.05$) as determined by two-way repeated measure ANOVA and Tuky's HSD post hoc test, BMI: body mass index, Vmax: maximal running velocity, SR: step rate, SL: step length, CT: contact time, FT: flight time, SD: standard deviation, STHG: steeper hill group, IHG: intermediate hill group, SHG: Shallow hill group and CG: control group.

Table 3. Main effects of time, hill gradient level and interaction effects of the intervention on outcome variable

Variables	Within Subject Effects			Between subject effects				Interaction effect Time * Hill Gradient		
	F	Sig.	η_p^2	Mean difference	F	Sig.	η_p^2	F	Sig.	η_p^2
Vmax (m/s^{-1})	173.68	.001	0.82	0.55	2.87	.049	0.20	4.297	.011	0.264
SR (HZ)	29.771	.001	0.45	0.157	3.18	.035	0.21	7.672	.001	0.390
SL (m)	39.09	.001	0.52	0.02	2.080	.120	0.148	4.02	.001	0.52
CT (ms)	2.62	.114	0.07	- 0.30	1.346	.792	0.028	1.70	.184	0.12
FT (ms)	3.11	.087	0.079	0.35	0.731	.540	0.057	0.063	.98	0.005

Vmax: maximal running velocity, TT: time trial performance, SE: strength endurance, CI: confidence interval.

Vmax were significantly higher on STHG (M = 8.74 ± 0.55 m·s^{-1}), than IHG (M = 7.93 ± 0.79 m·s^{-1}), SHG (M = 7.64 ± 0.54 m·s^{-1}), and CG (M = 7.16 ± 0.76). There was also a significant interaction effect between time and hill gradient level (F (3, 36) = 42.67, p < 0.001, η_p^2= 0.78), indicating that the effect of training time on Vmax varied depending on the hill gradient (Table 3). The post hoc Tukey's Honestly Significant Difference (HSD) comparisons showed pre-post training differences at p < 0.05 for the STHG (MΔ = 1.28, 95% CI [1.11 – 1.44], p = 0.001), IHG (MΔ = 0.59, 95% CI [0.42 – 0.76], p = 0.001), and the SHG IHG (MΔ = 0.33, 95% CI [0.16 – 0.50], p = 0.001). However, no change was observed in the CG (Table 2). In addition, Vmax was significantly higher in the STHG compared to the CG (MΔ = 0.93, 95% CI [0.06 - 1.81], p = 0.032), while no statistically significant differences were detected in all other pairs of comparisons p > 0.05 (Table 4).

The analysis for SR revealed a statistically significant time effect of (F (1, 36) = 194.24, p < 0.001, η_p^2= 0.84), indicating that SR significantly changed over the training period. The average SR was significantly higher in the post-test result (M = 4.52 ± 0.59 Hz) than in the pre-test result (M = 4.11 ± 0.41 Hz). Additionally, there is a significant main effect of hill gradient level in SR (F (3, 36) = 2.87, p = 0.049, η_p^2= 0.20), suggesting differences in SR between the different hill gradients. SR was significantly higher in STHG (M = 5.08 ± 0.51 Hz) than in IHG (M = 4.70 ± 0.39 Hz), SHG (M = 4.21 ± 0.38 Hz), and CG (M = 4.07 ± 0.45 Hz). There was also a significant interaction effect between time and hill gradient level (F (3, 36) = 59.37, p < 0.001, η_p^2= 0.83), indicating that the effect of training time on SR varied depending on the hill gradient. The post hoc Tukey's Honestly Significant Difference (HSD) comparisons showed pre-post training differences at p < 0.05 for the STHG (MΔ = 0.95, 95% CI [0.83 – 1.07], p = 0.001), and IHG (MΔ = 0.61, 95% CI [0.50 – 0.73], p = 0.001). However, no significant change was observed in the SHG and CG (Table 3). In addition, SR was significantly higher in the STHG compared to the CG (MΔ = 0.52, 95% CI [0.02 - 1.03], p = 0.04), while no statistically significant differences were detected in all other possible pairs of comparisons p > 0.05 (Table 4).

The analysis for SL also showed a significant main effect of time (F (1, 36) = 76.033, p < 0.001, η_p^2= 0.679), indicating that SL significantly changed over the training period. The average SL was significantly higher on the post-test result (M = 1.74 ± 0.09 m) than the pre-test result (M = 1.72 ± 0.09 m). However, there is no significant hill gradient effect on Vmax (F (3,36) = 2.080, p = 0.120, η_p^2 = 0.148). There was also a significant interaction effect between time and hill gradient level (F (3, 36) = 16.611, p < 0.001, η_p^2= 0.581), indicating that the effect of training time on SL varied across the hill gradients. The post hoc Tukey's Honestly Significant Difference (HSD) comparisons showed pre-post training differences at the 0.05 level for the STHG and the IHG (MΔ = 0.061, 95% CI [0.049 – 0.073], d = 0.65), (MΔ = 0.028, 95% CI [0.016 – 0.040], d = 0.33) respectively. All other pairwise comparisons between group showed no differences, p > 0.05. Lastly, contact time and flight time didn't show significant change within group and between group, as indicated in Table 3.

4. Discussion

The purpose of this study was to examine the chronic effects of uphill training on kinematic characteristics of middle-distance runners, with specific attention to identify the hill gradient that can best modify kinematic characteristics of middle-distance runners. The major findings of the present investigation suggest that; 8 weeks of high intensity uphill training can positively impact key kinematic characteristics of middle-distance runners.

Table 4. Pairwise comparison for the between-subject effects of intervention on outcome variables

Variables	Pairwise Comparison					
	Treatment groups	Mean difference	St. error	Sig.[b]	95% CI	
					Lower bound	Upper bound
Vmax (m/s^{-1})	STHG – IHG	0.47	0.32	.489	- 0.41	1.34
	STHG – SHG	0.62	0.32	.236	- 0.25	1.50
	STHG – CG	0.93†	0.32	.032	0.06	1.81
	IHG – SHG	0.15	0.32	.963	- 0.72	1.03
	IHG – CG	0.46	0.32	.487	- 0.41	1.34
	SHG - CG	0.31	0.32	.776	- 0.56	1.18
SR (HZ)	STHG – IHG	0.21	0.19	.68	- 0.29	0.71
	STHG – SHG	0.44	0.19	.10	- 0.06	0.95
	STHG – CG	0.52†	0.19	.04	0.02	1.03
	IHG – SHG	0.23	0.19	.59	- 0.27	0.74
	IHG – CG	0.31	0.19	.35	- 0.19	0.82
	SHG - CG	0.08	0.19	.97	- 0.42	0.58
SL (m)	STHG – IHG	0.01	0.04	.98	- 0.09	0.12
	STHG – SHG	0.08	0.04	.14	- 0.02	0.19
	STHG – CG	0.08	0.04	.17	- 0.02	0.18
	IHG – SHG	0.07	0.04	.28	- 0.03	0.17
	IHG – CG	0.06	0.04	.34	- 0.04	0.17
	SHG - CG	0.00	0.04	.99	- 0.12	0.10
CT (ms)	STHG – IHG	0.25	1.74	.99	- 4.44	4.94
	STHG – SHG	1.10	1.74	.92	- 3.59	5.79
	STHG – CG	- 0.65	1.74	.98	-5.34	4.04
	IHG – SHG	0.85	1.74	.96	- 3.84	5.54
	IHG – CG	- 0.90	1.74	.95	- 5.59	3.79
	SHG – CG	- 1.75	1.74	.75	- 6.44	2.94
FT (ms)	STHG – IHG	1.00	1.38	.89	- 2.73	4.73
	STHG – SHG	1.90	1.38	.52	- 1.83	5.63
	STHG – CG	1.60	1.38	.66	- 2.13	5.33
	IHG – SHG	0.90	1.38	.91	- 2.83	4.63
	IHG – CG	0.60	1.38	.97	- 3.13	4.33
	SHG - CG	- 0.30	1.38	.99	- 4.03	3.43

† Significantly different at ($P < 0.05$) as determined by two-way repeated measure ANOVA, and post-hoc Tukey's HSD test, Vmax: maximal running velocity, TT: time trial performance, SE: strength endurance, CI: confidence interval, STHG: steeper hill group, IHG: intermediate hill group, SHG: shallow hill group, and CG: control group.

In particular, Vmax was improved across all hill gradients, with substantial improvement observed at the steeper and intermediate hill gradients. While studies directly comparing the long-term effects of different uphill gradients on Vmax are limited, our findings align with earlier research. For instance, Tziortzis (51) showed a 3.3% improvement after 12 weeks of training on an uphill training slope of 8° on maximal running speed. This supports the notion that steeper gradients may elicit greater neuromuscular and biomechanical adaptations conducive to speed development. The key difference between the present study and the earlier work by Tziortzis is the shorter intervention duration eight weeks compared to twelve and the lower the gradient level (7.6%) compared to (14%). Interestingly, this reduced timeframe and hill gradient was still sufficient to elicit meaningful performance adaptations, suggesting that significant improvements can occur within a relatively brief training period and less steep gradients. Similar studies have reported improvements in Vmax of 3.7% and 3.5% using a 5.24% hill gradient compared to flat-surface training (34, 52). A key distinction between the present study and these previous investigations lies in the training design: while earlier studies employed a combined uphill-downhill training approach, the current study focused on the isolated effects of different uphill gradients. This distinction allows for a more precise understanding of how specific incline levels independently influence performance adaptations.

As the uphill training increases resistance, which helps in building strength and power (53), which are crucial for maximal running speed. The resistance provided by running uphill requires greater force production from the lower limb muscles, particularly the quadriceps, hamstrings, and calves. The rationale for the superiority of the steeper hill gradient against intermediate and shallow hill gradients is due to the increased muscular demand leading to hypertrophy and neuromuscular adaptations, improving the athlete's

ability to generate force quickly (54). Uphill running necessitates more force application, which can increase muscle strength and power, contributing to improved acceleration and maximal velocity (55).

The efficiency of uphill training is further demonstrated by the improvements observed in step rate (SR) and step length (SL), particularly at steeper and intermediate hill gradients. These enhancements were most pronounced at the steeper inclines. Similar findings were reported by (32, 56), who observed improvements in SR but no significant changes in SL. However, a key difference lies in the study design: the previous studies utilized a combined uphill and downhill training protocol on a 3° gradient, with comparisons made against horizontal and control groups. In contrast, the present study isolated the effects of different uphill gradients, allowing for a more targeted analysis of their specific impact on running kinematics. Notably, there is a lack of experimental data in the existing literature examining long-term changes in SR, SL, CT, and FT across varying uphill gradients. This highlights the novelty and contribution of the present study in addressing this gap and providing new insights into the gradient-specific adaptations in running mechanics.

It is well known that incline running modifies the length and frequency of strides, improving sprinting mechanics and allowing athletes to accelerate more effectively (57, 58). Sprinting performance requires the legs to traverse through the stride cycle at quicker rates and the muscles to shorten and lengthen more quickly, which is dependent on stride rate (59). Acute uphill running leads to increased stride rate and a shorter stride length as runners adjust to the incline by lifting their knees more and keeping their center of gravity over their lead foot (60, 61). This, in the long run, improves stride rate and stride length in horizontal running performance. Compared to intermediate and shallow hill training, steep hill training increases the body's potential energy by having lower limb muscles execute a higher net mechanical work. All joints, but especially the hip, produce more power to meet the increased needs of work as the running inclination rises. This suggests that compared to intermediate and shallow hill training, steep hill training necessitates higher levels of muscle activation. Therefore, adaptations to uphill training directly impact neuromuscular activation, which ensures the overall efficiency of movement, including step rate and step length (22). The study also demonstrated significant difference among training groups in Vmax and SR, while no significant difference observed in the rest of the variables (SL, CT, and FT). Vmax and SR was significantly different in the STHG compared to the control group. This suggests that uphill training at these gradients is particularly effective in enhancing maximal sprinting speed, likely due to increased neuromuscular demand and biomechanical adaptations. While the absence of significant changes in step rate (SR) and step length (SL) in the shallow hill gradient (SHG) group, as well as in contact time (CT) and flight time (FT) across all training groups, may initially seem unexpected, several plausible explanations can be considered. One key factor is the relatively short duration of the intervention—eight weeks—which, although sufficient to elicit improvements in certain performance variables such as Vmax and SR, may not provide enough time for more subtle neuromuscular and biomechanical adaptations to manifest in all kinematic parameters.

Previous research suggests that longer training periods are often required to elicit measurable changes in variables such as CT and FT, especially when the training stimulus is moderate (62). Additionally, the specificity of the training stimulus plays a crucial role. The training protocols may have been more effective in targeting velocity-related adaptations rather than those influencing temporal gait characteristics like CT and FT. For instance, improvements in Vmax and SR may result more directly from enhanced force production and stride mechanics, whereas changes in CT and FT might require more focused interventions, such as plyometric or technique-specific drills. Studies have shown that resisted sprint training (e.g., sleds, uphill running) tends to produce moderate effects on acceleration and step frequency, but not always on CT or FT when compared to traditional sprinting (63).

Individual variability in response to training is another important consideration. Although, baseline characteristics of the participant was no significant difference, individual athletes may differ in their baseline kinematic profiles, neuromuscular efficiency, and adaptability, which can influence how they respond to a given training stimulus. This variability can dilute group-level statistical significance, even when individual improvements are present. Finally, it is also possible that certain kinematic parameters, particularly CT and FT, are more resistant to change and may require either a longer training duration or a higher training volume and intensity to produce measurable effects (64). Future studies with extended intervention periods, larger sample sizes, and more targeted training modalities may help clarify these relationships and further elucidate the mechanisms underlying kinematic adaptations to uphill training.

While this study constitutes a first in the literature, in comparing the chronic effects of three different uphill gradients on kinematic characteristics of middle-distance runners, it has methodological limitations that need to be acknowledged and addressed in the future. Due to the small number of participants available in

the field, the study included a range of training experiences (6 months to 4 years), and mixed gender was part of the study. These may affect the result of the study, as athletes at different stages of their training journey and due to gender may respond differently to the same training regimen. This diversity of the study population may be considered as a limitation. However, the intervention study on athletes having some training experience while using a well-established controlled training protocol can be viewed as an advantage in the current study and for the future development of an efficacious training program. Future studies should examine the impact of training load, frequency, duration, and extra steep hill gradients on physiological performance parameters.

5. Conclusion

The present study investigated the effects of different uphill training gradients on kinematic characteristics of middle-distance runners. The results of the present study demonstrated the positive effects of uphill training on key kinematic characteristics of middle-distance runners that are related to maximal running speed. The gains in Vmax were supported by improvements in SR and SL in favor of steep hill gradients. Different uphill training gradients appear to elicit specific training adaptations, implying that uphill training should be carefully tailored to the athlete's strengths and limitations. Until further evidence is available, runners can presume that changes in a range of kinematic characteristics induced by modifying the uphill-running loadings will result improvements in key kinematic characteristics. This could be applicable in middle-distance runners, requiring large anaerobic capacity, providing the ability to generate a high power output through ground reaction forces for high velocities over moderate distances (65). In addition, intermediate hills could be applied to longer distances, requiring relatively less power output and efficient use of energy through improved running mechanics and running economy (66). Moreover, coaches and athletes need to consider and apply uphill training as an efficient alternative training strategy for improving the kinematic characteristics of middle-distance runners.

Ethical Considerations

Compliance with ethical guidelines

The study was carried out in strict accordance with the ethical guidelines and principles using human subjects. The trial was approved by the Ethics Review of BDU, Sport Academy (Protocol number: IRERC 05/2024). Both parents/legal guardians of minors and minors/participants themselves were informed about the intervention and possible adverse events before the commencement of the trial and signed an informed consent form.

Funding

The author(s) acknowledge that financial support for the study was provided by Bahir Dar University, which played a crucial role in facilitating the research.

Authors' contributions

YA, TT, and ZB conceived and designed the study. YA and ZB conducted the experiments and collected the data. YA, TT, and ZB analyzed the data. YA, TT, and ZB wrote the manuscript. All the authors read and approved the manuscript.

Conflicts of interest

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

مقاله پژوهشی

تأثیر تمرین در شیب‌های مختلف سربالایی بر ویژگی‌های کینماتیکی دوندگان نیمه‌استقامت

*یهوالاو آلمو[۱]، تفرا تدسه[۲]، زریهون بیرهانو[۱]

۱. آکادمی ورزش، دانشگاه باهِر دار، باهِر دار، اتیوپی.

۲. مرکز آموزشی توسعه و کیفیت، دانشگاه جهانی سلامت، کیگالی، رواندا.

Use your device to scan and read the article online

Citation: Alemu Y, Tadesse T, Birhanu Z. The Effects of Training at Different Uphill Gradients on the Kinematic Characteristics of Middle-Distance Runners. Journal of Sport Biomechanics.2025;11(3):208-234. https://doi.org/10.61186/JSportBiomech.11.3.208

https://doi.org/10.61186/JSportBiomech.11.3.208

اطلاعات مقاله:

تاریخ دریافت: ۲۳ خرداد ۱۴۰۴
تاریخ پذیرش: ۷ تیر ۱۴۰۴
تاریخ انتشار: ۷ تیر ۱۴۰۴

کلید واژه‌ها:
تمرین در سربالایی، کینماتیک، سرعت حداکثر، دو نیمه‌استقامت، شیب‌های سربالایی

چکیده

هدف این مطالعه با هدف بررسی تأثیر تمرین در سه شیب مختلف سربالایی — ۷/۶، ۵/۱ و ۲/۵ درصدی — بر ویژگی‌های کینماتیکی منتخب دوندگان نیمه‌استقامت انجام شد.

روش‌ها چهل دونده نیمه‌استقامت یک تست دو سرعت حداکثر در مسافت ۳۰ متر انجام دادند تا ویژگی‌های کینماتیکی آن‌ها ارزیابی شود. شرکت‌کنندگان به‌صورت تصادفی به یکی از سه گروه تمرین در سربالایی یا گروه کنترل اختصاص داده شدند. ارزیابی‌های پیش و پس از تمرین برای بررسی تأثیر ۸ هفته تمرین در سربالایی بر سرعت حداکثر (Vmax)، نرخ گام‌برداری (SR)، طول گام (SL)، زمان تماس (CT) و زمان پرواز (FT) انجام گرفت.

یافته‌ها گروه تمرین در شیب تندتر (STHG) بهبود معناداری در سرعت حداکثر (Vmax)، نرخ گام‌برداری (SR) و طول گام (SL) نشان داد. گروه با شیب متوسط (IHG) نیز در همین سه متغیر افزایش معناداری داشت. در گروه با شیب ملایم (SHG) تنها سرعت حداکثر (Vmax) به‌طور معناداری افزایش یافت و در سایر متغیرها تغییری مشاهده نشد.

نتیجه‌گیری یافته‌های این مطالعه نشان می‌دهد که تمرین در سربالایی، به‌ویژه در شیب‌های تندتر، می‌تواند به‌طور معناداری ویژگی‌های کینماتیکی کلیدی در دوندگان نیمه‌استقامت را بهبود بخشد و تمرین در شیب‌های تندتر بیشترین مزیت را به همراه دارد.

*نویسنده مسئول:
یهوالاو آلمو
آدرس: آکادمی ورزش، دانشگاه باهِر دار، باهِر دار، اتیوپی.
تلفن: ۱۶۲۰۵۵ (۹۱۲) ۲۵۱+
ایمیل: yehualaw@gmail.com و bdu1402098@bdu.edu.et

مقدمه

عملکرد در دوهای نیمه‌استقامت ویژگی‌های خاص خود را دارد و بیشتر تحت تأثیر عواملی در حوزه‌های بیومکانیک (۱، ۲) و فیزیولوژی (۳، ۴) قرار می‌گیرد. یکی از چالش‌های اصلی در این رشته، حفظ سرعت بالا در کنار حرکت اقتصادی و کم‌هزینه از نظر انرژی است (۵). آشنایی با اصول بیومکانیکی مانند طول گام، فرکانس گام، زمان پرواز و زمان تماس با زمین می‌تواند نقش مهمی در بهبود عملکرد دوندگان داشته باشد (۶، ۷). دویدن شامل دو فاز اصلی است: فاز پرواز و فاز تماس با زمین. در اجرای مؤثر، حدود ۶۵ درصد از زمان گام در فاز پرواز و ۳۵ درصد در فاز تماس صرف می‌شود (۸). متغیرهایی مانند طول گام، زمان تماس، زمان پرواز و نرخ گام این چرخه را تنظیم می‌کنند (۹، ۱۰). تنظیم مناسب طول و فرکانس گام می‌تواند هم به کاهش مصرف انرژی و هم به افزایش سرعت کمک کند. همچنین، بیومکانیک مؤثر یعنی تماس کوتاه‌تر پا با زمین و پرواز طولانی‌تر که در نهایت باعث بهبود کارایی و عملکرد دویدن می‌شود (۱۱، ۱۲).

مطالعه سوینن و همکاران[1](۱۳) نشان داد که دوندگان تمایل دارند فرکانسی از گام را انتخاب کنند که کمترین مصرف انرژی را داشته باشد. در این حالت، با افزایش فرکانس گام، زمان تماس با زمین کاهش یافته و نیروی بیشتری از ناحیه ران در حین نوسان پا تولید می‌شود. به‌طور مشابه، مرور نظام‌مند انجام‌شده توسط وان‌هورن و جوکیچ[2](۱۴) نشان داد که کادنس بالاتر با کاهش مصرف اکسیژن همراه است و این موضوع نشان می‌دهد که بهینه‌سازی فرکانس گام می‌تواند عملکرد و کارایی دویدن را بهتر کند. همچنین، دوندگان باتجربه به‌طور طبیعی طول گامی را انتخاب می‌کنند که به آن‌ها کمک می‌کند اکسیژن کمتری مصرف کنند که این نشان‌دهنده توانایی آن‌ها در بهینه‌سازی حرکت است (۱۵). از طرف دیگر، تفاوت در زمان تماس پا با زمین می‌تواند به‌طور قابل‌توجهی بر کارایی دویدن اثر بگذارد. تحقیقات نشان داده‌اند که زمان تماس کمتر با زمین با عملکرد بهتر همراه است، همان‌طور که در مقایسه دوندگان شمال آفریقا با اروپایی‌ها دیده شده است (۱۶).

برخی مطالعات نشان داده‌اند که تمرینات تناوبی شدید (HIIT)[3] می‌توانند باعث افزایش قدرت، توده عضلانی و توان هوازی شوند (۱۷). این عوامل همگی در بهبود جنبه‌های بیومکانیکی دویدن نقش دارند. تمرین در سربالایی نیز نوعی تمرین مقاومتی مؤثر به شمار می‌آید، زیرا حرکات آن به دویدن معمولی شباهت زیادی دارد و درعین‌حال قدرت عضلانی خاص ورزش را تقویت می‌کند. این موضوع با نتایج مطالعاتی که اثر تمرینات مقاومتی تدریجی در افزایش عملکرد و کاهش خطر آسیب در رشته‌های مختلف ورزشی را نشان داده‌اند هم‌خوانی دارد (۱۸). مطالعات متعددی اثرات فوری دویدن در سربالایی را بر ویژگی‌های کینماتیکی بررسی کرده‌اند (۱۲، ۱۹–۲۳). برای مثال، در یک پژوهش مشخص شد که با افزایش شیب از صفر تا ۷ درصد، فرکانس گام ۴ درصد افزایش و طول گام ۴ درصد کاهش یافت (۲۴). مطالعه‌ای دیگر نشان داد که سرعت و طول گام در دویدن سربالایی نسبت به سرازیری به‌ترتیب ۵/۲ و نسبت به سطح صاف ۳ درصد کمتر بود (۲۱). همچنین در پژوهشی دیگر مشاهده شد که در مقایسه با دویدن روی سطح صاف، دویدن سربالایی با فرکانس گام بالاتر، کار مکانیکی بیشتر، زمان پرواز کمتر و زمان تماس بیشتر همراه است (۲۵). علت این تفاوت‌ها آن است که هنگام دویدن سربالایی، عضلات اندام تحتانی باید انرژی مکانیکی بیشتری تولید کنند تا بدن را به سمت بالا حرکت دهند. این نوع دویدن همچنین باعث افزایش چشمگیر در هزینه انرژی می‌شود، به‌طوری‌که در شیب‌های تند، ۵۳

1. Swinnen et al.
2. Van Hooren, Jukic
3. High-intensity interval training

درصد انرژی بیشتری مصرف می‌شود (۲۴). از دیگر ویژگی‌های دویدن در سربالایی می‌توان به زمان پرواز کوتاه‌تر، زمان تماس بیشتر و فرکانس گام بالاتر در شیب‌های زیاد اشاره کرد (۲۶–۲۸). شیب‌های تند (مثلاً ۲۰ درصد) نیازمند قدرت عضلانی بیشتر و مصرف انرژی بالاتر هستند که این موضوع می‌تواند عملکرد را به‌شکلی متفاوت از دویدن روی سطح صاف یا شیب ملایم تحت تأثیر قرار دهد (۲۹). تغییر از دویدن روی سطح به سربالایی باعث ایجاد تفاوت‌هایی در زوایای مفصلی و دامنه حرکتی می‌شود که در نهایت ممکن است به بهبود الگوی کلی حرکت منجر شود.

افزودن دویدن در شیب به برنامه‌های تمرینی می‌تواند با افزایش کارایی متابولیکی و ایجاد سازگاری‌های کینماتیکی مفید، عملکرد را بهبود بخشد (۳۰). مربیان معمولاً از این نوع تمرین برای تقویت عضلات پا و بهبود دویدن در سطح صاف استفاده می‌کنند. پژوهش‌ها نشان داده‌اند که دویدن در سربالایی فعالیت عضلاتی مانند رکتوس فموریس، واستوس مدیالیس، بای‌سپس فموریس و گاستروکنمیوس را نسبت به دویدن در سطح صاف به‌طور چشمگیری افزایش می‌دهد (۳۱). در یک مطالعه، مشخص شد که این نوع دویدن، به‌طور متوسط، فعالیت عضلات اندام تحتانی را حدود ۵۴/۱۶ درصد افزایش می‌دهد. این درگیری عضلانی نقش مهمی در تقویت قدرت و استقامت دارد که برای بهبود کارایی در دویدن ضروری است. مطالعه‌ای نشان داد که پس از ۸ هفته تمرین ترکیبی سربالایی–سرازیری با شیب ±۳ درجه، حداکثر سرعت، نرخ گام، زمان تماس و زمان گام به‌ترتیب ۴/۳، ۴/۳، ۵/۱ و ۳/۹ درصد کاهش داشتند (۳۲)، درحالی‌که در تمرین سطح صاف این تغییرات کمتر و حدود ۱ تا ۲ درصد بودند. مطالعه‌ای دیگر نیز افزایش ۴/۸ درصدی در سرعت دویدن را پس از ۶ هفته تمرین ترکیبی گزارش کرد، اما در نرخ گام و زمان تماس تغییر معناداری مشاهده نشد (۳۳). همچنین پژوهش دیگری نشان داد که گروه تمرین ترکیبی پس از ۶ هفته تمرین، حداکثر سرعت و نرخ گام را به‌ترتیب ۳/۷ و ۱/۳ درصد افزایش دادند، درحالی‌که زمان تماس و زمان پرواز تغییری نداشت (۳۴).

اکثر مطالعات پیشین بر اثرات کوتاه‌مدت دویدن در سربالایی متمرکز بوده‌اند (۱۰، ۱۲، ۲۱، ۲۲، ۲۴، ۲۸، ۲۹، ۳۵–۳۸)، درحالی‌که اثرات بلندمدت تمرین در سطوح شیب‌دار بر ویژگی‌های کینماتیکی دویدن در سطح صاف هنوز به‌طور کامل شناخته‌شده نیست (۲۱). با اینکه برخی پژوهش‌ها به بررسی تمرینات ترکیبی پرداخته‌اند، اما هنوز مشخص نیست که تمرین صرفاً در سربالایی و آن‌هم با شیب‌های متفاوت چه تأثیری بر کینماتیک دویدن دارد. این موضوع اهمیت دارد، چون دویدن در سربالایی، الگوی بیومکانیکی و درگیری عضلانی متفاوتی نسبت به دویدن در سطح صاف یا سرازیری دارد. شناخت تأثیرات بلندمدت شیب‌های مختلف بر کینماتیک دویدن می‌تواند به مربیان و ورزشکاران کمک کند تا تمرینات هدفمندتری طراحی کرده و عملکرد را بهتر ارتقاء دهند؛ بنابراین، مطالعه حاضر با هدف بررسی اثرات بلندمدت سه شیب مختلف سربالایی بر ویژگی‌های کینماتیکی دوندگان نیمه‌استقامت انجام شده و تلاش دارد مؤثرترین شیب را در بهبود این ویژگی‌ها شناسایی کند.

روش شناسی

شرکت‌کنندگان

در این مطالعه، ۴۰ دونده نیمه‌استقامت با آمادگی متوسط (۲۴ مرد و ۱۶ زن) شرکت کردند. میانگین سنی شرکت‌کنندگان مرد ۱/۰۲ ± ۱۸/۵۴ و برای زنان ۱/۰۹ ± ۱۴۴۱۷ سال بود. این ورزشکاران به‌طور متوسط ۰/۷۴ ± ۲/۱۱ سال سابقه تمرین ساختاریافته داشتند. پیش از شروع مداخله، رضایت‌نامه آگاهانه کتبی از شرکت‌کنندگان دریافت شد و طرح پژوهش به تصویب کمیته اخلاق

دانشگاه باهِر دار در اتیوپی رسید (شماره پروتکل IRERC 05/2024). کلیه مراحل پژوهش مطابق با اصول بیانیه هلسینکی در زمینه پژوهش بر روی انسان انجام شد. پیش از شرکت در مطالعه، اطلاعات کامل درباره روش اجرا، مزایا و مخاطرات احتمالی به آزمودنی‌ها ارائه شد و سپس فرم رضایت‌نامه را امضا کردند. شرکت‌کنندگان بر اساس معیارهای ورود از پیش تعریف‌شده انتخاب شدند. این معیارها شامل: سلامت عمومی، نداشتن آسیب عضلانی، عصبی یا تاندونی، عدم مصرف دارو و داشتن حداقل ۶ ماه سابقه تمرین در سطح منطقه‌ای یا ملی بودند. افرادی که کمتر از ۶ ماه سابقه تمرین داشتند، در ۳ ماه اخیر دچار آسیب اندام تحتانی شده بودند، یا دارو مصرف می‌کردند، از مطالعه کنار گذاشته شدند. ورزشکاران واجد شرایط از طریق اطلاع‌رسانی در محل تمرین به‌صورت داوطلبانه جذب شدند. پس از پذیرش، شرکت‌کنندگان به‌صورت تصادفی به یکی از چهار گروه تقسیم شدند: گروه شیب تند (۷/۶ درصد)، شیب متوسط (۵/۱ درصد)، شیب ملایم (۲/۵ درصد) و گروه کنترل. در نظر گرفتن این سطوح مختلف شیب بر این فرض استوار بود که شدت تمرین در هر شیب متفاوت است (۳۹، ۴۰) و همین تفاوت می‌تواند اثرات گوناگونی بر ویژگی‌های کینماتیکی مانند نرخ گام (SR)[1]، طول گام (SL)[2]، زمان تماس (CT)[3] و زمان پرواز (FT)[4] داشته باشد. این تنوع به محققان کمک می‌کند تا مشخص کنند کدام شیب تعادل بهتری بین فشار تمرینی و بهبود عملکرد ایجاد می‌کند.

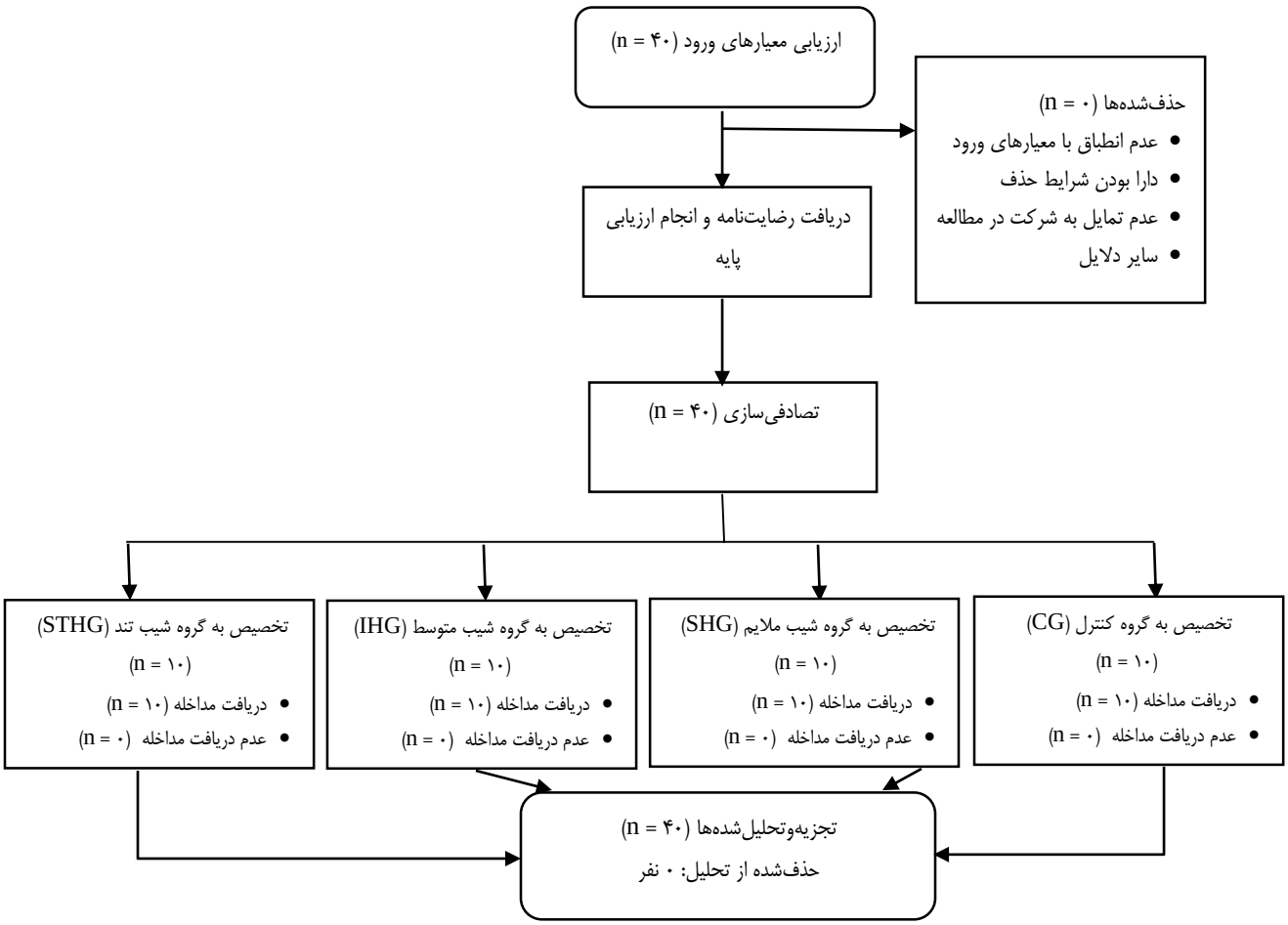
طرح و رویه اجرای مطالعه

این پژوهش با طراحی تجربی موازی از نوع پیش‌آزمون ـ پس‌آزمون اجرا شد، به‌طوری‌که ارزیابی‌ها قبل و بعد از دوره مداخله‌ی ۸ هفته‌ای انجام گرفت. شرکت‌کنندگان به‌صورت تصادفی به یکی از سه گروه تمرین یا گروه کنترل اختصاص داده شدند. هر گروه شامل ۱۰ نفر بود: گروه تمرین در شیب تند (۷/۶ درصد)، گروه تمرین در شیب متوسط (۵/۱ درصد)، گروه تمرین در شیب ملایم (۲/۵ درصد) و گروه کنترل (بدون مداخله). دلیل استفاده از سطوح مختلف شیب این بود که شیب‌های مختلف درجه‌های متفاوتی از شدت تمرین را ایجاد می‌کنند (۴۱) و این امکان را فراهم می‌سازند تا بتوان بررسی کرد که هر سطح شدت چگونه بر متغیرهای کینماتیکی تأثیر می‌گذارد. این تنوع به محققان اجازه می‌دهد تا مناسب‌ترین شیب را از نظر ایجاد تعادل بین فشار تمرینی و بهبود ویژگی‌های کینماتیکی شناسایی کنند. مطالعه حاضر مطابق با دستورالعمل‌های CONSORT برای افزایش کیفیت و شفافیت گزارش مطالعات تجربی انجام شد (۴۲) و در پایگاه pactr.samrc.ac.za در تاریخ ۲۰۲۴/۱۱/۲۹ با شماره ثبت NCT01234567 به ثبت رسیده است. برای تعیین حجم نمونه مناسب، از نرم‌افزار G*Power استفاده شد (۴۳). بر اساس نتایج یک مطالعه پیشین (۳۴)، با فرض توزیع نرمال پاسخ‌ها در هر گروه، تعداد شرکت‌کنندگان موردنیاز برای دستیابی به اندازه اثر ۰/۶۲ بین پیش‌آزمون و پس‌آزمون با توان آماری ۸۰ درصد و سطح معناداری ۰/۰۵، برابر با ۳۶ نفر برآورد شد. برای جبران ریزش احتمالی، ۱۰ درصد به این عدد افزوده شد و در نهایت حجم نمونه به ۴۰ نفر افزایش یافت. به‌منظور کاهش سوگیری، فرایند تخصیص تصادفی، جذب شرکت‌کنندگان و تخصیص آن‌ها به مداخله، توسط افراد آموزش‌دیده انجام شد. با توجه به حجم نمونه نسبتاً کوچک و سادگی اجرا، از روش قرعه‌کشی ساده برای تقسیم افراد در چهار گروه مطالعه استفاده شد (هر گروه ۱۰ نفر): گروه

1. Step rate
2. Step length
3. Contact time
4. Flight time

شیب تند (STHG)[1]، گروه شیب متوسط (IHG)[2]، گروه شیب ملایم (SHG)[3] و گروه کنترل (CG)[4]. نسبت تخصیص به‌صورت برابر (۱:۱:۱:۱) انجام شد و از پاکت‌های دربسته برای حفظ محرمانگی تخصیص استفاده شد (شکل ۱). همچنین، هر زمان که امکان‌پذیر بود، از روش کورسازی استفاده شد تا ارزیاب‌های نتایج از گروه‌بندی افراد اطلاع نداشته باشند. تمامی شرکت‌کنندگان پیش از آغاز مداخله، تحت آزمون پایه برای اندازه‌گیری متغیرهای کینماتیکی از طریق تست دو سرعت ۳۰ متری قرار گرفتند. تیم تحقیقاتی یکسانی بر فرآیند اجرای تمرینات و آزمون‌ها نظارت داشت.

برای بررسی اثر تمرین در شیب بر متغیرهای فضایی–زمانی گام‌برداری، از تست دو سرعتی حداکثر ۳۰ متر استفاده شد تا SR، SL، CT و FT اندازه‌گیری شود. پس از گرم‌کردن استاندارد به مدت ۱۰ تا ۱۵ دقیقه و حرکات کششی دینامیک (۴۴)، آزمون سرعت شامل منطقه شتاب‌گیری ۳۰ متری و سپس منطقه سرعت حداکثر ۳۰ متری روی پیست ۴۰۰ متری دانشگاه انجام شد (۴۵، ۴۶).



شکل ۱. نمودار جریان مراحل یک کارآزمایی تصادفی موازی با چهار گروه (ورود، تخصیص، مداخله، پیگیری و تحلیل داده‌ها)

1. Steeper hill group
2. Intermediate hill group
3. Shallow hill group
4. Control group

اگرچه دوهای نیمه‌استقامت بیشتر بر ظرفیت هوازی تمرکز دارند، اما ارزیابی‌هایی مانند تست ۳۰ متر برای سنجش قدرت عصبی–عضلانی، شتاب‌گیری و عملکرد بی‌هوازی که در لحظاتی مانند شروع مسابقه، شتاب‌گیری تاکتیکی و پایان رقابت نقش دارند، بسیار مفید هستند. شرکت‌کنندگان سه بار تست دو ۳۰ متری انجام دادند و بین هر تکرار ۶ تا ۸ دقیقه استراحت داشتند. بهترین زمان اجرا برای تحلیل انتخاب شد. زمان‌گیری از لحظه عبور تنه از مخروط شروع (۳۰ متر) تا عبور از مخروط ۶۰ متری اندازه‌گیری شد (۴۷، ۴۸). دوربین Canon SX70 HS با وضوح p۱۰۸۰ و نرخ نمونه‌برداری ۲۴۰ هرتز، ثبت تصاویر را انجام داد. دوربین روی سه‌پایه در ارتفاع ۱/۵ متری و در فاصله ۷/۵ متری از کنار پیست، عمود بر صفحه ساجیتال شرکت‌کننده قرار گرفت. تصاویر با نرم‌افزار Kinovea 0.9.5 تحلیل شدند. متغیرهای کینماتیکی اندازه‌گیری‌شده شامل: زمان تماس با زمین (میلی‌ثانیه)، زمان پرواز (میلی‌ثانیه)، طول گام (متر) و فرکانس گام (هرتز) بودند. فرکانس گام با شمارش تعداد گام‌ها در ویدئو و تقسیم آن بر زمان طی شده اندازه‌گیری شد. طول گام با تقسیم مسافت طی‌شده بر تعداد گام‌ها محاسبه شد. زمان تماس و زمان پرواز با شمارش فریم‌ها در ویدئو و تقسیم آن‌ها بر نرخ نمونه‌برداری (۲۴۰ فریم در ثانیه ≈ ۰/۰۰۴۲ ثانیه) به‌دست آمد. برای تحلیل زمان تماس، از یک گام کامل (دو گام متوالی پای راست و چپ) استفاده شد. برای یکسان‌سازی، تحلیل‌ها فقط بر اساس پای راست انجام شد.

پروتکل تمرینی

همه شرکت‌کنندگان پیش از مطالعه به‌طور منظم چهار جلسه در هفته تمرین دو داشتند و به‌طور متوسط حدود ۳۵ کیلومتر در هفته می‌دویدند. در طول مداخله، تمرینات سربالایی جایگزین تمرینات قدرتی شدند و روی تردمیل موتوردار Cybex 530T pro plus USA انجام گرفت. شرکت‌کنندگان در گروه‌های مداخله، هفته‌ای دو جلسه تمرین در شیب داشتند و در سایر روزها برنامه معمول خود را ادامه دادند. شدت تمرین با کنترل سرعت نسبی به توانایی هر ورزشکار و اندازه‌گیری ضربان قلب (۸۵ تا ۱۰۰٪ حداکثر) یکسان‌سازی شد. استراحت بین ست‌ها و تکرارها نیز استاندارد شد و به‌تدریج شدت تمرین افزایش یافت. جزئیات پروتکل ۸ هفته‌ای تمرین در جدول ۱ آمده است.

جدول ۱. پروتکل تمرینی ۸ هفته‌ای برای گروه‌ها

هفته‌ها	گروه کنترل (CG)	گروه شیب تند (STHG)	گروه شیب متوسط (IHG)	گروه شیب ملایم (SHG)
شیب	ندارد	۶٪/۷	۱٪/۵	۵٪/۲
شدت تمرین (٪ HRmax)	ندارد	۸۵–۱۰۰٪	۸۵–۱۰۰٪	۸۵–۱۰۰٪
استراحت بین ست‌ها	ندارد	۴ تا ۶ دقیقه	۴ تا ۶ دقیقه	۴ تا ۶ دقیقه
استراحت بین تکرارها	ندارد	۲ تا ۴ دقیقه	۲ تا ۴ دقیقه	۲ تا ۴ دقیقه
پیشرفت تمرینی				
هفته اول	ندارد	۴ ست × ۶ تکرار × ۳۰ ثانیه	۲ ست × ۶ تکرار × ۶۰ ثانیه	۶ تکرار × ۲ دقیقه
هفته دوم	ندارد	۴ ست × ۸ تکرار × ۳۰ ثانیه	۲ ست × ۸ تکرار × ۶۰ ثانیه	۸ تکرار × ۲ دقیقه
هفته سوم	ندارد	۴ ست × ۱۰ تکرار × ۳۰ ثانیه	۲ ست × ۱۰ تکرار × ۶۰ ثانیه	۱۰ تکرار × ۲ دقیقه
هفته چهارم	ندارد	۴ ست × ۶ تکرار × ۴۵ ثانیه	۲ ست × ۶ تکرار × ۹۰ ثانیه	۶ تکرار × ۳ دقیقه
هفته پنجم	ندارد	۴ ست × ۸ تکرار × ۴۵ ثانیه	۲ ست × ۸ تکرار × ۹۰ ثانیه	۸ تکرار × ۳ دقیقه
هفته ششم	ندارد	۳ ست × ۱۰ تکرار × ۶۰ ثانیه	۲ ست × ۱۰ تکرار × ۹۰ ثانیه	۱۰ تکرار × ۳ دقیقه
هفته هفتم	ندارد	۳ ست × ۵ تکرار × ۹۰ ثانیه	۲ ست × ۶ تکرار × ۲ دقیقه	۶ تکرار × ۴ دقیقه
هفته هشتم	ندارد	۳ ست × ۷ تکرار × ۹۰ ثانیه	۲ ست × ۸ تکرار × ۲ دقیقه	۸ تکرار × ۴ دقیقه

توجه: تعداد ست‌ها و تعداد تکرارها به‌منظور ایجاد اضافه‌بار پیش‌رونده، با افزایش تعداد هفته‌ها افزایش یافت؛ درحالی‌که زمان ریکاوری و فرآیند سازگاری حفظ شد. اقتباس‌شده از مطالعه‌ای پیشین (۴۹).

تجزیه‌وتحلیل آماری

تحلیل آماری با استفاده از نرم‌افزار IBM SPSS Statistics 27 انجام شد. نتایج متغیرها به‌صورت میانگین ± انحراف معیار گزارش شد. برای بررسی تفاوت بین زمان پیش و پس از تمرین، از تحلیل واریانس با اندازه‌گیری مکرر دوطرفه مختلط (Time × Group) استفاده شد. در صورت مشاهده اثر معنادار اصلی یا تعاملی، از آزمون تعقیبی توکی با اصلاح بونفرونی استفاده شد. نرمال بودن داده‌ها با آزمون شاپیروویلک و همگنی واریانس با آزمون لون بررسی شد. همه متغیرها در سطح معناداری $p < ۰/۰۵$ تحلیل شدند. تفسیر نتایج شامل میانگین تفاوت‌ها، فاصله اطمینان ۹۵٪ (CI) و مقادیر p بود (۵۰).

نتایج

جدول ۲ خلاصه‌ای از داده‌های توصیفی پایه و تغییرات مطلق تعدیل‌شده در ویژگی‌های کینماتیکی شرکت‌کنندگان در طول مطالعه را نشان می‌دهد. تحلیل آماری ارزیابی‌های پیش از تمرین، هیچ تفاوت معناداری بین گروه‌ها در هیچ‌یک از متغیرها نشان نداد. این موضوع نشان می‌دهد که فرآیند تصادفی‌سازی به‌درستی اجرا شده و گروه‌هایی با ویژگی‌های مشابه در آغاز مطالعه ایجاد شده‌اند؛ موضوعی که مبنای محکمی برای مقایسه بین سه گروه تمرین در شیب با گروه کنترل فراهم می‌کند. تحلیل واریانس دوطرفه با اندازه‌گیری مکرر نشان داد که اثر اصلی زمان بر سرعت بیشینه (Vmax) معنادار است ($\eta_p^2 = ۰/۸۲$، $p = ۰/۰۰۱$، $F (۳، ۳۶) = ۱۷۳/۶۸$) که بیانگر آن است که Vmax در طول دوره تمرین به‌طور معناداری تغییر کرده است (جدول ۳). میانگین Vmax در پس‌آزمون برابر با ۰/۸۶ ± ۷/۸۷ متر بر ثانیه و در پیش‌آزمون برابر با ۰/۷۷ ± ۷/۳۷ متر بر ثانیه بود، که نشان‌دهنده افزایش معنادار در پس‌آزمون است. همچنین، اثر اصلی سطح شیب تمرین نیز بر Vmax معنادار بود ($\eta_p^2 = ۰/۲۰$، $p = ۰/۰۴۹$، $F (۳، ۳۶) = ۲/۸۷$). این نتایج نشان می‌دهد که بین گروه‌های تمرینی با شیب‌های مختلف تفاوت معناداری در سرعت بیشینه وجود دارد (جدول ۳). میانگین Vmax در گروه شیب تند (STHG) برابر با ۰/۵۵ ± ۸/۷۴ متر بر ثانیه بود که بیشتر از گروه شیب متوسط (۰/۷۹ ± ۷/۹۳)، گروه شیب ملایم (۰/۵۴ ± ۷/۶۴)، و گروه کنترل (۰/۷۶ ± ۷/۱۶) بود. علاوه بر این، اثر تعاملی بین زمان و سطح شیب نیز معنادار بود ($\eta_p^2 = ۰/۷۸$، $p = ۰/۰۰۱$، $F (۳، ۳۶) = ۴۲/۶۷$)، به این معنا که تأثیر زمان تمرین بر Vmax وابسته به نوع شیب بوده است (جدول ۳).

جدول ۲. میانگین ± انحراف معیار متغیرهای جمعیت‌شناختی و نتایج در آغاز و پایان مطالعه (n = ۴۰)

متغیرها	CG آزمون پیش	CG آزمون پس	SHG آزمون‌پیش	SHG آزمون‌پس	IHG آزمون‌پیش	IHG آزمون‌پس	STHG آزمون‌پیش	STHG آزمون‌پس
سن (سال)	۱۷/۱ ± ۱/۳۷		۱۸/۲ ± ۰/۶۳		۱۸/۶ ± ۱/۰۷		۱۸/۵ ± ۰/۹۷	
قد (متر)	۱/۶۸ ± ۰/۰۵		۱/۷۱ ± ۰/۰۴		۱/۶۸ ± ۰/۰۵		۱/۷۱ ± ۰/۰۴	
وزن (کیلوگرم)	۵۴/۱۰ ± ۴/۰۱		۵۴/۷۰ ± ۳/۸۳		۵۴/۱۰ ± ۴/۰۱		۵۴/۷۰ ± ۳/۸۳	
BMI	۱۸/۹۹ ± ۱/۵۰		۱۸/۷۲ ± ۰/۹۸		۱۸/۹۹ ± ۱/۵۰		۱۸/۶۶ ± ۱/۰۴	
Vmax (ثانیه/متر)	۷/۱۷ ± ۰/۷۶	۷/۱۷ ± ۰/۷۶	۷/۳۱ ± ۰/۵۰	۷/۶۵ ± ۰/۵۵†	۷/۳۴ ± ۱/۰۶	۷/۹۳ ± ۰/۷۹†	۷/۴۶ ± ۰/۷۵	۸/۷۴ ± ۰/۵۵†
SR (هرتز)	۴/۰۹ ± ۰/۳۶	۴/۰۷ ± ۰/۴۵	۴/۱۱ ± ۰/۳۶	۴/۲۱ ± ۰/۳۸	۴/۰۹ ± ۰/۵۳	۴/۷۰ ± ۰/۳۹†	۴/۱۳ ± ۰/۴۱	۵/۰۸ ± ۰/۵۱†
SL (متر)	۱/۷۰ ± ۰/۰۸	۱/۷۰ ± ۰/۰۷	۱/۶۹ ± ۰/۰۹	۱/۷۰ ± ۰/۰۹	۱/۷۵ ± ۰/۰۸	۱/۷۸ ± ۰/۰۸†	۱/۷۴ ± ۰/۱۰	۱/۸۰ ± ۰/۰۸†
CT (میلی‌ثانیه)	۱۲۲ ± ۴/۲۰	۱۲۳ ± ۳/۵۲	۱۲۱ ± ۴/۴۲	۱۲۰ ± ۴/۰۹	۱۲۲ ± ۴/۳۳	۱۲۱ ± ۴/۱۷	۱۲۲ ± ۳/۳۳	۱۲۲ ± ۳/۲۳
FT (میلی‌ثانیه)	۱۱۸ ± ۲/۷۱	۱۱۸ ± ۳/۲۱	۱۱۷ ± ۲/۹۹	۱۱۸ ± ۲/۱۰	۱۱۸ ± ۳/۳۰	۱۱۹ ± ۲/۸۳	۱۱۹ ± ۴/۴۵	۱۲۰ ± ۳/۲۰

† تفاوت معنادار با پیش‌آزمون در سطح ($p < ۰/۰۵$)؛BMI : شاخص توده بدنی، Vmax: سرعت حداکثر دویدن، SR: نرخ گام، SL: طول گام، CT: زمان تماس با زمین، FT: زمان پرواز، STHG: گروه تمرین در شیب تند، IHG: گروه تمرین در شیب متوسط، SHG: گروه تمرین در شیب ملایم، CG: گروه کنترل.

جدول ۳. اثرات اصلی زمان، سطح شیب و تعامل آن‌ها بر متغیرهای پیامدی

متغیر	(زمان)F	سطح معناداری (زمان)	η^2 (زمان)	تفاوت میانگین	(شیب)F	سطح معناداری (شیب)	η^2 (شیب)	F (تعامل)	سطح معناداری (تعامل)	η^2 (تعامل)
سرعت بیشینه (Vmax)	۱۷۳/۶۸	۰/۰۰۱	۰/۸۲	۰/۵۵	۲/۸۷	۰/۰۴۹	۰/۲۰	۴/۲۹۷	۰/۰۱۱	۰/۲۶۴
نرخ گام‌برداری (SR)	۲۹/۷۷۱	۰/۰۰۱	۰/۴۵	۰/۱۵۷	۳/۱۸	۰/۰۳۵	۰/۲۱	۷/۶۷۲	۰/۰۰۱	۰/۳۹۰
طول گام (SL)	۳۹/۰۹	۰/۰۰۱	۰/۵۲	۰/۰۲	۲/۰۸۰	۰/۱۲۰	۰/۱۴۸	۴/۰۲	۰/۰۰۱	۰/۵۲
زمان تماس (CT)	۲/۶۲	۰/۱۱۴	۰/۰۷	-۰/۳۰	۱/۳۴۶	۰/۷۹۲	۰/۰۲۸	۱/۷۰	۰/۱۸۴	۰/۱۲
زمان پرواز (FT)	۳/۱۱	۰/۰۸۷	۰/۰۷۹	۰/۳۵	۰/۷۳۱	۰/۵۴۰	۰/۰۵۷	۰/۰۶۳	۰/۹۸	۰/۰۰۵

جدول ۴. مقایسه زوجی اثرات بین‌گروهی مداخله بر متغیرها

متغیرها	گروه‌های مداخله	اختلاف میانگین	خطای استاندارد	سطح معناداری	۹۵ ٪ فاصله اطمینان	
					حد بالا	حد پایین
حداکثر سرعت (m/s)	STHG – IHG	۴۷/۰	۳۲/۰	۴۸۹/۰	۳۴/۱	-۴۱/۰
	STHG – SHG	۶۲/۰	۳۲/۰	۲۳۶/۰	۵۰/۱	-۲۵/۰
	STHG – CG	۹۳/۰†	۳۲/۰	۰۳۲/۰	۸۱/۱	۰۶/۰
	IHG – SHG	۱۵/۰	۳۲/۰	۹۶۳/۰	۰۳/۱	-۷۲/۰
	IHG – CG	۴۶/۰	۳۲/۰	۴۸۷/۰	۳۴/۱	-۴۱/۰
	SHG – CG	۳۱/۰	۳۲/۰	۷۷۶/۰	۱۸/۱	-۵۶/۰
کادنس (Hz)	STHG – IHG	۲۱/۰	۱۹/۰	۶۸/۰	۷۱/۰	-۲۹/۰
	STHG – SHG	۴۴/۰	۱۹/۰	۱۰/۰	۹۵/۰	-۰۶/۰
	STHG – CG	۵۲/۰†	۱۹/۰	۰۴/۰	۰۳/۱	۰۲/۰
	IHG – SHG	۲۳/۰	۱۹/۰	۵۹/۰	۷۴/۰	-۲۷/۰
	IHG – CG	۳۱/۰	۱۹/۰	۳۵/۰	۸۲/۰	-۱۹/۰
	SHG – CG	۰۸/۰	۱۹/۰	۹۷/۰	۵۸/۰	-۴۲/۰
طول گام (m)	STHG – IHG	۰۱/۰	۰۴/۰	۹۸/۰	۱۲/۰	-۰۹/۰
	STHG – SHG	۰۸/۰	۰۴/۰	۱۴/۰	۱۹/۰	-۰۲/۰
	STHG – CG	۰۸/۰	۰۴/۰	۱۷/۰	۱۸/۰	-۰۲/۰
	IHG – SHG	۰۷/۰	۰۴/۰	۲۸/۰	۱۷/۰	-۰۳/۰
	IHG – CG	۰۶/۰	۰۴/۰	۳۴/۰	۱۷/۰	-۰۴/۰
	SHG – CG	۰۰/۰	۰۴/۰	۹۹/۰	۱۰/۰	-۱۲/۰
زمان تماس (ms)	STHG – IHG	۲۵/۰	۷۴/۱	۹۹/۰	۹۴/۴	-۴۴/۴
	STHG – SHG	۱۰/۱	۷۴/۱	۹۲/۰	۷۹/۵	-۵۹/۳
	STHG – CG	-۶۵/۰	۷۴/۱	۹۸/۰	۰۴/۴	-۳۴/۵
	IHG – SHG	۸۵/۰	۷۴/۱	۹۶/۰	۵۴/۵	-۸۴/۳
	IHG – CG	-۹۰/۰	۷۴/۱	۹۵/۰	۷۹/۳	-۵۹/۵
	SHG – CG	-۷۵/۱	۷۴/۱	۷۵/۰	۹۴/۲	-۴۴/۶
زمان پرواز (ms)	STHG – IHG	۰۰/۱	۳۸/۱	۸۹/۰	۷۳/۴	-۷۳/۲
	STHG – SHG	۹۰/۱	۳۸/۱	۵۲/۰	۶۳/۵	-۸۳/۱
	STHG – CG	۶۰/۱	۳۸/۱	۶۶/۰	۳۳/۵	-۱۳/۲
	IHG – SHG	۹۰/۰	۳۸/۱	۹۱/۰	۶۳/۴	-۸۳/۲
	IHG – CG	۶۰/۰	۳۸/۱	۹۷/۰	۳۳/۴	-۱۳/۳
	SHG – CG	-۳۰/۰	۳۸/۱	۹۹/۰	۴۳/۳	-۰۳/۴

†تفاوت معنادار در سطح ($p < ۰/۰۵$) بر اساس تحلیل واریانس با اندازه‌گیری مکرر دوطرفه و آزمون تعقیبی توکی تعیین شده است؛ Vmax: سرعت بیشینه دویدن، TT: عملکرد آزمون زمان‌دار، SE: استقامت عضلانی، CI: فاصله اطمینان، STHG: گروه با شیب تند، IHG: گروه با شیب متوسط، SHG: گروه با شیب ملایم، CG: گروه کنترل.

نتایج آزمون تعقیبی توکی نشان داد که تغییرات پیش‌آزمون تا پس‌آزمون در گروه شیب تند (STHG): تفاوت میانگین (MΔ) برابر با ۱/۲۸ با فاصله اطمینان ۹۵٪ بین ۱/۱۱ تا ۱/۴۴، (p = ۰۰۱)؛ گروه شیب متوسط (IHG): MΔ برابر با ۰/۵۹، فاصله اطمینان ۹۵٪ بین ۰/۴۲ تا ۰/۷۶، (p = ۰۰۱) و گروه شیب ملایم (SHG): MΔ برابر با ۰/۳۳، فاصله اطمینان ۹۵٪ بین ۰/۱۶ تا ۰/۵۰، (p = ۰۰۱) معنادار بوده است. در گروه کنترل (CG) هیچ تغییر معناداری مشاهده نشد (جدول ۳).

در تحلیل مربوط به نرخ گام‌برداری (SR)، نتایج آزمون تحلیل واریانس دوطرفه با اندازه‌گیری‌های مکرر نشان داد که اثر زمان به‌صورت معناداری برجسته بود (η_p^2 = ۰/۸۴، p = ۰/۰۰۱، F (۱، ۳۶) = ۱۹۴/۲۴)، به‌طوری که نرخ گام‌برداری در پس‌آزمون (۴/۵۲±۰/۵۹ هرتز) به‌طور معناداری بیشتر از پیش‌آزمون (۴/۱۱±۰/۴۱ هرتز) بود. همچنین، اثر اصلی شیب سربالایی نیز معنادار بود (η_p^2 = ۰/۲۰، p = ۰/۰۴۹، F (۳، ۳۶) = ۲/۸۷)، که نشان‌دهنده تفاوت میان سطوح مختلف شیب در نرخ گام‌برداری است. نرخ گام‌برداری در گروه STHG (۵/۰۸±۰/۵۱ هرتز) به‌طور معناداری بیشتر از گروه IHG، SHG و گروه CG بود. همچنین، اثر تعاملی بین زمان و سطح شیب نیز معنادار بود (η_p^2 = ۰/۸۳، p = ۰/۰۰۱، F (۳، ۳۶) = ۵۹/۳۷)، که بیانگر آن است که تغییرات زمانی در نرخ گام‌برداری بسته به شیب مسیر تفاوت داشت. مقایسه‌های آزمون تعقیبی به روش توکی نشان داد که افزایش معنی‌داری در نرخ گام‌برداری (SR) پس از تمرین، در گروه‌های STHG و IHG مشاهده شد (p < ۰/۰۵). اما در گروه SHG و گروه CG تغییری دیده نشد. همچنین نرخ گام‌برداری در گروه شیب تند نسبت به گروه کنترل به‌طور معنی‌داری بیشتر بود، اما بین سایر گروه‌ها تفاوت معنی‌داری وجود نداشت (جدول ۴). در خصوص طول گام (SL) تحلیل نشان داد که اثر اصلی زمان معنادار بود (η_p^2 = ۰/۶۷۹، p = ۰/۰۰۱، F (۱، ۳۶) = ۷۶/۰۳۳)، به‌طوری که طول گام در پس‌آزمون (۱/۷۴±۰/۰۹ متر) به‌طور معناداری بیشتر از پیش‌آزمون (۱/۷۲±۰/۰۹ متر) بود. با این حال، اثر اصلی شیب مسیر بر طول گام معنادار نبود (η_p^2 = ۰/۱۴۸، p = ۰/۱۲۰، F (۳، ۳۶) = ۲/۰۸۰). اثر تعاملی بین زمان و سطح شیب در این متغیر معنادار بود (η_p^2 = ۰/۵۸۱، p = ۰/۰۰۱، F (۳، ۳۶) = ۱۶/۶۱۱)، که بیانگر تفاوت در میزان تغییر طول گام بسته به شیب تمرینی است. نتایج مقایسه‌های آزمون تعقیبی توکی نشان داد که که طول گام (SL) پس از تمرین، در گروه شیب تند (STHG) و شیب متوسط (IHG) به‌طور معنی‌داری افزایش یافت (p < ۰/۰۵). اما در سایر گروه‌ها تفاوتی مشاهده نشد. همچنین زمان تماس (CT) و زمان پرواز (FT) در هیچ‌یک از گروه‌ها تغییر معنی‌داری نداشتند (جدول ۳).

بحث

هدف از این مطالعه بررسی اثرات مزمن تمرین در شیب‌های سربالایی بر ویژگی‌های کینماتیکی دوندگان نیمه‌استقامت بود، با تمرکز ویژه بر شناسایی شیب بهینه‌ای که بتواند به بهترین شکل، ویژگی‌های کینماتیکی این دوندگان را بهبود دهد. یافته‌های اصلی این پژوهش نشان می‌دهند که تمرین در سربالایی با شدت بالا به مدت ۸ هفته می‌تواند تأثیر مثبتی بر برخی ویژگی‌های کینماتیکی کلیدی دوندگان نیمه‌استقامت داشته باشد. به‌طور خاص، حداکثر سرعت (Vmax) در تمامی شیب‌ها بهبود یافت که این بهبود در شیب‌های تند و متوسط قابل‌توجه‌تر بود. اگرچه مطالعاتی که مستقیماً اثرات بلندمدت شیب‌های مختلف تمرین سربالایی را بر Vmax مقایسه کرده باشند محدود هستند، اما یافته‌های ما با پژوهش‌های پیشین هم‌راستا هستند. برای مثال زیورتزیس[1] (۵۱) گزارش کرد که پس از ۱۲ هفته تمرین روی شیب ۸ درجه، سرعت دویدن بیشینه ۳/۳ درصد افزایش یافت. این یافته از این دیدگاه

1. Tziortzis

حمایت می‌کند که شیب‌های تندتر ممکن است منجر به سازگاری‌های عصبی–عضلانی و بیومکانیکی بیشتری شوند که در توسعه سرعت مؤثر هستند.

تفاوت اصلی بین مطالعه حاضر و مطالعه زیبورتزیس در مدت زمان مداخله و میزان شیب است؛ درحالی‌که مطالعه زیبورتزیس از دوره ۱۲ هفته‌ای با شیب ۱۴ درصد استفاده کرده بود، در پژوهش حاضر تنها ۸ هفته تمرین با شیب کمتر (۷/۶ درصد) انجام شد. نکته جالب توجه اینکه، حتی با مدت زمان کمتر و شیب پایین‌تر نیز، سازگاری‌های عملکردی معنی‌داری مشاهده شد. این موضوع نشان می‌دهد که در بازه‌های زمانی نسبتاً کوتاه و با شیب‌های کمتر نیز می‌توان بهبودهای قابل‌توجهی در عملکرد ایجاد کرد. مطالعات مشابه دیگری نیز بهبودهایی در Vmax به میزان ۳/۷ درصد و ۳/۵ درصد با استفاده از شیب ۵/۲۴ درصد در مقایسه با تمرین در سطح صاف گزارش کرده‌اند (۳۴، ۵۲). یکی از تفاوت‌های مهم بین مطالعه حاضر و تحقیقات پیشین در طراحی تمرین است؛ درحالی‌که در مطالعات گذشته از ترکیب تمرین سربالایی و سرپایینی استفاده شده بود، در این مطالعه تنها تأثیر مجزای شیب‌های مختلف سربالایی بررسی شده است. این طراحی به محققان اجازه داده تا درک دقیق‌تری از تأثیر مستقل هر سطح شیب بر سازگاری‌های عملکردی به‌دست آورند.

ازآنجاکه تمرین در شیب سربالایی باعث افزایش مقاومت می‌شود، این نوع تمرین به تقویت قدرت و توان عضلانی کمک می‌کند (۵۳) که این دو مؤلفه برای رسیدن به حداکثر سرعت دویدن اهمیت بالایی دارند. مقاومت ایجاد شده در هنگام دویدن در سربالایی، مستلزم تولید نیروی بیشتر توسط عضلات اندام تحتانی، به‌ویژه عضلات چهارسر ران، همسترینگ‌ها و عضلات ساق پا است. دلیل برتری شیب‌های تندتر نسبت به شیب‌های متوسط و ملایم، در نیاز عضلانی بیشتر نهفته است که منجر به هایپرتروفی (افزایش حجم عضله) و سازگاری‌های عصبی–عضلانی می‌شود و در نتیجه توانایی ورزشکار در تولید سریع نیرو بهبود می‌یابد (۵۴). دویدن در سربالایی به اعمال نیروی بیشتر نیاز دارد که می‌تواند موجب افزایش قدرت و توان عضلانی شده و در نهایت به بهبود شتاب‌گیری و سرعت بیشینه منجر شود (۵۵).

کارایی تمرین در شیب سربالایی با بهبودهایی که در SR و SL مشاهده شد، به‌ویژه در شیب‌های تند و متوسط، بیشتر آشکار شد. این بهبودها در شیب‌های تندتر برجسته‌تر بودند. نتایج مشابهی توسط محققان دیگر نیز گزارش شده است (۳۲، ۵۶) که در آن‌ها بهبود در SR دیده شد ولی تغییر معناداری در SL مشاهده نشد. بااین‌حال، تفاوت کلیدی در طراحی پژوهش‌ها نهفته است؛ مطالعات قبلی از ترکیب تمرین سربالایی و سرپایینی بر روی شیب ۳ درجه استفاده کرده بودند و آن را با تمرین در سطح افقی و گروه کنترل مقایسه کرده بودند، درحالی‌که مطالعه حاضر اثر شیب‌های مختلف سربالایی را به‌طور جداگانه بررسی کرده و بنابراین تحلیل دقیق‌تری از تأثیر هر شیب خاص بر ویژگی‌های کینماتیکی دویدن فراهم آورده است. شایان ذکر است که داده‌های تجربی کافی در ادبیات علمی برای بررسی تغییرات بلندمدت در SR، SL، CT و FT در شیب‌های مختلف سربالایی وجود ندارد. این خلأ علمی، نوآوری و اهمیت مطالعه حاضر را برجسته می‌سازد؛ چراکه اطلاعات جدیدی در مورد سازگاری‌های خاص ناشی از تمرین در شیب‌های مختلف ارائه می‌دهد. بر کسی پوشیده نیست که دویدن در سربالایی باعث تغییر در طول و فرکانس گام‌ها می‌شود و از این طریق به بهبود مکانیک دویدن و تسهیل شتاب‌گیری ورزشکاران کمک می‌کند (۵۷، ۵۸). عملکرد دویدن سرعتی نیازمند آن است که پاها با نرخ بالاتری چرخه گام‌برداری را طی کنند و عضلات نیز سریع‌تر منقبض و کشیده شوند، که این فرآیند وابسته به نرخ گام‌برداری است (۵۹). تمرین سربالایی به‌صورت حاد منجر به افزایش نرخ گام و کاهش طول گام می‌شود، چراکه دوندگان در واکنش به شیب، زانوها را بیشتر بالا می‌آورند و مرکز ثقل خود را در بالای پای جلو حفظ می‌کنند (۶۰، ۶۱). این سازگاری‌ها در بلندمدت، به بهبود

نرخ و طول گام در دویدن در سطح افقی منجر می‌شود. در مقایسه با تمرین در شیب‌های متوسط و ملایم، تمرین در شیب تند، انرژی پتانسیل بیشتری را در بدن ایجاد می‌کند زیرا عضلات اندام تحتانی کار مکانیکی خالص بیشتری را انجام می‌دهند. در این حالت، همه مفاصل – به‌ویژه مفصل ران – توان بیشتری تولید می‌کنند تا نیازهای افزایش‌یافته کار مکانیکی را برآورده سازند. این امر نشان می‌دهد که تمرین در شیب تند در مقایسه با شیب‌های ملایم و متوسط به سطح بالاتری از فعال‌سازی عضلانی نیاز دارد؛ بنابراین، سازگاری‌های ناشی از تمرین در شیب سربالایی مستقیماً بر فعال‌سازی عصبی–عضلانی تأثیر می‌گذارند، که این موضوع تضمین‌کننده کارایی کلی حرکت از جمله نرخ و طول گام خواهد بود (۲۲).

این مطالعه تفاوت معناداری بین گروه‌های تمرینی در Vmax و SR نشان داد، درحالی‌که در سایر متغیرها SL، CT و FT تفاوت معناداری مشاهده نشد. به‌طور خاص، تفاوت معنادار در Vmax و SR در گروه STHG نسبت به گروه کنترل مشاهده شد. این یافته نشان می‌دهد که تمرین در این شیب‌ها به‌طور خاص در بهبود سرعت بیشینه دویدن مؤثر است، احتمالاً به دلیل افزایش تقاضای عصبی–عضلانی و سازگاری‌های بیومکانیکی می‌باشد. درحالی‌که عدم مشاهده تغییرات معنادار در SR و SL در گروه SHG و همچنین در CT و FT در تمام گروه‌های تمرینی ممکن است در نگاه اول غیرمنتظره به نظر برسد، اما توضیحات منطقی متعددی برای آن وجود دارد. یکی از عوامل کلیدی، مدت زمان نسبتاً کوتاه مداخله (۸ هفته) است. بااینکه این مدت زمان برای ایجاد بهبود در برخی شاخص‌ها مانند Vmax و SR کافی بوده، اما ممکن است برای بروز سازگاری‌های ظریف‌تر عصبی–عضلانی و بیومکانیکی در سایر پارامترهای کینماتیکی کافی نبوده باشد. پژوهش‌های پیشین نشان داده‌اند که برای مشاهده تغییرات معنی‌دار در CT وFT ، معمولاً به دوره‌های تمرینی طولانی‌تری نیاز است، به‌ویژه در شرایطی که شدت تمرین متوسط باشد (۶۲). علاوه بر این، ویژگی اختصاصی محرک تمرینی نیز نقش مهمی دارد. ممکن است پروتکل تمرینی بیشتر در جهت بهبود سازگاری‌های مرتبط با سرعت مؤثر بوده باشد تا شاخص‌های زمانی گام مانند CT و FT. به‌عنوان مثال، بهبود در Vmax و SR احتمالاً بیشتر حاصل افزایش تولید نیرو و مکانیک مؤثر گام باشد، درحالی‌که تغییر در CT و FT ممکن است نیازمند تمرینات هدفمندتر، نظیر تمرینات پلایومتریک یا اصلاح تکنیک باشد. مطالعات نشان داده‌اند که تمرینات سرعتی مقاومتی (مانند دویدن در سربالایی) اغلب تأثیر متوسطی بر شتاب‌گیری و فرکانس گام دارند، اما لزوماً تغییراتی در CT یا FT در مقایسه با دویدن سنتی ایجاد نمی‌کنند (۶۳). تفاوت فردی در پاسخ به تمرین نیز عامل مهمی است. اگرچه ویژگی‌های پایه‌ای آزمودنی‌ها در ابتدا تفاوت معناداری نداشت، اما ممکن است ورزشکاران در ویژگی‌های پایه کینماتیکی، کارایی عصبی–عضلانی و میزان سازگاری با تمرین متفاوت باشند که این موضوع می‌تواند بر نحوه پاسخ آن‌ها به یک برنامه تمرینی خاص تأثیر بگذارد. این تفاوت‌های فردی ممکن است باعث کاهش معناداری آماری در سطح گروهی شود، حتی اگر در سطح فردی بهبودهایی مشاهده شده باشد. در نهایت، ممکن است برخی پارامترهای کینماتیکی مانند CT و FT مقاومت بیشتری نسبت به تغییر داشته باشند و برای ایجاد تغییرات قابل‌اندازه‌گیری، نیازمند دوره تمرینی طولانی‌تر یا حجم و شدت تمرین بالاتر باشند (۶۴). مطالعات آینده با دوره‌های مداخله طولانی‌تر، نمونه‌های بزرگ‌تر و روش‌های تمرینی هدفمندتر می‌توانند به روشن شدن بیشتر این روابط کمک کرده و سازوکارهای سازگاری کینماتیکی در اثر تمرین در سربالایی را بهتر تبیین کنند. درحالی‌که این مطالعه برای نخستین بار اثرات مزمن سه شیب مختلف سربالایی را بر ویژگی‌های کینماتیکی دوندگان نیمه‌استقامت مقایسه کرده است، دارای محدودیت‌های روش‌شناختی نیز هست که باید در پژوهش‌های آتی مدنظر قرار گیرد. به دلیل محدودیت در تعداد آزمودنی‌ها در محیط میدانی، این مطالعه شامل ورزشکارانی با تجارب تمرینی متفاوت (از ۶ ماه تا ۴ سال) و جنسیت‌های مختلف بود. این تنوع ممکن است بر نتایج تأثیر گذاشته باشد، چراکه ورزشکاران در مراحل مختلف تمرینی و با توجه به تفاوت‌های جنسیتی ممکن است واکنش‌های متفاوتی به یک برنامه تمرینی مشابه داشته

باشند. این تنوع جمعیت نمونه می‌تواند به‌عنوان یک محدودیت در نظر گرفته شود. بااین‌حال، انجام مطالعه مداخله‌ای بر روی ورزشکارانی که دارای تجربه تمرینی هستند، همراه با استفاده از یک پروتکل تمرینی کنترل‌شده و معتبر، می‌تواند به‌عنوان یک نقطه قوت در این پژوهش و در توسعه آتی برنامه‌های تمرینی مؤثر تلقی شود. مطالعات آینده باید به بررسی اثر بار تمرینی، دفعات تمرین، مدت زمان برنامه تمرینی و شیب‌های تندتر بر شاخص‌های عملکردی فیزیولوژیکی بپردازند.

نتیجه‌گیری نهایی

مطالعه حاضر به بررسی تأثیر شیب‌های مختلف تمرین در سربالایی بر ویژگی‌های کینماتیکی دوندگان نیمه‌استقامت پرداخت. نتایج این پژوهش نشان داد که تمرین در شیب سربالایی تأثیرات مثبتی بر برخی ویژگی‌های کلیدی کینماتیکی دوندگان نیمه‌استقامت دارد که با حداکثر سرعت دویدن در ارتباط هستند. بهبود در سرعت بیشینه (Vmax) با ارتقاء SR و SL، به‌ویژه در شیب‌های تند، پشتیبانی شد. به نظر می‌رسد که شیب‌های مختلف تمرین در سربالایی منجر به سازگاری‌های تمرینی خاصی می‌شوند؛ بنابراین، تمرین در سربالایی باید با در نظر گرفتن توانایی‌ها و محدودیت‌های فردی هر ورزشکار به‌دقت طراحی شود. تا زمانی که شواهد بیشتری در دسترس باشد، دوندگان می‌توانند فرض کنند که تغییر در بار تمرینات سربالایی (از طریق تنظیم شیب) می‌تواند به بهبود ویژگی‌های کینماتیکی کلیدی منجر شود. این نوع تمرین می‌تواند برای دوندگان نیمه‌استقامت که به ظرفیت بی‌هوازی بالا نیاز دارند، کاربردی و مؤثر باشد؛ چراکه این ورزشکاران باید توان بالایی را از طریق نیروهای عکس‌العمل زمین تولید کنند تا بتوانند در مسافت‌های متوسط، با سرعت بالا بدوند (۶۵). همچنین، استفاده از شیب‌های متوسط می‌تواند برای مسافت‌های طولانی‌تر مفید باشد، چراکه به توان خروجی کمتری نیاز داشته و با بهبود مکانیک دویدن و صرفه‌جویی در انرژی، موجب ارتقاء اقتصاد دویدن می‌شود (۶۶). در نهایت، مربیان و ورزشکاران باید تمرین در شیب سربالایی را به‌عنوان یک استراتژی تمرینی مؤثر و جایگزین قابل‌اتکا برای بهبود ویژگی‌های کینماتیکی دوندگان نیمه‌استقامت در نظر بگیرند.

ملاحظات اخلاقی

پیروی از اصول اخلاق پژوهش

این مطالعه با رعایت کامل دستورالعمل‌ها و اصول اخلاقی مرتبط با پژوهش بر روی انسان انجام شد. طرح تحقیق توسط کمیته بازبینی اخلاق دانشگاه باهیر دار، دانشکده علوم ورزشی (شماره پروتکل: IRERC 05/2024) مورد تأیید قرار گرفت. والدین یا سرپرستان قانونی شرکت‌کنندگان و همچنین خودِ شرکت‌کنندگان، پیش از آغاز مطالعه از ماهیت مداخله و عوارض احتمالی آن آگاه شدند و فرم رضایت‌نامه آگاهانه را امضا کردند.

حامی مالی

نویسندگان اعلام می‌کنند که حمایت مالی برای انجام این مطالعه از سوی دانشگاه باهیر دار تأمین شده است. این حمایت مالی نقش مهمی در پیشبرد فرآیند تحقیق ایفا کرده است.

مشارکت نویسندگان

YA، TTو ZB ایده‌پردازی و طراحی مطالعه را انجام دادند. YA و ZB آزمایش‌ها را اجرا کرده و داده‌ها را جمع‌آوری کردند. تجزیه‌وتحلیل داده‌ها توسط YA، TTو ZB انجام شد. نگارش نسخه نهایی مقاله نیز توسط YA، TTو ZB انجام گرفت. تمامی نویسندگان مقاله را خوانده و تأیید کرده‌اند.

تعارض

بنابر اظهار نویسندگان، این مقاله تعارض منافع ندارد.

Reference

1. Trowell D, Phillips E, Saunders P, Bonacci J. The relationship between performance and biomechanics in middle-distance runners. Sports Biomechanics. 2021;20(8):974-84. [DOI:10.1080/14763141.2019.1630478] [PMID]

2. Hayes P, Caplan N. Foot strike patterns and ground contact times during high-calibre middle-distance races. Journal of sports sciences. 2012;30(12):1275-83. [DOI:10.1080/02640414.2012.707326] [PMID]

3. Brandon LJ. Physiological factors associated with middle distance running performance. Sports medicine. 1995;19:268-77. [DOI:10.2165/00007256-199519040-00004] [PMID]

4. Padilla S, Bourdin M, Barthelemy J, Lacour J. Physiological correlates of middle-distance running performance: A comparative study between men and women. European journal of applied physiology and occupational physiology. 1992;65(6):561-6. [DOI:10.1007/BF00602366] [PMID]

5. Thompson MA. Physiological and Biomechanical Mechanisms of Distance Specific Human Running Performance. Integr Comp Biol. 2017;57(2):293-300. [DOI:10.1093/icb/icx069] [PMID]

6. Padulo J, Degortes N, Migliaccio G, Attene G, Smith L, Salernitano G, et al. Footstep manipulation during uphill running. International journal of sports medicine. 2012:244-7. [DOI:10.1055/s-0032-1323724] [PMID]

7. Padulo J, Annino G, Smith L, Migliaccio G, Camino R, Tihanyi J, et al. Uphill running at iso-efficiency speed. International journal of sports medicine. 2012:819-23. [DOI:10.1055/s-0032-1311588] [PMID]

8. Novacheck TF. The biomechanics of running. Gait Posture. 1998;7(1):77-95. [DOI:10.1016/S0966-6362(97)00038-6] [PMID]

9. Seidl T, Linke D, Lames M. Estimation and validation of spatio-temporal parameters for sprint running using a radio-based tracking system. Journal of Biomechanics. 2017;65:89-95. [DOI:10.1016/j.jbiomech.2017.10.003] [PMID]

10. Padulo J, Annino G, Smith L, Migliaccio GM, Camino R, Tihanyi J, et al. Uphill running at iso-efficiency speed. Int J Sports Med. 2012;33(10):819-23. [DOI:10.1055/s-0032-1311588] [PMID]

11. García-Pinillos F, Latorre-Román PÁ, Ramírez-Campillo R, Párraga-Montilla JA, Roche-Seruendo LE. How does the slope gradient affect spatiotemporal parameters during running? Influence of athletic level and vertical and leg stiffness. Gait & posture. 2019;68:72-7. [DOI:10.1016/j.gaitpost.2018.11.008] [PMID]

12. Lussiana T, Fabre N, Hébert-Losier K, Mourot L. Effect of slope and footwear on running economy and kinematics. Scandinavian Journal of Medicine & Science in Sports. 2013;23(4):e246-e53. [DOI:10.1111/sms.12057] [PMID]

13. Swinnen W, Mylle I, Hoogkamer W, F DEG, Vanwanseele B. Changing Stride Frequency Alters Average Joint Power and Power Distributions during Ground Contact and Leg Swing in Running. Med Sci Sports Exerc. 2021;53(10):2111-8. [DOI:10.1249/MSS.0000000000002692] [PMID]

14. Van Hooren B, Jukic I, Cox M, Frenken KG, Bautista I, Moore IS. The Relationship Between Running Biomechanics and Running Economy: A Systematic Review and Meta-Analysis of Observational Studies. Sports Med. 2024;54(5):1269-316. [DOI:10.1007/s40279-024-01997-3] [PMID]

15. Hunter I, Lee K, Ward J, Tracy J. Self-optimization of Stride Length Among Experienced and Inexperienced Runners. Int J Exerc Sci. 2017;10(3):446-53. [DOI:10.70252/LSDP6161] [PMID]

16. Santos-Concejero J, Granados C, Irazusta J, Bidaurrazaga-Letona I, Zabala-Lili J, Tam N, et al. Differences in ground contact time explain the less efficient running economy in north african runners. Biol Sport. 2013;30(3):181-7. [DOI:10.5604/20831862.1059170] [PMID]

17. Almasi J, Shabazbigian MM. The Effect of Six Weeks of High-Intensity Interval Training with and without Coenzyme Q10 Supplementation on Bench Press and Squat Strength in Competitive Male Bodybuilders. Journal of Sport Biomechanics. 2025;11(1):80-92. [DOI:10.61186/JSportBiomech.11.1.80]

18. Hashim H, Mohammed SA, Mohammed Ali B, Ismaeel SA, Nasir M. Biceps and Triceps Muscle Activation Under Progressive Loads: A Study on Functional Symmetry of the Upper Limbs. Journal of Sport Biomechanics. 2025;11(1):64-78. [DOI:10.61186/JSportBiomech.11.1.64]

19. Padulo J, Annino G, Migliaccio GM, D'Ottavio S, Tihanyi J. Kinematics of Running at Different Slopes and Speeds. The Journal of Strength & Conditioning Research. 2012;26(5):1331-9. [DOI:10.1519/JSC.0b013e318231aafa] [PMID]

20. Padulo J, Powell D, Milia R, Ardigò LP. A paradigm of uphill running. PloS one. 2013;8(7):e69006. [DOI:10.1371/journal.pone.0069006] [PMID]

21. Paradisis GP, Cooke CB. Kinematic and postural characteristics of sprint running on sloping surfaces. Journal of Sports Sciences. 2001;19(2):149-59. [DOI:10.1080/026404101300036370] [PMID]

22. Vernillo G, Giandolini M, Edwards WB, Morin J-B, Samozino P, Horvais N, et al. Biomechanics and physiology of uphill and downhill running. Sports Medicine. 2017;47(4):615-29. [DOI:10.1007/s40279-016-0605-y] [PMID]

23. Gómez-Molina J, Ogueta-Alday A, Stickley C, Cámara J, Cabrejas-Ugartondo J, García-López J. Differences in spatiotemporal parameters between trained runners and untrained participants. The Journal of Strength & Conditioning Research. 2017;31(8):2169-75. [DOI:10.1519/JSC.0000000000001679] [PMID]

24. Padulo J, Powell D, Milia R, Ardigo LP. A paradigm of uphill running. PLoS One. 2013;8(7):e69006. [DOI:10.1371/journal.pone.0069006] [PMID]

25. Vernillo G, Giandolini M, Edwards WB, Morin JB, Samozino P, Horvais N, et al. Biomechanics and Physiology of Uphill and Downhill Running. Sports Med. 2017;47(4):615-29. [DOI:10.1007/s40279-016-0605-y] [PMID]

26. Heiderscheit BC, Chumanov ES, Michalski MP, Wille CM, Ryan MB. Effects of step rate manipulation on joint mechanics during running. Medicine and science in sports and exercise. 2011;43(2):296. [DOI:10.1249/MSS.0b013e3181ebedf4] [PMID]

27. Daoud AI, Geissler GJ, Wang F, Saretsky J, Daoud YA, Lieberman DE. Foot strike and injury rates in endurance runners: a retrospective study. Med Sci Sports Exerc. 2012;44(7):1325-34. [DOI:10.1249/MSS.0b013e3182465115] [PMID]

28. Dutto DJ, Smith GA. Changes in spring-mass characteristics during treadmill running to exhaustion. Medicine & Science in Sports & Exercise. 2002;34(8):1324-31. [DOI:10.1097/00005768-200208000-00014] [PMID]

29. Lemire, Falbriard, Aminian, Millet, Meyer. Level, Uphill, and Downhill Running Economy Values Are Correlated Except on Steep Slopes. Front Physiol. 2021;12:697315. [DOI:10.3389/fphys.2021.697315] [PMID]

30. Sá Filho AS, Machado S. Acute effect of uphill running: current scenario and future hypotheses. MedicalExpress. 2018;5. [DOI:10.5935/MedicalExpress.2018.mr.001]

31. Roussos T, Smirniotoy A, Philippou A, Galanos A, Triantafyllopoulos I. Effect of Running Environment and Slope Gradient on Lower Limb Muscle Activation. American Journal of Sports Science. 2019;7:20-5. [DOI:10.11648/j.ajss.20190701.14]

32. Paradisis GP, Bissas A, Cooke CB. Combined uphill and downhill sprint running training is more efficacious than horizontal. Int J Sports Physiol Perform. 2009;4(2):229-43. [DOI:10.1123/ijspp.4.2.229] [PMID]

33. Paradisis GP, Bissas A, Cooke CB. Effect of combined uphill-downhill sprint training on kinematics and maximum running speed in experienced sprinters. International Journal of Sports Science & Coaching. 2015;10(5):887-97. [DOI:10.1260/1747-9541.10.5.887]

34. Bissas A, Paradisis GP, Nicholson G, Walker J, Hanley B, Havenetidis K, et al. Development and Maintenance of Sprint Training Adaptations: An Uphill-Downhill Study. J Strength Cond Res. 2022;36(1):90-8. [DOI:10.1519/JSC.0000000000003409] [PMID]

35. Granata K, Padua D, Wilson S. Gender differences in active musculoskeletal stiffness. Part II. Quantification of leg stiffness during functional hopping tasks. Journal of Electromyography and Kinesiology. 2002;12(2):127-35. [DOI:10.1016/S1050-6411(02)00003-2] [PMID]

36. Gottschall JS, Kram R. Ground reaction forces during downhill and uphill running. Journal of biomechanics. 2005;38(3):445-52. [DOI:10.1016/j.jbiomech.2004.04.023] [PMID]

37. Lazzer S, Salvadego D, Taboga P, Rejc E, Giovanelli N, di Prampero PE. Effects of the Etna uphill ultramarathon on energy cost and mechanics of running. Int J Sports Physiol Perform. 2015;10(2):238-47. [DOI:10.1123/ijspp.2014-0057] [PMID]

38. Snyder KL, Farley CT. Energetically optimal stride frequency in running: the effects of incline and decline. Journal of Experimental Biology. 2011;214(12):2089-95. [DOI:10.1242/jeb.053157] [PMID]

39. Davey RC, Hayes M, Norman JM. Speed, Gradient and Workrate in Uphill Running. The Journal of the Operational Research Society. 1995;46(1):43-9. [DOI:10.1057/jors.1995.5]

40. Neef Md. Gradients and cycling: an introduction: The Climbing Cyclist; 2013 [Available from: https://theclimbingcyclist.com/gradients-and-cycling-an-introduction/?form=MG0AV3.

41. Ward A. WHAT IS THE BEST GRADIENT FOR HILL REPS? : Tri Training Harder; 2023 [Available from: https://tritrainingharder.com/blog/2022/06/what-is-the-best-gradient-for-hill-reps.

42. Moher D, Hopewell S, Schulz KF, Montori V, Gøtzsche PC, Devereaux PJ, et al. CONSORT 2010 explanation and elaboration: updated guidelines for reporting parallel group randomised trials. Bmj. 2010;340:c869. [DOI:10.1136/bmj.c869] [PMID]

43. Faul F, Erdfelder E, Lang A-G, Buchner A. G* Power 3: A flexible statistical power analysis program for the social, behavioral, and biomedical sciences. Behavior research methods. 2007;39(2):175-91. [DOI:10.3758/BF03193146] [PMID]

44. Moran J, Sandercock G, Rumpf MC, Parry DA. Variation in responses to sprint training in male youth athletes: a meta-analysis. International Journal of Sports Medicine. 2017;38(01):1-11. [DOI:10.1055/s-0042-111439] [PMID]

45. Blondel N, Berthoin S, Billat V, Lensel G. Relationship between run times to exhaustion at 90, 100, 120, and 140% of vVO2max and velocity expressed relatively to critical velocity and maximal velocity. Int J Sports Med. 2001;22(1):27-33. [DOI:10.1055/s-2001-11357] [PMID]

46. Buchheit M, Haydar B, Ahmaidi S. Repeated sprints with directional changes: do angles matter? J Sports Sci. 2012;30(6):555-62. [DOI:10.1080/02640414.2012.658079] [PMID]

47. Çelik MA, Özdal M, Vural M. The effect of inspiratory muscle warm-up protocol on acceleration and maximal speed in 12-14 years old children. European Journal of Physical Education and Sport Science. 2021;6(11). [DOI:10.46827/ejpe.v6i11.3642]

48. Lesinski M, Muehlbauer T, Büsch D, Granacher U. Effects of complex training on strength and speed performance in athletes : a systematic review ; effects of complex training on athletic performance. Sports injury, sports damage. 2014;28(02):85-107.

49. Barnes, Hopkins W, McGuigan M, Kilding A. Effects of different uphill interval-training programs on running economy and performance. Int J Sports Physiol Perform. 2013;8(6):639-47. [DOI:10.1123/ijspp.8.6.639] [PMID]

50. Batterham AM, Hopkins WG. Making meaningful inferences about magnitudes. Int J Sports Physiol Perform. 2006;1(1):50-7. [DOI:10.1123/ijspp.1.1.50]

51. Tziortzis S. Effects of training methods in sprinting performance (Doctoral dissertation, Doctoral Dissertation. University of Athens, Dept. of Physical Education and Sport Science, Athens, Greece); 1991.

52. Paradisis GP, Cooke CB. The effects of sprint running training on sloping surfaces. J Strength Cond Res. 2006;20(4):767-77. [DOI:10.1519/00124278-200611000-00008] [PMID]

53. Antono M, Nugroho R. Pengaruh Latihan Uphill Dan Downhill Running Terhadap Power Tungkai Siswa Ssb Artajusi Lampung Utara. Journal Of Physical Education. 2022;3:19-25. [DOI:10.33365/joupe.v3i2.1902]

54. Paradisis G, Cooke C, Bissas A. Changes in Leg Strength and Kinematics with Uphill - Downhill Sprint Training. International Journal of Sports Science & Coaching. 2013;8:543-56. [DOI:10.1260/1747-9541.8.3.543]

55. Zoran Pajić, Duško Ilić, Vladimir Mrdaković, Nenad Janković, Rajković Ž. Influence of training with inertional load on ability of force development and maximal running velocity. Journal of sport scieneses and physical education. 2008(62):29-65.

56. Paradisis GP, Bissas A, Cooke CB. Changes in leg strength and kinematics with uphill-downhill sprint training. International Journal of Sports Science & Coaching. 2013;8(3):543-56. [DOI:10.1260/1747-9541.8.3.543]

57. Lata K, Dubey R. The Biomechanical Effects of Uphill Training on Acceleration on Under 17 Yr Male and Female Athletes. Imperial journal of interdisciplinary research 2016;2(11).

58. Swanson SC, Caldwell GE. An integrated biomechanical analysis of high speed incline and level treadmill running. Medicine and science in sports and exercise. 2000;32(6):1146-55. [DOI:10.1097/00005768-200006000-00018] [PMID]

59. Miller RH, Umberger BR, Caldwell GE. Limitations to maximum sprinting speed imposed by muscle mechanical properties. J Biomech. 2012;45(6):1092-7. [DOI:10.1016/j.jbiomech.2011.04.040] [PMID]

60. Lata K, Rakesh. The Relationship of Hill Training With Stride Rate among Under 17 Year Athletics Trainees. Imperial journal of interdisciplinary research. 2016;2.

61. Vermand S, Ferrari FJ, Cherdo F, Garson C, Lavenant M, Alex MC, et al. Running biomechanical alterations during a 40-km mountain race. The journal of sports medicine and physical fitness. 2022;62(10):1323-8. [DOI:10.23736/S0022-4707.22.13049-5] [PMID]

62. Hardin EC, van den Bogert AJ, Hamill J. Kinematic adaptations during running: effects of footwear, surface, and duration. Med Sci Sports Exerc. 2004;36(5):838-44. [DOI:10.1249/01.MSS.0000126605.65966.40] [PMID]

63. Myrvang S, van den Tillaar R. The Longitudinal Effects of Resisted and Assisted Sprint Training on Sprint Kinematics, Acceleration, and Maximum Velocity: A Systematic Review and Meta-analysis. Sports Medicine - Open. 2024;10(1):110. [DOI:10.1186/s40798-024-00777-7] [PMID]

64. Myrvang S, van den Tillaar R. The Longitudinal Effects of Resisted and Assisted Sprint Training on Sprint Kinematics, Acceleration, and Maximum Velocity: A Systematic Review and Meta-analysis. Sports Med Open. 2024;10(1):110. [DOI:10.1186/s40798-024-00777-7] [PMID]

65. Thompson MA. Physiological and Biomechanical Mechanisms of Distance Specific Human Running Performance. Integrative and Comparative Biology. 2017;57(2):293-300. [DOI:10.1093/icb/icx069] [PMID]

66. Weston AR, Mbambo Z, Myburgh KH. Running economy of African and Caucasian distance runners. Med Sci Sports Exerc. 2000;32(6):1130-4. [DOI:10.1097/00005768-200006000-00015] [PMID]