Journal of
Sport Biomechanics

Autumn 2026. Vol 12. Issue 3

Research Paper

Effect of a Post-Activation Potentiation-Based Plyometric Warm-Up on Hand and Pelvis Linear Velocity During the Gyaku-Zuki Punch: A Quasi-Experimental Study

Sina Najafpour[1], Hamed Fadaei[1], *Hakimeh Adigozali[2], Amir Ghiami Rad[3]

1. Department of Sports Biomechanics, Faculty of Physical Education and Sport Sciences, Kharazmi University, Tehran, Iran.
2. Department of Physiotherapy, Faculty of Rehabilitation Sciences, Tabriz University of Medical Sciences, Tabriz, Iran.
3. Department of Motor Behavior, Faculty of Physical Education and Sport Sciences, University of Tabriz, Tabriz, Iran.

Use your device to scan and read the article online

Citation: Najafpour S, Fadaei H, Adigozali H, Ghiami Rad A. Effect of a Post-Activation Potentiation-Based Plyometric Warm-Up on Hand and Pelvis Linear Velocity During the Gyaku-Zuki Punch: A Quasi-Experimental Study. Journal of Sport Biomechanics.2026;12(3):372-393. https://doi.org/10.66224/JSportBiomech.12.3.372

https://doi.org/10.66224/JSportBiomech.12.3.372

ABSTRACT

Objective Post-activation potentiation (PAP) warm-up has been proposed as an effective strategy to enhance athletic performance and muscular power. This study aimed to investigate the effects of a plyometric-based PAP warm-up on hand and pelvis linear velocity during the execution of a gyaku-zuki punch in male karate athletes.

Methods In this quasi-experimental study, 19 male karate athletes completed two warm-up protocols, including a standard warm-up and a standard warm-up combined with a PAP protocol consisting of tuck jumps. Kinematic data were collected using a three-dimensional motion capture system. The assessed variables included maximum and mean hand and pelvis velocity, reaction time, punch frequency, and fatigue rate.

Results The PAP protocol significantly increased maximum hand velocity ($\Delta = 0.098$ m/s, $p = 0.045$), maximum pelvis velocity ($\Delta = 0.010$ m/s, $p = 0.031$), and fatigue rate ($\Delta = 0.642$, $p = 0.040$), while significantly reducing reaction time ($\Delta = -0.010$ s, $p = 0.039$). A significant positive correlation was observed between changes in maximum pelvis velocity and maximum hand velocity ($r = 0.537$, $p = 0.018$). No significant differences were found in mean velocity or punch frequency ($p > 0.05$).

Conclusion Compared with the traditional warm-up, the PAP-based plyometric warm-up enhanced peak pelvis and hand velocity and improved reaction time during the gyaku-zuki punch. Although the protocol increased fatigue rate, its performance-enhancing effects suggest that it may serve as a practical strategy for optimizing explosive performance and designing individualized warm-up programs for short-duration karate competitions.

Article Info:

Received: 14 December 2025

Accepted: 26 May 2026

Available Online: 15 June 2026

Keywords:

Post-activation potentiation, Plyometric exercise, Warm-up, Karate, Punch velocity

Corresponding Author:
Hakimeh Adigozali
Address: Department of Physiotherapy, Faculty of Rehabilitation Sciences, Tabriz University of Medical Sciences, Tabriz, Iran.
E-mail: adigozalih@tbzmed.ac.ir

This is an open access article distributed under the terms of the Creative Commons Attribution 4.0 International License (CC BY 4.0), which permits unrestricted use, distribution, adaptation, and reproduction in any medium or format, provided the original author(s) and the source are credited.
© 2026 The Author(s). Journal of Sport Biomechanics published by Islamic Azad University, Hamedan Branch.

1. Introduction

Karate is one of the most popular martial arts worldwide and is characterized by fast, precise, and coordinated movements of both the upper and lower extremities. Success in this sport depends not only on physical strength and endurance but also on precise neuromuscular coordination (1). In competitive kumite, punches are primarily used to score points and are executed in a controlled and rapid manner to minimize harm to the opponent. Among hand techniques, the gyaku-zuki (reverse punch) is recognized as one of the most effective and frequently used techniques (2). This technique is considered one of the most important striking techniques in karate, and its successful execution requires efficient force transfer from the lower to the upper body. Force generation begins in the legs and is transmitted through the pelvis, trunk, and shoulder before reaching the arm. This sequence represents a classic example of the kinetic chain, in which pelvis rotation contributes to increasing the final hand velocity, a factor of particular importance in short-duration explosive matches (3).

Although karate is generally considered a relatively safe sport, its contact and explosive nature expose athletes to various injuries involving both the upper body, such as the shoulder and elbow, and the lower body, such as the ankle and knee (4). To reduce injury risk, neuromuscular training programs that incorporate flexibility, strength, balance, and plyometric exercises are considered essential (5). Proprioceptive and balance-based interventions have been shown to reduce the risk of anterior cruciate ligament injury in young and novice athletes by as much as 50% (6). Furthermore, regular training programs that include warm-up, cool-down, and targeted stretching are regarded as important components of physical preparation for martial artists (7). An active warm-up prior to training or competition is commonly performed to increase blood flow, oxygen delivery to muscles, flexibility, and motor coordination. Research has demonstrated that active warm-up protocols provide greater benefits than passive warm-up and may reduce injury incidence in contact sports (8, 9). However, stretching exercises, particularly when performed before explosive activities, may reduce muscle strength and power by 5–10% (10). Consequently, post-activation potentiation (PAP) protocols have gained considerable attention as an alternative strategy for enhancing performance (11, 12). PAP involves maximal or near-maximal contractions, including isometric, dynamic, and plyometric exercises, to facilitate motor unit recruitment, increase muscle power, and improve explosive athletic performance (13). Proposed mechanisms underlying PAP include phosphorylation of myosin regulatory light chains and enhanced neural activation, resulting in improved force production (14).

Plyometric exercises utilize the stretch-shortening cycle to enhance force production capacity, increase contraction velocity, and reduce the time required to generate force throughout the range of motion (15, 16). These characteristics are particularly relevant to karate punching techniques, which require precise neuromuscular coordination and efficient transfer of body-generated torque (17). Previous studies have reported that plyometric exercises can improve reaction time (18). In combat sport athletes, PAP-based plyometric protocols have also been shown to influence punch or kick performance variables, while no significant changes in fatigue rate have been observed (19). Therefore, combining active warm-up procedures with PAP-based plyometric exercises may provide an effective approach for enhancing explosive performance. Despite growing interest in PAP interventions, limited information is available regarding their effects on the kinematic characteristics of karate punching performance, particularly the contribution of pelvis motion within the kinetic chain. Therefore, the present study aimed to investigate the effects of a PAP-based plyometric warm-up on hand and pelvis linear velocity, reaction time, punch frequency, and fatigue rate during the execution of the gyaku-zuki punch in male karate athletes. The findings may provide useful information for coaches and athletes when designing warm-up strategies for short-duration karate competitions.

2. Methods

This quasi-experimental study employed a pre-test–post-test design to investigate the effects of a plyometric post-activation potentiation (PAP) protocol on gyaku-zuki punch kinematics in male karate athletes. The study was conducted in 2025 at the Biomechanics Laboratory of the Faculty of Rehabilitation Sciences, Tabriz University of Medical Sciences, Tabriz, Iran. Participants completed three sessions, including one familiarization session and two experimental sessions separated by 48–72 hours. The

experimental conditions consisted of: (1) a standard warm-up followed by the execution of the gyaku-zuki punch, and (2) a PAP protocol consisting of a standard warm-up combined with three sets of five maximal two-leg tuck jumps, followed by the execution of the gyaku-zuki punch. Kinematic variables, including maximum and mean velocity of the hand and pelvis, reaction time, punch frequency, and fatigue rate, were measured and analyzed using a three-dimensional motion capture system. Based on a G*Power analysis (version 3.1.9.4, Heinrich Heine University Düsseldorf, Germany), assuming an effect size of d = 0.60, a statistical power of 0.80, and $\alpha = 0.05$, a sample size of 19 participants was required (20).

Nineteen Shotokan karate athletes were recruited through cooperation with the national karate federation and the provincial karate board. Inclusion criteria were male sex, right-handedness confirmed by the Edinburgh Handedness Questionnaire, absence of any medical condition limiting physical activity, engagement in at least 150 minutes of moderate-intensity physical activity per week, and age between 18 and 25 years. Exclusion criteria included any musculoskeletal injury, use of supplements or performance-enhancing substances during the previous six months, and participation in additional organized sports activities outside the study protocol. All participants received a detailed explanation of the study procedures and voluntarily signed an informed consent form before participation. The study protocol was approved by the Ethics Committee of Tabriz University of Medical Sciences (IR.TBZMED.REC.1403.908).

Punch kinematics were recorded using a three-dimensional motion capture system consisting of nine infrared cameras (Kestrel 2200, Motion Analysis Corporation, Santa Rosa, CA, USA) with a sampling frequency of 340 Hz (21). Fifty-six passive reflective markers (14 mm diameter) were attached to prominent anatomical landmarks (Fig. 1). Markers were placed on the first and fifth metatarsophalangeal joints, heels, malleoli, femoral epicondyles, anterior superior iliac spines, iliac crests, acromial processes, jugular notch, xiphoid process, humerus, radius, ulna, and the second and fifth metacarpals. Additional cluster markers were attached to the thighs and shanks (22). The system was calibrated before each testing session, yielding an average calibration error of less than 1 mm. Data collection was performed under controlled laboratory conditions (23 ± 1°C and 42 ± 2% relative humidity). Raw kinematic data were processed using Cortex software (version 7.2.16, Motion Analysis Corporation) and filtered with a fourth-order low-pass Butterworth filter with a cutoff frequency of 12 Hz. A six-degree-of-freedom biomechanical model was constructed in Visual3D software (version 6.01, C-Motion Inc., USA) based on a static calibration trial (19). Joint angles were calculated using the Cardan-Euler rotation sequence (Y-X-Z) according to International Society of Biomechanics (ISB) recommendations (23).

Specific marker sets were used to model different body segments. As shown in Fig. 2, the distal hand segment was defined using the second and fifth metacarpal markers, whereas the proximal segment was defined using the radius and ulna markers (22). Pelvis modeling was performed according to the CODA protocol, in which the pelvis was represented as a triangular structure. The vertices of this triangle consisted of the left and right anterior superior iliac spine markers and a posterior midpoint marker. Iliac crest markers were additionally used to improve tracking accuracy (24).

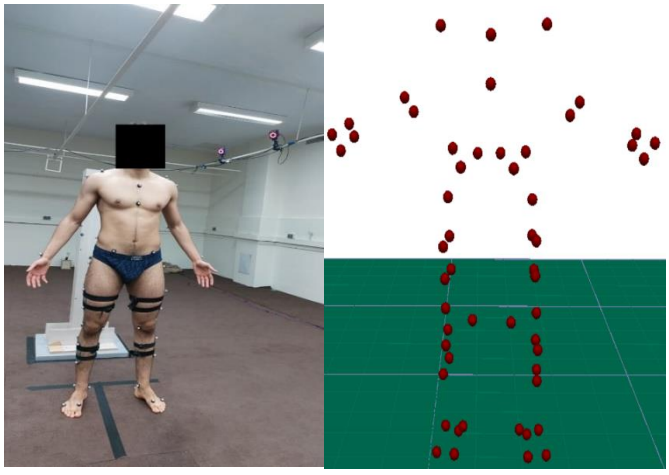


Fig. 1. Schematic view of the marker placement on the body and target configuration in the static position for recording kinematic data

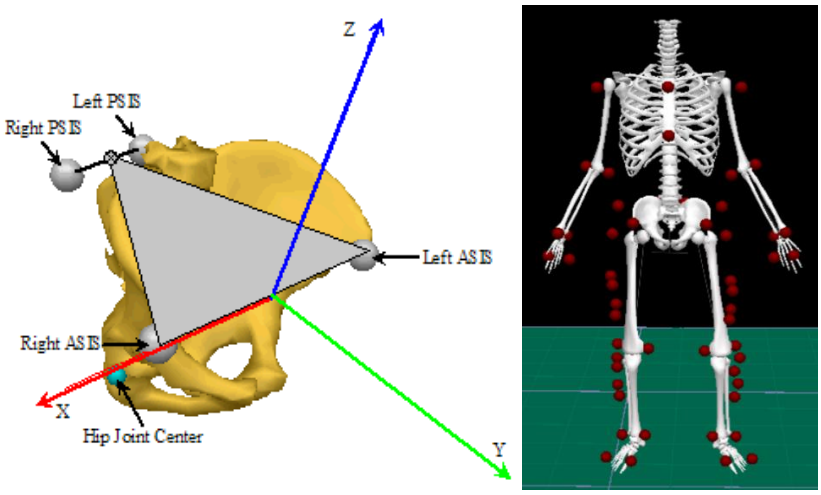


Fig. 2. Marker placement and 3D modeling of the whole body, simulation of the pelvis as a triangle, the origin of the axes, and the orientation of the local coordinate system axes based on the CODA protocol

Fig. 3. Gyaku-zuki punching style for study participants: Left foot forward, right foot back at a distance twice the shoulder width, rear heel on the ground, left knee bent at a 90-degree angle, kneecap aligned with the toes; the punch is delivered between the navel and the xiphoid process.

The onset and termination of each punch were identified from the wrist velocity–time curve using a threshold of three standard deviations above baseline velocity. Reaction time was defined as the interval between the auditory stimulus and the onset of right wrist movement (25, 26). For each punch cycle, mean punch velocity and peak punch velocity were calculated, and the highest value obtained by each participant was selected for analysis. Punch frequency was defined as the number of successful punches performed within a specified time interval. A successful punch was defined as a complete punch cycle in which the elbow reached maximal extension. Fatigue rate (FR) was calculated using the successful punch counts obtained across multiple sets (Equation 1). This index quantifies the decline in performance across successive sets, with higher values indicating greater fatigue accumulation (27).

Equation 1

$$FR\ \% = \left(1 - \frac{N1 + N2 + N3 + N4 + N5}{\max N \times 5}\right) \times 100$$

Where:
N = number of successful punches in each set
max N = highest number of successful punches recorded among all sets
Participants completed three testing sessions. All sessions were conducted between 8:00 and 10:00 a.m. to correspond with common competition schedules and to minimize potential circadian influences. During the familiarization session, study procedures were explained, informed consent forms were completed, and anthropometric measurements including body mass, height, and body mass index were recorded. To assess baseline upper-body strength and verify participant homogeneity, a one-repetition maximum (1RM) bench press test was administered. The bench press was selected because of its similarity to the muscle activation patterns involved in the gyaku-zuki punch. The 1RM assessment followed the guidelines of the National Strength and Conditioning Association (NSCA). Previous studies have reported reliability coefficients greater than 0.94 for this procedure (28).
The second session was conducted 48–72 hours later. Participants first completed a standard warm-up consisting of five minutes of light jogging (RPE = 3/10), dynamic stretching exercises, and kumite-specific technical drills (29). Following the warm-up, kinematic data were recorded during gyaku-zuki punch performance. The testing protocol consisted of five 10-second sets of maximal-intensity punching separated by 10-second rest intervals (19). Punching commenced following an auditory signal. Target height was adjusted to shoulder level, and the punching distance was individualized according to each participant's arm length (24). As illustrated in Fig. 3, participants adopted the zenkutsu-dachi stance, with the feet positioned approximately twice shoulder width apart, 60% of body weight distributed on the front leg and 40% on the rear leg, and the front knee aligned with the toes (30). The punching technique was standardized for all participants and consisted of a straight reverse punch directed between the navel and xiphoid process levels (31).
The third session began with the same standard warm-up procedure followed by the PAP protocol. Participants performed three sets of five maximal tuck jumps with one minute of recovery between sets (Fig. 3). Technical criteria including knee elevation to pelvis height, maintenance of landing position, and proper body alignment during the jumps were monitored throughout the protocol (32). Following completion of the PAP intervention, participants rested for five minutes before repeating the punch testing procedure under identical conditions to those used in the second session. This design allowed direct comparison between baseline performance and performance following the PAP stimulus (Fig. 4).
Statistical analyses were performed using SPSS software (version 26.0, IBM Corp., Armonk, NY, USA). Data normality was assessed using the Shapiro–Wilk test. Paired-samples t-tests were used to compare dependent variables before and after the intervention. Pearson correlation coefficients were calculated to examine the relationships between changes in pelvis velocity and corresponding changes in punch velocity and reaction time. Statistical significance was set at $p < 0.05$.

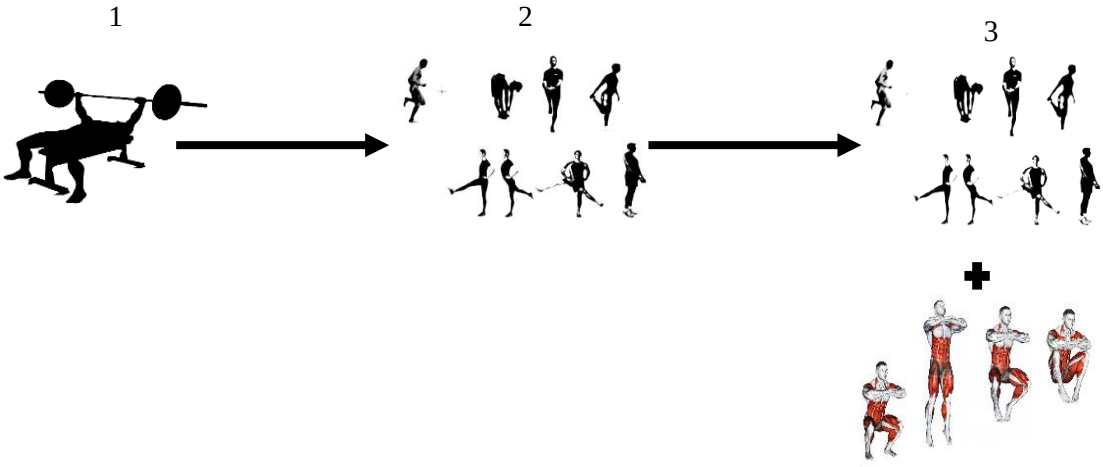


Fig. 4. Procedures of the study protocol: 1) Familiarization with equipment and one-repetition maximum (1RM) bench press, 2) Execution of gyaku-zuki punch after general warm-up, 3) PAP intervention followed by the execution of gyaku-zuki punch.

3. Results

The demographic characteristics of the participants, including age, height, weight, body mass index, 1RM, and training experience, are presented in Table 1. As shown in Table 2, paired-samples t-test results revealed significant differences between the pre-test and post-test conditions for several variables. Fatigue rate increased significantly following the intervention (mean difference = 0.642, p = 0.040). Significant increases were also observed in peak pelvis velocity (mean difference = 0.010 m/s, p = 0.031) and peak hand velocity (mean difference = 0.098 m/s, p = 0.045). In addition, reaction time decreased significantly after the intervention (mean difference = −0.010 s, p = 0.039). No significant differences were found for punch frequency, mean pelvis velocity, or mean hand velocity (p > 0.05). Pearson correlation analysis demonstrated a significant positive correlation between changes in peak pelvis velocity and changes in peak hand velocity (r = 0.537, p = 0.018).

4. Discussion

The findings of this study showed that the use of the PAP technique with a maximal tuck jump protocol significantly increased peak hand and pelvis velocity during the gyaku-zuki punch and improved reaction time compared with traditional warm-up exercises in the participants. Warm-up protocols are different and depend on the situation, but their main goal is to improve athletic performance and reduce the risk of injury. This is achieved through physiological mechanisms such as optimizing oxygen consumption, increasing muscle metabolism, inducing post-activation potentiation, as well as increasing tissue tensile tolerance and improving energy absorption (29). The potential mechanism for improving peak velocity in hand and pelvis movement following this technique can be explained by increased calcium ion sensitivity in myocytes, thereby increasing fast-twitch muscle contraction efficiency. Furthermore, the plyometric nature of the jumping exercise facilitates the recruitment of fast-twitch muscle fibers and accelerates neural activation, ultimately leading to the recruitment of more motor units and improved punching performance (28).
The results of one study showed that a single set of plyometric jumping exercises significantly increased jump height and power. In contrast, a multi-set protocol (three sets of 10 repetitions) with a 15-second interval produced no improvement in jump performance. It seems that the reason for the failure of the multi-set protocol in that study was the short recovery period following the stimulus. The researchers attributed the failure of the multi-set protocol to metabolic fatigue caused by the longer exercise duration (approximately 70 seconds). However, interestingly, in the present study, a multi-set protocol with similar rest intervals led to improvements. A possible explanation for this discrepancy is the lower training volume. Fewer repetitions (5 vs. 10) may prevent fatigue accumulation while still preserving the benefits of neuromuscular activation (33).

Table 1. Demographic characteristics of study participants and normality assessment of data using the Shapiro-Wilk test (n=19)

Variable	Mean ± SD	Shapiro-Wilk
Age (years)	21.37 ± 2.36	0.60
Height (cm)	181.50 ± 3.06	0.44
Weight (kg)	71.74 ± 2.07	0.82
Body mass index (kg/m²)	21.78 ± 0.51	0.52
One-repetition maximum (kg)	63.05 ± 4.50	0.13
Experience (years)	6.21 ± 1.75	0.72

Table 2. Mean ± SD of study variables at pre-test and post-test, together with the results of paired-samples t-tests and effect size estimates.

Variable (Unit)	Pre-test	Post-test	t	p	Cohen's d	Cohen's dz (95% CI)
Peak right hand velocity (m/s)	5.16 ± 1.14	5.26 ± 1.16	2.160	0.045*	0.509	0.031, 0.987
Mean right hand velocity (m/s)	1.74 ± 0.33	1.78 ± 0.35	1.268	0.221	0.299	-0.161, 0.759
Reaction time (s)	0.35 ± 0.05	0.34 ± 0.04	-2.224	0.039*	-0.524	-1.004, -0.045
Peak pelvis velocity (m/s)	0.46 ± 0.06	0.47 ± 0.07	2.340	0.031*	0.552	0.069, 1.034
Mean pelvis velocity (m/s)	0.19 ± 0.02	0.18 ± 0.03	-1.243	0.230	-0.293	-0.752, 0.166
Punch frequency (count)	16.64 ± 2.64	16.92 ± 2.75	0.654	0.522	0.154	-0.298, 0.606
Fatigue rate (% drop in count)	9.18 ± 2.47	9.82 ± 2.81	2.213	0.040*	0.522	0.042, 1.001

*Note. Values are presented as mean ± SD. Significant differences are indicated by an asterisk (p < 0.05).

According to reports, the peak PAP effect usually occurs 3–4 minutes after plyometric exercises and at least 5 minutes after resistance exercises (34). However, some studies, such as the research by Cui et al. (2024), reported peak performance approximately 12 minutes after the intervention. This inconsistency in findings can be attributed to the high training volume (three sets of squats at 85% of 1RM). High volume likely delays the time course of the peak PAP effect by inducing greater fatigue. Also, differences in execution speed and type of kinetic chain are worth considering. This study used maximum jump speed, whereas evidence suggests that executing the protocol at 80% of maximum speed may yield better results than 90%. This indicates that the intensity of the PAP stimulus does not have a simple linear relationship with the functional response, and there is likely an optimal point for each individual (35).

Many martial arts studies, relying on an individual approach, emphasize the direct involvement of the hands and feet in training protocols to directly improve performance (36–38). In contrast, the present study focused on the pelvis as a vital link between the lower and upper extremities, based on the principle of the kinetic chain and the importance of trunk rotation during punching. However, more direct protocols, such as the study by Aandahl et al. (2015), which used resistance band training (2 sets of 10 repetitions), showed better functional outcomes than the findings of the present study. The mechanism of action of elastic bands is likely the increased force production throughout the entire range of motion. Also, using bands without disrupting punch technique may make force transfer more efficient. These characteristics may explain the better performance of martial artists with the band-based protocol compared with the jumping protocol used in the present study (36).

In the study by Sharma et al. (2018), both strength (squat at 90% of 1RM) and plyometric (countermovement jump) protocols significantly improved jump height and sprint time. The plyometric protocol also led to an increase in peak velocity. Nevertheless, the results showed that plyometrics had a relative superiority (39). A possible explanation is lower fatigue with this method, as strength training may be associated with greater accumulation of metabolites such as lactate and reduced muscle energy levels (40). In contrast, some studies have reported no significant difference between the effects of these two methods. A possible explanation for these discrepancies is insufficient training load or specific characteristics of the protocols used. These discrepancies emphasize the complexity of selecting an optimal protocol and the importance of paying attention to individual factors and the demands of the sport (41, 42).

Contrary to expectations, punch frequency did not change significantly after applying the PAP protocol in this study. This result is consistent with some previous research on combat athletes (19, 43). A possible explanation is the dynamic balance between two physiological phenomena: on one hand, fatigue resulting from acute activity can temporarily reduce neuromuscular function and have an inhibitory effect on the speed of repetitive movements. On the other hand, the PAP mechanism increases the potential for force production. It seems that under these conditions, the positive effects of PAP and the negative effects of fatigue cancel each other out, leaving punch frequency unchanged. Given the use of the plyometric protocol in this study, it appears that this method can be used as a practical, low-risk strategy in specific warm-ups prior to performing karate skills, without negatively affecting the rhythm and frequency of the martial artist's punches.

Another notable finding of this study was the increase in fatigue rate following the plyometric exercises. Unlike some previous findings in combat sports (19), this result indicates that although punch frequency did not change significantly ($p = 0.522$), the plyometric protocol imposed a considerable physiological load on the neuromuscular system. This additional load may manifest as a reduced ability to produce maximal power during consecutive repetitions. However, given the nature of karate competitions, which are designed around short-duration, high-intensity actions, the observed increase in fatigue rate may not have a noticeable impact on overall competitive performance. In other words, although plyometric exercises increase fatigue, within the short time frame of karate competitions this effect may not be sufficient to negate the benefits of enhanced neuromuscular activation.

It seems that PAP exercises in a plyometric format, while imposing a significant physiological load on the neuromuscular system and increasing fatigue rate, can also provide important performance advantages such as improved reaction time. This improvement likely arises from two main pathways: first, facilitation of neural signal conduction and motor unit recruitment, leading to increased coordination and efficiency of the neuromuscular system. These observations are consistent with the idea that when a motor response closely resembles previously practiced patterns, its execution speed increases (44). Second, the preferential effect of PAP on type II fast-twitch muscle fibers. In response to plyometric training, these fibers experience biochemical changes such as phosphorylation of myosin regulatory light chains, which

increases their sensitivity to calcium and consequently their contraction efficiency (45). Subsequently, more effective utilization of these fibers becomes possible, ultimately leading to a significant improvement in reaction time. In summary, although these exercises come with a cost in the form of fatigue, their benefit—faster reaction time—can be a decisive advantage in competitive karate situations where victory sometimes depends on the speed and accuracy of an explosive movement. Therefore, careful planning and intelligent timing of these exercises in the training routine are of particular importance for maximizing benefits and minimizing the effects of fatigue.

The present study has several limitations that affect the generalizability of the results. First, participants were selected only from male karate athletes; therefore, generalizing the findings to female athletes requires caution. Second, the fatigue rate was calculated based on changes in successful punch performance across repeated sets, and objective physiological indicators such as lactate levels or surface electromyography were not directly measured, which limits a more comprehensive analysis of fatigue. Third, the PAP protocol was implemented in a controlled laboratory setting with a fixed recovery interval (5 minutes), which may differ from the dynamic and variable conditions of an actual competition. Also, due to the lack of a randomized and counterbalanced design for the order of warm-up conditions (traditional and PAP), there is a possibility that factors such as cumulative fatigue or learning effects influenced the results. It is recommended that in future studies, the order of conditions be determined using a randomized method to minimize the effects of these confounding factors.

5. Conclusion

Plyometric warm-up based on PAP significantly increased peak linear velocity of the hand and pelvis in the gyaku-zuki punch and improved reaction time in male karate athletes. This protocol appears to be a practical and effective strategy for optimizing explosive performance in short-duration competitions and may provide a basis for designing personalized training programs.

Acknowledgments

We thank the East Azerbaijan Karate Board and the staff of the Motion Analysis Laboratory of Tabriz University of Medical Sciences for coordinating and supporting the participation of athletes in this research. Your cooperation played a key role in advancing this study.

Ethical Considerations

Compliance with ethical guidelines

All ethical principles were observed in this study. All ethical considerations were clearly explained to the participants. Written informed consent was then obtained from the participants. All procedures of this study were conducted in accordance with the ethical standards outlined in the Declaration of Helsinki. Based on these principles, respect for participants' rights, including the freedom to participate or withdraw from the study at any stage, confidentiality of personal information, and the avoidance of any psychological or physical harm, was emphasized.

Funding

This research received no financial support from any governmental, private, or non-profit organizations.

Authors' contributions

All authors actively participated in various stages of conducting this research. All authors contributed to the final approval of the manuscript.

Conflicts of interest

The authors declare that they have no conflict of interest associated with this study.
.

مقاله پژوهشی

تأثیر گرم‌کردن پلایومتریک مبتنی بر پس‌فعال‌سازی بر سرعت خطی دست و لگن حین ضربه گیاکو–زوکی: یک مطالعه شبه تجربی

سینا نجف‌پور[۱]، حامد فدایی[۱]، *حکیمه آدی‌گوزلی[۲]، امیر قیامی‌راد[۳]

۱. گروه بیومکانیک ورزشی، دانشکده تربیت‌بدنی و علوم ورزشی، دانشگاه خوارزمی، تهران، ایران.

۲. گروه فیزیوتراپی، دانشکده علوم توانبخشی، دانشگاه علوم پزشکی تبریز، تبریز، ایران.

۳. گروه رفتار حرکتی، دانشکده تربیت بدنی و علوم ورزشی، دانشگاه تبریز، تبریز، ایران.

Use your device to scan and read the article online

Citation: Najafpour S, Fadaei H, Adigozali H, Ghiami Rad A. Effect of a Post-Activation Potentiation-Based Plyometric Warm-Up on Hand and Pelvis Linear Velocity During the Gyaku-Zuki Punch: A Quasi-Experimental Study. Journal of Sport Biomechanics.2026;12(3):372-393. https://doi.org/10.66224/JSportBiomech.12.3.372

https://doi.org/10.66224/JSportBiomech.12.3.372

اطلاعات مقاله:

تاریخ دریافت: ۲۳ آذر ۱۴۰۴
تاریخ پذیرش: ۵ خرداد ۱۴۰۵
تاریخ انتشار: ۲۵ خرداد ۱۴۰۵

کلید واژه‌ها:
پس‌فعال‌سازی، توان انفجاری، گرم‌کردن، کاراته، سرعت ضربه

چکیده

هدف گرم‌کردن پس‌فعال‌سازی (PAP) از راهکارهای مورد استفاده در بهبود عملکرد و نیروی عضلانی در ورزشکاران است. هدف این مطالعه بررسی تأثیر گرم‌کردن پلایومتریک مبتنی بر پس‌فعال‌سازی بر سرعت خطی دست و لگن حین ضربه‌ی گیاکو–زوکی در کاراته‌کاران مرد می‌باشد.

روش‌ها در این مطالعه‌ی شبه‌تجربی بر روی ۱۹ کاراته‌کار مرد، دو پروتکل گرم‌کردن (استاندارد و استاندارد به همراه PAP شامل پرش‌های تاک) مقایسه شد. داده‌های کینماتیکی به‌صورت سه‌بعدی ثبت و متغیرهای سرعت بیشینه و میانگین حرکت دست و لگن، زمان واکنش، فرکانس ضربه و نرخ خستگی اندازه‌گیری شد.

یافته‌ها استفاده از تمرینات PAP سرعت بیشینه دست (Δ=۰/۰۹۸ m/s، p=۰/۰۴۵)، سرعت بیشینه لگن (Δ=۰/۰۱۰ m/s، p=۰/۰۳۱) و نرخ خستگی (Δ=۰/۶۴۲، p=۰/۰۴۰) را افزایش داد و درعین‌حال باعث کاهش معنادار زمان واکنش (Δ=-۰/۰۱۰، p=۰/۰۳۹) گردید. همبستگی مثبت قوی بین افزایش سرعت بیشینه‌ی لگن و بهبود سرعت بیشینه‌ی دست (r=۰/۵۳۷، p=۰/۰۱۸) دیده شد. سرعت میانگین و فرکانس ضربه تغییر معناداری نداشت (p>۰/۰۵).

نتیجه‌گیری در مقایسه با گرم‌کردن سنتی، گرم‌کردن پالیومتریک مبتنی بر پس‌فعالسازی (PAP) موجب افزایش سرعت بیشینه لگن و دست و بهبود زمان واکنش در اجرای ضربه گیاکو–زوکی شد. اگرچه این پروتکل باعث افزایش نرخ خستگی گردید، اما اثرات آن در بهبود عملکرد نشان می‌دهد که می‌تواند به‌عنوان راهبردی عملی برای بهینه‌سازی عملکردهای انفجاری و طراحی برنامه‌های گرم‌کردن فردی در مسابقات کوتاه‌مدت کاراته مورد استفاده قرار گیرد.

*نویسنده مسئول:
حکیمه آدی‌گوزلی
آدرس: گروه فیزیوتراپی، دانشکده علوم توانبخشی، دانشگاه علوم پزشکی تبریز، تبریز، ایران.
ایمیل: adigozalih@tbzmed.ac.ir

مقدمه

کاراته، یکی از پرطرفدارترین هنرهای رزمی جهان، بر پایه حرکات سریع، دقیق و هماهنگ اندام‌های فوقانی و تحتانی استوار است. این ورزش نه‌تنها نیازمند قدرت و استقامت بدنی است، بلکه هماهنگی عصبی–عضلانی دقیق نیز نقش تعیین‌کننده‌ای در اجرای موفق تکنیک‌ها دارد (۱). ضربات در مسابقات کومیته عمدتاً با هدف کسب امتیاز و به‌صورت کنترل‌شده و سریع اجرا می‌شوند تا کمترین آسیب به حریف وارد شود. در میان تکنیک‌های دستی، ضربه‌ی گیاکو–زوکی (مشت معکوس) به‌عنوان یکی از مؤثرترین و پرکاربردترین روش‌ها شناخته می‌شود (۲). این تکنیک در زمره مهارت‌های پرتابی قرار دارد و اجرای موفق آن نیازمند انتقال پیوسته و بهینه نیرو از اندام‌های تحتانی به فوقانی است؛ به‌طوری‌که نیرو از پاها آغاز و از طریق لگن، تنه و شانه به دست منتقل می‌شود. این توالی انتقال نیرو نمونه بارزی از زنجیره کینتیکی است و چرخش لگن می‌تواند در افزایش سرعت نهایی دست نقش داشته باشد، امری که در مسابقات کوتاه‌مدت و انفجاری بسیار حیاتی است (۳).

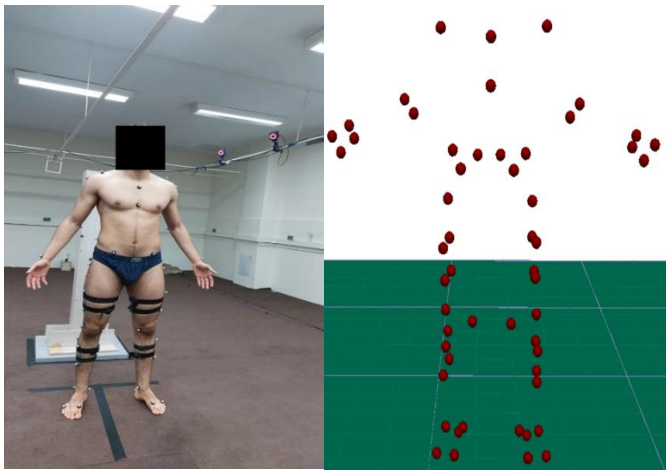
با وجود ایمن بودن نسبی کاراته، ماهیت تماسی و انفجاری آن ورزشکاران را در معرض خطر آسیب قرار می‌دهد. که عمدتاً شامل صدمات اندام فوقانی مانند شانه و آرنج و اندام تحتانی مانند مچ پا و زانو می‌شود (۴). برای کاهش خطر آسیب، تمرینات عصبی–عضلانی شامل تمرینات انعطاف‌پذیری، قدرت، تعادل و تمرینات پلایومتریک اهمیت ویژه‌ای دارند (۵). مداخلات مبتنی بر حس عمقی و تعادل می‌توانند خطر آسیب رباط صلیبی قدامی را در ورزشکاران جوان و مبتدی تا ۵۰٪ کاهش دهند (۶). علاوه بر این، برنامه‌های تمرینی منظم شامل گرم‌کردن، سردکردن و کشش هدفمند، به‌عنوان بخش ضروری آماده‌سازی جسمانی ورزشکاران رزمی شناخته می‌شوند (۷). گرم‌کردن فعال پیش از تمرین یا مسابقه با هدف افزایش جریان خون، اکسیژن‌رسانی به عضلات، انعطاف‌پذیری و ارتقای هماهنگی حرکتی انجام می‌شود. تحقیقات نشان می‌دهند که گرم‌کردن فعال نسبت به گرم‌کردن غیرفعال مزایای بیشتری دارد و می‌تواند نرخ آسیب در ورزش‌های تماسی را کاهش دهد (۸, ۹). بااین‌حال، استفاده از تمرینات کششی به‌ویژه قبل از فعالیت‌های انفجاری ممکن است قدرت و توان عضلانی را ۵–۱۰٪ کاهش دهد (۱۰). به همین دلیل، پروتکل‌های پس‌فعال‌سازی (PAP) در سال‌های اخیر به‌عنوان جایگزینی مؤثر مورد توجه قرار گرفته‌اند (۱۱, ۱۲). PAP با استفاده از انقباضات بیشینه یا نزدیک به بیشینه (ایزومتریک، دینامیک یا پلایومتریک) موجب تسهیل فراخوانی واحدهای حرکتی، افزایش توان عضلانی و بهبود عملکرد انفجاری ورزشکار می‌شود (۱۳). مکانیسم‌های عصبی–عضلانی مؤثر در این فرآیند شامل فسفوریلاسیون زنجیره سبک میوزین و کاهش رفلکس نخاعی هستند (۱۴).

تمرینات پلایومتریک، که از چرخه کشش–کوتاه‌شدن بهره می‌گیرند، می‌توانند توان تولید نیرو و سرعت انقباض عضلانی را افزایش دهند و زمان اعمال نیرو در دامنه کامل حرکت را کاهش دهند (۱۵, ۱۶). این روش برای ضربات مشت در کاراته، که نیازمند هماهنگی عصبی–عضلانی دقیق و انتقال بهینه گشتاور بدن است، اهمیت ویژه‌ای دارد (۱۷). یافته‌ها نشان می‌دهند که تمرینات پلایومتریک می‌توانند زمان واکنش (۱۸) و فرکانس ضربات را به‌ویژه در ورزشکاران رشته‌های سرعتی و انفجاری کاهش دهند و هیچ تغییر محسوسی در نرخ خستگی ورزشکاران مشاهده نشد (۱۹). به نظر می‌رسد تلفیق گرم‌کردن فعال، PAP و تمرینات پلایومتریک بتواند به بهینه‌سازی عملکرد انفجاری و کاهش خستگی ورزشکاران کمک کند. با توجه به پیشرفت‌های علمی اخیر و اهمیت زنجیره کینتیکی در اجرای مهارت‌های انفجاری، مطالعه حاضر با هدف بررسی تأثیر گرم‌کردن پلایومتریک مبتنی بر PAP بر سرعت خطی دست و لگن، زمان واکنش و نرخ خستگی حین اجرای ضربه‌ی گیاکو–زوکی در کاراته‌کاران مرد طراحی شده است.

نتایج این تحقیق می‌تواند به پرکردن شکاف موجود در این حیطه کمک کرده و به مربیان و ورزشکاران سطح بالا در طراحی پروتکل‌های تمرینی شخصی‌سازی‌شده و بهینه برای مسابقات کوتاه‌مدت یاری رساند.

روش شناسی

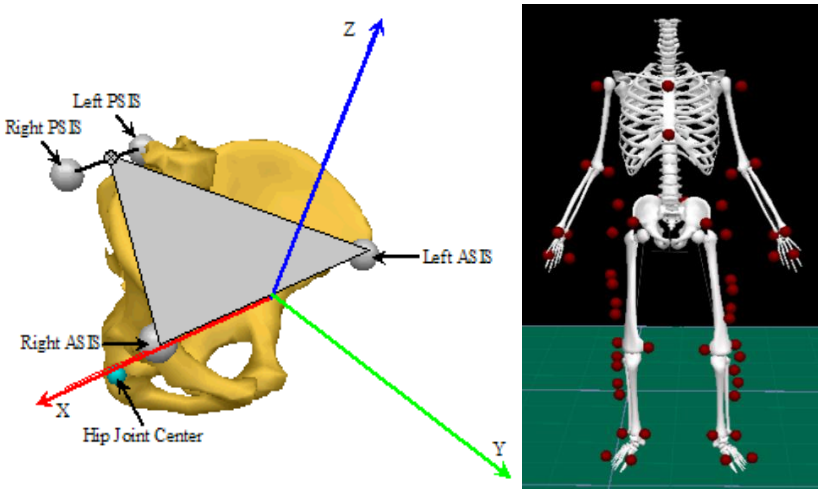
این پژوهش به روش نیمه‌تجربی با طرح پیش‌آزمون و پس‌آزمون برای بررسی اثرات محرک PAP ناشی از تمرینات پلایومتریک بر کینماتیک ضربه گیاکو-زوکی در ورزشکاران کاراته مرد طراحی و در آزمایشگاه بیومکانیک دانشکده علوم توان‌بخشی دانشگاه علوم پزشکی تبریز در سال ۱۴۰۴ اجرا شد. جامعه آماری را کاراته‌کاران ماهر شهر تبریز تشکیل می‌دادند. شرکت‌کنندگان دو پروتکل گرم‌کردن را به‌ترتیب ثابت در دو جلسه مجزا با فاصله ۴۸-۷۲ ساعت انجام دادند: (۱) گرم‌کردن استاندارد و اجرای گیاکو-زوکی؛ (۲) پروتکل PAP شامل گرم‌کردن استاندارد به همراه ۳ ست ۵ تکرار حداکثری پرش تاک با دو پا و سپس اجرای گیاکو-زوکی. متغیرهای کینماتیکی شامل سرعت بیشینه و میانگین در دو سگمنت بدنی اصلی (دست و لگن)، زمان واکنش، فرکانس ضربه و نرخ خستگی با سیستم ثبت حرکت سه‌بعدی اندازه‌گیری و تحلیل شدند. بر اساس تحلیل G*Power (نسخه ۳,۱,۹,۴، دانشگاه هاینریش هاینه دوسلدورف)، برای اندازه اثر بزرگ (Cohen's d=۰/۶)، توان ۰/۸۰ و α=۰/۰۵، به ۱۹ شرکت‌کننده نیاز بود (۲۰). نوزده کاراته‌کار در سبک شوتوکان از طریق همکاری با فدراسیون ملی کاراته و هیئت کاراته استان، به‌صورت هدفمند انتخاب شدند. شرایط ورود افراد به مطالعه عبارت‌اند از: جنسیت مرد، راست‌دست بودن که با پرسشنامه چپ‌دستی ادینبورگ تأیید می‌شود، عدم ابتلا به بیماری‌های محدودکننده فعالیت بدنی، انجام حداقل ۱۵۰ دقیقه فعالیت بدنی با شدت متوسط در هفته و قرار داشتن در بازه سنی ۱۸ تا ۲۵ سال. شرایط خروج از مطالعه نیز شامل موارد زیر است: بروز آسیب اسکلتی-عضلانی، مصرف مکمل‌ها یا مواد نیروزا در شش ماه گذشته و انجام هرگونه فعالیت ورزشی خارج از برنامه پروتکل مطالعه. به افراد داوطلب، مراحل کار توضیح داده شد تا در صورت تمایل با تکمیل رضایت‌نامه آگاهانه وارد مطالعه شوند. این پژوهش توسط کمیته اخلاق دانشگاه علوم پزشکی تبریز (شناسه IR.TBZMED.REC.1403.908) تأیید شده است. کینماتیک ضربه با استفاده از یک سیستم ثبت حرکت سه‌بعدی با نه دوربین مادون‌قرمز (Kestrel 2200, Motion Analysis, Corporation, Santa Rosa, CA, USA) با فرکانس ۳۴۰ هرتز ثبت گردیدند (۲۱). پنجاه‌وشش نشانگر بازتابی غیرفعال (۱۴ میلی‌متر) به نقاط برجسته آناتومیکی متصل شدند (شکل۱).



شکل ۱. نمای شماتیک از محل قرارگیری مارکرها روی بدن و پیکربندی اهداف در حالت استاتیک برای ثبت داده‌های کینماتیکی

نشانگرها روی مفاصل متاتارسوفالانژیال اول و پنجم، پاشنه‌ها، مالئوس‌ها، اپی‌کوندیل‌های ران، خارهای ایلیاک، کرت ایلیاک، زائده‌های آکرومیال، بریدگی ژیگولار، زائده زایفوئید، استخوان بازو، استخوان رادیوس، اولنار و متاکارپال‌های دوم و پنجم قرار داده شدند و نشانگرهای خوشه‌ای (کلاستر) روی ران‌ها و ساق پا قرار گرفتند (۲۲). سیستم قبل از هر جلسه کالیبره می‌شد (۱ میلی‌متر > میانگین خطا). آزمایش‌ها در دمای ۱ ± ۲۳ درجه سانتیگراد و رطوبت نسبی ۲ ± ۴۲ درصد انجام شد تا از شرایط محیطی ثابت اطمینان حاصل شود. داده‌ها با Cortex (نسخه ۷,۲,۱۶، Motion Analysis) پردازش و با فیلتر پایین‌گذر Butterworth مرتبه چهارم (قطع ۱۲ هرتز) صاف شدند. مدل بیومکانیکی شش درجه آزادی در Visual3D (نسخه ۶,۰۱ C-Motion Inc) با آزمایش استاتیک ایجاد و اعمال شد (۱۹). زوایای مفصل با استفاده از توالی چرخش اویلر کاردان (Y-X-Z)، یک روش استاندارد برای تجزیه و تحلیل حرکت اندام فوقانی در فضای سه‌بعدی، طبق توصیه‌های ISB، محاسبه شدند (۲۳). برای مدل‌سازی بخش‌های مختلف بدن از مارکرهای خاصی استفاده شد. مطابق شکل ۲ بخش دیستال دست با استفاده از مارکرهای متاکارپ دوم و پنجم مدل‌سازی گردید، در حالی که بخش پروگزیمال آن با مارکرهای استخوان های رادیوس و اولنار تعریف شد (۲۲). مدل‌سازی لگن نیز بر اساس پروتکل CODA و با در نظر گرفتن لگن به عنوان یک مثلث انجام پذیرفت. رأس‌های این مثلث را مارکرهای خار قدامی چپ و راست ایلیاک و یک مارکر میانی در ناحیه ایلیاک خلفی تشکیل می‌دادند. علاوه بر این، از مارکرهای کرت ایلیاک برای افزایش دقت ردیابی استفاده شد (۲۴).

لحظه شروع/پایان ضربه از نمودار سرعت–زمان مچ دست (آستانه: ۳ انحراف استاندارد بالای پایه) شناسایی شد. برای محاسبه زمان واکنش از سیگنال شنوایی تا شروع حرکت مچ دست راست تعیین شد (۲۵, ۲۶). چرخه پانچ بر اساس مچ دست تقسیم‌بندی شد؛ در هر چرخه دو پارامتر کینماتیک، سرعت متوسط ضربه و سرعت اوج ضربه محاسبه شد و بیشترین رکورد برای هر فرد ثبت شد. فرکانس ضربه که شامل تعداد ضربات موفق در بازه زمانی مشخص تعریف می‌شد در هر ست محاسبه گردید، ضربه موفق به هر تکرار کامل حرکت اطلاق شد که در آن زاویه مفصل آرنج به حداکثر اکستنشن می‌رسید. همچنین نرخ خستگی (FR) با آزمون تعداد ضربات موفق در ست‌های چندگانه (معادله ۱) محاسبه شد.



شکل۲. نحوه مارکرگذاری و مدل‌سازی سه‌بعدی کل بدن و شبیه‌سازی لگن به شکل مثلث و محل مبدا محورها و جهت‌گیری محورهای سیستم مختصات محلی بر اساس پروتکل CODA

شکل۳. استایل ضربه گیاکو–زوکی برای شرکت‌کنندگان مطالعه: پای چپ جلو، پای راست عقب با فاصله‌ای دو برابر عرض شانه، پاشنه عقب روی زمین، زانوی چپ خمیده در زاویه ۹۰ درجه، کاسه زانو با انگشتان پا هم‌راستا؛ ضربه بین ناف و زیفوئید وارد می‌شود.

خستگی در این فرمول با اندازه‌گیریِ افت عملکرد بین ست‌های متوالی محاسبه می‌شود. هرچه خستگی بیشتر باشد، تعداد ضربات موفق در ست‌های بعدی کاهش می‌یابد و این افت، عدد نهایی را افزایش می‌دهد. بنابراین، عدد بالاتر نشان‌دهنده‌ی خستگی بیشتر است. برعکس، اگر خستگی کمی احساس شود، عملکرد در تمام ست‌ها پایدار می‌ماند و عدد به صفر نزدیک می‌شود. این شاخص، میزان خستگیِ تجمعی را در طول ست‌های متوالی کمّی می‌کند (۲۷):

معادله ۱

$$\boldsymbol{FR}\ \% = \left(1 - \frac{N1 + N2 + N3 + N4 + N5}{max\ N \times 5}\right) \times 100$$

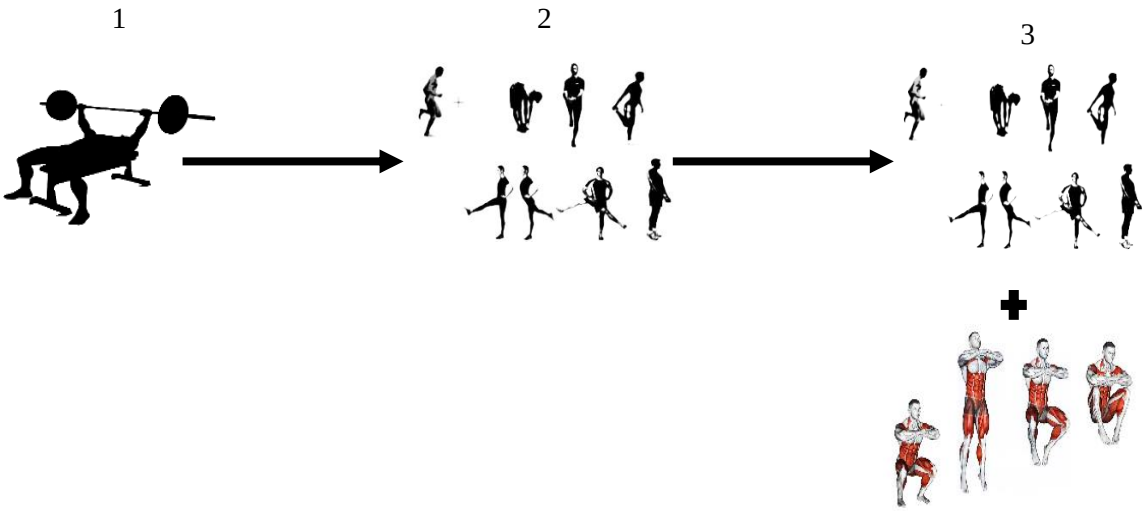
N: تعداد ضربات موفق در هر ست

max N: بیشترین رکورد ثبت شده در تعداد ضربات موفق

شرکت‌کنندگان سه جلسه را به پایان رساندند: یک جلسه آشنایی، یک جلسه گرم‌کردن استاندارد و یک جلسه گرم‌کردن استاندارد همراه با PAP. همه جلسات بین ساعت ۸:۰۰ تا ۱۰:۰۰ صبح انجام شد تا با زمان‌های معمول رقابت هماهنگ شود و اثرات ریتم شبانه‌روزی کنترل شود. در جلسه اول، پس از ارائه توضیحات کامل در مورد فرآیند آزمون‌ها و ملاحظات اجرایی، فرم رضایت‌نامه آگاهانه و پرسش‌نامه اطلاعات فردی (سابقه و سطح فعالیت ورزشی، تاریخچه بیماری‌ها و جراحی‌های دو سال اخیر) و اندازه‌گیری اطلاعات آنتروپومتریک (وزن، قد، شاخص توده‌ی بدنی) تکمیل شد. برای کنترل اثر متغیر قدرت پایه بر نتایج پژوهش و بررسی همگنی گروه، توان اندام فوقانی تمامی آزمودنی‌ها از طریق آزمون یک تکرار بیشینه (1RM) در حرکت پرس سینه استاندارد اندازه‌گیری شد. انتخاب این حرکت به دلیل همخوانی الگوی عضلانی مشابه با عضلات درگیر در اجرای ضربه‌ی گیاکو–زوکی بود. پروتکل اجرای آزمون 1RM مطابق با دستورالعمل‌های انجمن ملی قدرت و آمادگی جسمانی (NSCA) و با رعایت استانداردهای ایمنی و دقت انجام پذیرفت. پایایی این روش اندازه‌گیری با ضریب همبستگی بالای ۰/۹۴ گزارش شده است که از قابلیت اطمینان بالای نتایج اطمینان می‌دهد (۲۸). جلسه دوم با فاصله ۴۸ تا ۷۲ ساعت از جلسه اول برگزار شد. ابتدا آزمودنی‌ها پروتکل گرم‌کردن

استانداردی شامل ۵ دقیقه دویدن سبک (RPE= 3/10)، حرکات کششی پویا و تمرین تکنیک‌های کومیته را انجام دادند (۲۹). سپس داده‌های کینماتیکی ضربه‌ی گیاکو–زوکی در شرایطی استاندارد ثبت شد. آزمایش شامل اجرای پنج ست ۱۰ثانیه‌ای (با ۱۰ثانیه استراحت بین ست‌ها) ضربه با حداکثر شدت با هر دو دست بود که پس از دریافت یک سیگنال شنوایی انجام می‌شد (۱۹). ارتفاع هدف در راستای مفصل شانه تنظیم شد و فاصله از هدف بر اساس طول بازوی هر فرد تعیین گردید (۲۴). مطابق شکل ۳ وضعیت بدنی (زن کوتسو داچی) با پاهایی دو برابر عرض شانه تنظیم شد، به گونه‌ای که ۶۰ درصد وزن بدن روی پای جلو و ۴۰ درصد روی پای عقب قرار گیرد (۳۰) و کاسه زانوی پای جلو با نوک انگشتان همان پا در یک امتداد قرار گرفت. مکانیزم ضربه (مشت معکوس مستقیم از ناحیه بین ناف و زیفوئید) برای همه یکسان بود (۳۱). جلسه سوم بلافاصله پس از گرم‌کردن مشابه جلسه قبل، با یک پروتکل پس‌فعال‌سازی (PAP) آغاز شد (شکل ۴). در این بخش، آزمودنی‌ها ۳ ست ۵ تایی پرش تاک حداکثری را با یک دقیقه استراحت بین ست‌ها انجام دادند. نکات فنی مانند بالا آوردن زانوها تا ارتفاع لگن، حفظ محل فرود و جهت‌گیری صحیح بدن در طول پرش به دقت رعایت و کنترل شد (۳۲). پس از اتمام این پروتکل و یک وقفه ۵ دقیقه‌ای مطابق با زمان بهینه اثر PAP، فرآیند ثبت داده‌های کینماتیکی ضربه گیاکو–زوکی دقیقاً با همان استانداردهای جلسه دوم تکرار شد. این طراحی امکان مقایسه مستقیم عملکرد ضربه در شرایط پایه (جلسه دوم) و بلافاصله پس از محرک PAP (جلسه سوم) را فراهم می‌کرد.

کلیه تحلیل‌ها با نرم‌افزار SPSS (نسخه ۲۶.۰، شرکت IBM، ایالات متحده آمریکا) انجام پذیرفت. نرمال بودن توزیع داده‌ها با استفاده از آزمون شاپیرو–ویلک بررسی شد ($p>۰/۰۵$). به منظور مقایسه متغیرهای وابسته (شامل میانگین سرعت ضربه، حداکثر سرعت ضربه، زمان واکنش، فرکانس ضربه و نرخ خستگی) قبل و پس از مداخله، از آزمون t زوجی استفاده گردید. برای بررسی رابطه بین میزان بهبود سرعت لگن و میزان بهبود سرعت مشت و زمان واکنش، از ضریب همبستگی پیرسون بهره گرفته شد. سطح معنی‌داری برای کلیه آزمون‌ها $p<۰/۰۵$ در نظر گرفته شد.



شکل ۴. مراحل اجرای مطالعه: ۱) آشنایی با تجهیزات و پرس سینه با یک تکرار بیشینه، ۲) اجرای ضربه گیاکو–زوکی پس از گرم‌کردن عمومی، ۳) مداخله PAP در نهایت اجرای ضربه گیاکو–زوکی

نتایج

ویژگی‌های دموگرافیک شرکت‌کنندگان (جدول ۱) شامل سن، قد، وزن، شاخص توده بدنی، یک تکرار بیشینه و سابقه تمرین بود. مطابق جدول ۲، نتایج تحلیل آماری با استفاده از آزمون تی زوجی نشان می‌دهد که مداخله انجام‌شده منجر به بهبود آماری معناداری در چندین متغیر کلیدی شده است. در میان این تغییرات، نرخ خستگی با افزایش میانگین به میزان ۰/۶۴۲ واحد و سطح معناداری ۰/۰۴۰، افزایش قابل توجهی در میزان خستگی شرکت‌کنندگان را نشان می‌دهد. همچنین، سرعت بیشینه لگن با اختلاف میانگین ۰/۰۱۰ متر بر ثانیه و سطح معناداری ۰/۰۳۱، بیشترین حساسیت را نسبت به مداخله نشان داده و بهبود محسوسی در توان انفجاری اندام تحتانی ایجاد کرده است. سرعت بیشینه دست نیز با افزایش ۰/۰۹۸ متر بر ثانیه و معناداری ۰/۰۴۵، پیشرفت مشابهی را در اندام فوقانی منعکس می‌کند. علاوه بر این، زمان واکنش با کاهش ۰/۰۱۰ ثانیه و سطح معناداری ۰/۰۳۹، بهبود معناداری در سرعت پردازش و عکس‌العمل عصبی–عضلانی افراد نشان داده است. در مقابل، دیگر شاخص‌های حرکتی شامل فرکانس ضربه، سرعت میانگین سگمنت لگن و دست راست تغییر آماری معناداری را تجربه نکرده‌اند. بااین‌حال، تحلیل همبستگی نشان داد که بین تغییرات سرعت بیشینه لگن و سرعت بیشینه دست، یک رابطه مثبت و قوی وجود دارد (r=۰/۵۳۷، p=۰/۰۱۸)، که حاکی از هماهنگی سیستمیک در بهبود توان بیشینه در هر دو اندام تحت تأثیر مداخله است.

بحث

یافته‌های این مطالعه نشان داد که استفاده از تکنیک PAP با پروتکل پرش تاک با حداکثر سرعت، به‌طور معنی‌داری منجر به افزایش سرعت بیشینه سگمنت دست و لگن در مشت گیاکو–زوکی و زمان واکنش در مقایسه با تمرینات گرم‌کردن سنتی در شرکت‌کنندگان شد.

جدول ۱. ویژگی‌های جمعیت‌شناختی شرکت‌کنندگان در پژوهش و نتایج آزمون نرمال بودن داده‌ها با استفاده از آزمون شاپیرو–ویلک (n=۱۹)

متغیر	انحراف معیار ± میانگین	آزمون شاپیرو–ویلک
سن (سال)	۲۱/۳۷ ± ۲/۳۶	۰/۶۰
قد (سانتی‌متر)	۱۸۱/۵۰ ± ۳/۰۶	۰/۴۴
وزن (کیلوگرم)	۷۱/۷۴ ± ۲/۰۷	۰/۸۲
شاخص توده بدنی (کیلوگرم بر مترمربع)	۲۱/۷۸ ± ۰/۵۱	۰/۵۲
یک تکرار بیشینه (کیلوگرم)	۶۳/۰۵ ± ۴/۵۰	۰/۱۳
سابقه ورزشی (سال)	۶/۲۱ ± ۱/۷۵	۰/۷۲

جدول ۲. میانگین ± انحراف معیار متغیرهای پژوهش در پیش‌آزمون و پس‌آزمون، همراه با نتایج آزمون t زوجی و اندازه اثر

متغیر (واحد)	پیش‌آزمون	پس‌آزمون	t	p	کوهن d	فاصله اطمینان ۹۵٪
حداکثر سرعت دست راست (متر بر ثانیه)	۵/۱۶ ± ۱/۱۴	۵/۲۶ ± ۱/۱۶	۲/۱۶۰	*۰/۰۴۵	۰/۵۰۹	۰/۰۳۱ تا ۰/۹۸۷
میانگین سرعت دست راست (متر بر ثانیه)	۱/۷۴ ± ۰/۳۳	۱/۷۸ ± ۰/۳۵	۱/۲۶۸	۰/۲۲۱	۰/۲۹۹	-۰/۱۶۱ تا ۰/۷۵۹
زمان واکنش (ثانیه)	۰/۳۵ ± ۰/۰۵	۰/۳۴ ± ۰/۰۴	-۲/۲۲۴	*۰/۰۳۹	-۰/۵۲۴	-۱/۰۰۴ تا -۰/۰۴۵
حداکثر سرعت لگن (متر بر ثانیه)	۰/۴۶ ± ۰/۰۶	۰/۴۷ ± ۰/۰۴	۲/۳۴۰	*۰/۰۳۱	۰/۵۵۲	۰/۰۶۹ تا ۱/۰۳۴
میانگین سرعت لگن (متر بر ثانیه)	۰/۱۹ ± ۰/۰۲	۰/۱۸ ± ۰/۰۳	-۱/۲۴۳	۰/۲۳۰	-۰/۲۹۳	-۰/۷۵۲ تا ۰/۱۶۶
تعداد مشت‌ها (تعداد)	۱۶/۶۴ ± ۲/۶۴	۱۶/۹۲ ± ۲/۷۵	۰/۶۵۴	۰/۵۲۲	۰/۱۵۴	-۰/۲۹۸ تا ۰/۶۰۶
نرخ خستگی (درصد کاهش تعداد مشت‌ها)	۹/۱۸ ± ۲/۴۷	۹/۸۲ ± ۲/۸۱	۲/۲۱۳	*۰/۰۴۰	۰/۵۲۲	۰/۰۴۲ تا ۱/۰۰۱

یادداشت: داده‌ها به‌صورت میانگین ± انحراف معیار گزارش شده‌اند. اختلاف‌های معنادار با علامت ستاره (*) مشخص شده‌اند (p < ۰/۰۵).

پروتکل‌های گرم‌کردن، متنوع و وابسته به شرایط هستند، اما هدف اصلی آنها بهبود عملکرد ورزشی و کاهش خطر آسیب است. این کار از طریق مکانیسم‌های فیزیولوژیکی مانند بهینه‌سازی مصرف اکسیژن، افزایش متابولیسم عضلانی، ایجاد پس‌فعال‌سازی و نیز افزایش تحمل کششی بافت‌ها و جذب بهتر انرژی انجام می‌پذیرد (۲۹). مکانیسم احتمالی بهبود سرعت بیشینه در حرکت دست و لگن پس از استفاده از این تکنیک را می‌توان با افزایش حساسیت یون‌های کلسیم در میوسیت‌ها و در نتیجه افزایش کارایی انقباض عضلانی سریع و نیز تغییر در زاویه اتصال تاندون‌ها برای تولید نیروی بیشتر توجیه کرد. علاوه بر این، ماهیت پلایومتریک تمرین پرشی، جذب فیبرهای عضلانی تندانقباض و تسریع هدایت پتانسیل‌های عصبی را تسهیل می‌نماید که در نهایت به جذب واحدهای حرکتی بیشتر و بهبود عملکرد ضربه می‌انجامد (۲۸). نتایج مطالعه‌ای نشان می‌دهد که یک ست منفرد از تمرینات پلایومتریک پرشی به‌طور معناداری ارتفاع و توان پرش را افزایش می‌دهد. در مقابل، یک پروتکل چندستی (سه ست ۱۰تکراری)، در بازه‌ی ۱۵ثانیه‌ای هیچ بهبودی در عملکرد پرش ایجاد نکرد. به نظر می‌رسد دلیل عدم موفقیت پروتکل چند ستی در مطالعه مذکور، فاصله ریکاوری کوتاه پس از محرک باشد. محققان دلیل شکست پروتکل چندستی را خستگی متابولیک ناشی از مدت تمرین طولانی‌تر (حدود ۷۰ثانیه) می‌دانند. اما نکته جالب اینجاست در مطالعه حاضر، یک پروتکل چندستی با زمان‌های استراحت مشابه منجر به بهبود شد. توجیه احتمالی این تناقض، حجم تمرین کمتر است. تعداد تکرارهای کمتر (۵ در برابر ۱۰) ممکن است از تجمع خستگی جلوگیری کند و درعین‌حال مزایای فعال‌سازی عصبی–عضلانی را حفظ نماید (۳۳).

بر اساس گزارش‌ها، اوج اثر PAP معمولاً ۳ تا ۴ دقیقه پس از تمرینات پلایومتریک و حداقل ۵دقیقه پس از تمرینات مقاومتی رخ می‌دهد (۳۴). اما برخی مطالعات، مانند تحقیق ویجیا کوی، اوج عملکرد را حدود ۱۲دقیقه پس از مداخله گزارش کرده‌اند. این عدم همخوانی در یافته‌ها را می‌توان به حجم تمرین بالا (۳ ست اسکات با ۸۵٪ یک تکرار بیشینه) نسبت داد. حجم زیاد احتمالاً با ایجاد خستگی بیشتر، نمودار زمانی رسیدن به اوج اثر PAP را به تأخیر انداخته است. همچنین تفاوت در سرعت اجرا و نوع زنجیره حرکتی قابل تأمل است. در این مطالعه از حداکثر سرعت پرش استفاده شد، در حالی که شواهد نشان می‌دهند اجرای پروتکل با ۸۰٪ حداکثر سرعت ممکن است نتایج بهتری نسبت به ۹۰٪ داشته باشد. این نشان می‌دهد شدت محرک PAP یک رابطه خطی ساده با پاسخ عملکردی ندارد و احتمالاً برای هر فرد یک نقطه بهینه خاص وجود دارد (۳۵). بسیاری از مطالعات هنرهای رزمی، با اتکا به رویکرد فردی، بر درگیر کردن مستقیم دست‌ها و پاها در پروتکل‌های تمرینی تأکید دارند تا عملکرد را مستقیماً بهبود بخشند (۳۶–۳۸). در مقابل، مطالعه حاضر بر لگن به‌عنوان رابط حیاتی بین اندام تحتانی و فوقانی، با استناد به اصل زنجیره حرکتی و اهمیت چرخش تنه در ضربه، تمرکز کرده است. بااین‌حال، پروتکل‌های مستقیم‌تر، مانند مطالعه آندال که از تمرینات مقاومتی با کش (۲ ست ۱۰ تکراری) استفاده کرد، نتایج عملکردی بهتری نسبت به یافته‌های این پژوهش نشان داده‌اند. مکانیسم عمل کش‌های الاستیک احتمالاً افزایش تولید نیرو در کل دامنه حرکتی است. همچنین، استفاده از کش بدون مختل کردن تکنیک ضربه، انتقال نیرو را کارآمدتر می‌کند. این ویژگی‌ها می‌توانند دلیل عملکرد بهتر رزمی‌کاران با پروتکل مبتنی بر کش را در مقایسه با پروتکل پرشی این مطالعه توضیح دهند (۳۶). در مطالعه شارما، هر دو پروتکل قدرتی (اسکات با ۹۰٪ یک تکرار بیشینه) و پلایومتریک (پرش ارتفاع) به‌طور معناداری ارتفاع پرش و زمان استارت را بهبود بخشیدند. پروتکل پلایومتریک همچنین منجر به افزایش سرعت بیشینه شد. با وجود این، نتایج نشان داد که پلایومتریک برتری نسبی دارد (۳۹). یک توجیه احتمالی، خستگی کمتر در این روش است، چرا که تمرینات قدرتی ممکن است با تجمع بیشتر متابولیت‌هایی مانند لاکتات همراه باشند و سطح انرژی عضله را کاهش دهند (۴۰). در مقابل، برخی مطالعات تفاوت معناداری بین اثرات این دو روش گزارش نکرده‌اند. توضیح احتمالی این ناهمخوانی‌ها، حجم ناکافی بار

تمرینی یا ویژگی‌های خاص پروتکل‌های مورد استفاده ذکر شده است. این تناقضات بر پیچیدگی انتخاب پروتکل بهینه و اهمیت توجه به عوامل فردی و نیازهای رشته ورزشی تأکید می‌کنند (۴۱, ۴۲).

برخلاف انتظار، فرکانس ضربه پس از اعمال پروتکل PAP در این مطالعه تغییر معناداری نکرد. این نتیجه با برخی تحقیقات پیشین روی ورزشکاران رزمی همخوانی دارد (۱۹, ۴۳). توضیح احتمالی آن تعادل پویا بین دو پدیده فیزیولوژیک است: از یک سو، خستگی ناشی از فعالیت حاد می‌تواند عملکرد عصبی–عضلانی را به طور موقت کاهش دهد و بر سرعت حرکات تناوبی اثر بازدارنده داشته باشد. از سوی دیگر، مکانیسم توانمندسازی PAP، پتانسیل تولید نیرو را افزایش می‌دهد. به نظر می‌رسد در این شرایط، اثرات مثبت PAP و منفی خستگی خنثی شده و فرکانس ضربه ثابت مانده است. با توجه به استفاده از پروتکل پلایومتریک در این پژوهش، به نظر می‌رسد این روش می‌تواند به عنوان یک راهبرد عملی و کم‌خطر در گرم‌کردن تخصصی پیش از اجرای مهارت‌های کاراته مورد استفاده قرار گیرد، بدون آنکه تأثیر منفی بر ریتم و فرکانس ضربات رزمی‌کاران بگذارد. یافته قابل توجه دیگر این مطالعه، افزایش نرخ خستگی در اثر تمرینات پلایومتریک بود. برخلاف نتایج معمول در تمرینات قدرتی (۱۹)، این یافته نشان می‌دهد که تمرینات پلایومتریک اگرچه تأثیر منفی بر سرعت ضربه ندارند، اما بار فیزیولوژیکی چشمگیری بر سیستم عصبی–عضلانی وارد می‌کنند. این بار اضافی خود را به‌صورت کاهش توانایی تولید حداکثر قدرت در تکرارهای پیاپی نشان می‌دهد. با این‌حال، با توجه به ماهیت مسابقات کاراته که در بازه‌های زمانی کوتاه و با نیاز به اجرای بهینه تعداد محدودی ضربه در لحظات حساس طراحی شده، افزایش مشاهده‌شده در نرخ خستگی ممکن است تأثیر محسوسی بر عملکرد کلی ورزشکاران نداشته باشد. به بیان دیگر، اگرچه تمرینات پلایومتریک باعث افزایش خستگی می‌شوند، اما در محدوده زمانی کوتاه مسابقات کاراته، این اثر احتمالاً آنقدر جدی نیست که مزایای ناشی از فعال‌سازی مؤثر سیستم عصبی–عضلانی را خنثی کند. به‌نظر می‌رسد تمرینات PAP در قالب پلایومتریک، اگرچه بار فیزیولوژیکی قابل‌توجهی بر سیستم عصبی–عضلانی وارد کرده و موجب افزایش نرخ خستگی می‌شوند، اما در مقابل می‌توانند مزیت عملکردی مهمی مانند بهبود زمان واکنش را نیز ایجاد کنند. این بهبود احتمالاً از دو مسیر اصلی حاصل می‌شود: نخست، تسهیل در هدایت پیام‌های عصبی و فراخوانی واحدهای حرکتی که به افزایش هماهنگی و بازده سیستم عصبی–عضلانی می‌انجامد. این مشاهدات با ایده‌ای سازگار است که نشان می‌دهد وقتی پاسخ حرکتی شباهت زیادی به الگوهای تمرین‌شده قبلی دارد، سرعت اجرای آن افزایش می‌یابد (۴۴). دوم، تأثیر ترجیحی PAP بر فیبرهای عضلانی تندانقباض نوع دوم است. این فیبرها در پاسخ به تمرین پلایومتریک، تغییرات بیوشیمیایی مانند فسفوریلاسیون در زنجیره‌های تنظیمی میوزین را تجربه می‌کنند که حساسیت آنها به کلسیم و در نتیجه کارایی انقباضیشان را بالا می‌برد (۴۵). در پی آن، به‌کارگیری مؤثرتر این فیبرها امکان‌پذیر شده و در نهایت بهبود قابل‌توجهی در زمان واکنش پدید می‌آید. در مجموع، اگرچه این تمرینات هزینه‌ای در قالب خستگی به همراه دارند، اما دستاورد آنها یعنی زمان واکنش سریع‌تر، می‌تواند در موقعیت‌های رقابتی کاراته که پیروزی گاه به سرعت و دقت یک حرکت انفجاری وابسته است مزیتی تعیین‌کننده باشد. بنابراین، برنامه‌ریزی دقیق و زمان‌بندی هوشمندانه این تمرینات در روال تمرینی، برای بیشینه‌سازی منافع و کمینه‌سازی اثرات خستگی، از اهمیت ویژه‌ای برخوردار است.

پژوهش حاضر با چند محدودیت همراه است که تعمیم‌پذیری نتایج را تحت تأثیر قرار می‌دهد. نخست، شرکت‌کنندگان تنها از میان مردان کاراته‌کار انتخاب شدند و بنابراین تعمیمِ یافته‌ها به ورزشکاران زن نیازمند احتیاط است. دوم، نرخ خستگی صرفاً بر اساس افت سرعت ضربات محاسبه شد و شاخص‌های عینی فیزیولوژیک مانند سطح لاکتات یا ثبت الکترومیوگرافی سطحی مستقیماً اندازه‌گیری نشدند که این امر، تحلیل جامع‌تری از خستگی را محدود می‌کند. سوم، پروتکل پس‌فعال‌سازی در محیط کنترل‌شده آزمایشگاهی و با فاصله ریکاوری ثابت (۵دقیقه) اجرا شد که ممکن است با شرایط پویا و متغیر مسابقه واقعی متفاوت باشد. همچنین، به‌دلیل عدم

استفاده از طرح تصادفی‌شده و متوازن‌شده برای ترتیب اجرای مراحل گرم‌کردن (سنتی و پس‌فعال‌سازی)، احتمال تأثیرگذاری عواملی مانند خستگی تجمعی یا اثر یادگیری بر نتایج وجود دارد. پیشنهاد می‌شود در مطالعات آتی، ترتیب اجرای شرایط به‌روش تصادفی (قرعه‌ای) تعیین شود تا اثر این عوامل مزاحم به حداقل برسد.

نتیجه‌گیری نهایی

گرم‌کردن پلایومتریک مبتنی بر PAP به‌طور معناداری سرعت خطی بیشینه‌ی دست و لگن را در ضربه‌ی گیاکو–زوکی افزایش داد و زمان واکنش را در کاراته‌کاران مرد بهبود بخشید، به نظر می‌رسد این پروتکل می‌تواند راهبردی عملی و مؤثر برای بهینه‌سازی عملکرد انفجاری در مسابقات کوتاه‌مدت باشد و مبنایی برای طراحی برنامه‌های تمرینی شخصی‌سازی‌شده فراهم کند.

سپاسگزاری

سپاس از هیئت کاراته آذربایجان شرقی و کارکنان آزمایشگاه آنالیز حرکت دانشگاه علوم پزشکی تبریز، برای هماهنگی و حمایت از حضور ورزشکاران در این پژوهش، همکاری شما نقش کلیدی در پیشبرد این مطالعه داشت.

ملاحظات اخلاقی

پیروی از اصول اخلاق پژوهش

تمامی اصول اخلاقی در این پژوهش رعایت شده است. کلیه ملاحظات اخلاقی به‌صورت شفاف برای شرکت‌کنندگان توضیح داده شد. سپس، رضایت‌نامه آگاهانه کتبی از شرکت‌کنندگان اخذ گردید. تمامی مراحل این پژوهش بر اساس اصول اخلاقی مندرج در بیانیه هلسینکی برگزار شد. 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.

حامی مالی

این پژوهش هیچ‌گونه کمک مالی از سازمان‌های دولتی، خصوصی و غیرانتفاعی دریافت نکرده است.

مشارکت نویسندگان

تمام نویسندگان در بخش‌های مختلف انجام این پژوهش مشارکت فعال داشته‌اند.

تعارض

هیچ نوع تعارض منافعی در این مطالعه وجود ندارد.

Reference

1. Jeknić V, Dopsaj M, Koropanovski N. Relationship between intermuscular synchronization of upper leg muscles and training level in karate kumite practitioners. Journal of Functional Morphology and Kinesiology. 2025;10(3):234. [DOI:10.3390/jfmk10030234]

2. Izzo R, Febo M, Cruciani A, Cejudo A, Hosseini Vardei C, Crudelini E. Analysis of peak linear accelerations expressed in the technical gesture of gyaku-zuki in karate kumite, comparing dominant and non-dominant limbs, including a complete review of the subject. Journal of Physical Education and Sport. 2023;23(7):1829-1845.

3. Stanley E, Thomson E, Smith G, Lamb KL. An analysis of the three-dimensional kinetics and kinematics of maximal effort punches among amateur boxers. International Journal of Performance Analysis in Sport. 2018;18(5):835-854. [DOI:10.1080/24748668.2018.1525651]

4. Naserpour H, Baker JS, Letafatkar A, Rossettini G, Dutheil F. An investigation of knee injury profiles among Iranian elite karatekas: observations from a cross-sectional study. International Journal of Environmental Research and Public Health. 2021;18(13):6888. [DOI:10.3390/ijerph18136888]

5. Zhao W, Wang C, Bi Y, Chen L. Effect of integrative neuromuscular training for injury prevention and sports performance of female badminton players. BioMed Research International. 2021;2021:5555853. [DOI:10.1155/2021/5555853]

6. Amirshakeri B, Khalkhali Zavieh M, Rezaei M, Adigozali H. Measuring the force perception in knee flexor/extensor muscles in patients with anterior cruciate ligament injury and healthy subjects. Journal of Back and Musculoskeletal Rehabilitation. 2022;35(1):103-110. [DOI:10.3233/BMR-200208]

7. Costa PB, Medeiros HB, Fukuda DH. Warm-up, stretching, and cool-down strategies for combat sports. Strength and Conditioning Journal. 2011;33(6):71-79. [DOI:10.1519/SSC.0b013e31823504c9]

8. Eslami A, Sahebozamani M, Bahiraei S. The effect of the FIFA 11+ Kids warm-up training program on lower limb injury prevention and football player performance: a systematic review. Journal of Sport Biomechanics. 2023;9(1):2-15. [DOI:10.61186/JSportBiomech.9.1.2]

9. Malliou P, Rokka S, Beneka A, Mavridis G, Godolias G. Reducing risk of injury due to warm up and cool down in dance aerobic instructors. Journal of Back and Musculoskeletal Rehabilitation. 2007;20(1):29-35. [DOI:10.3233/BMR-2007-20105]

10. Andre MJ, Fry AC, McLellan E, Weiss LW, Moore CM. Acute effects of static stretching on bench press power and velocity in adolescent male athletes. International Journal of Sports Science and Coaching. 2014;9(5):1145-1152. [DOI:10.1260/1747-9541.9.5.1145]

11. Anbarian M, Avazzadeh Samani A. Comparison of the effectiveness of traditional and post-activation potentiation warm-up methods on EMG variables of selected lower limb muscles during squat jump. Physical Treatments. 2022;12(2):123-132. [DOI:10.32598/ptj.12.2.510.1]

12. Hedayati Y, Amirseyfaddini MR, Amiri Khorasani M. The effect of post-activation performance enhancement using ballistic movements, heavy resistance, and dynamic stretching on barbell balance during the bench press. Journal of Sport Biomechanics. 2026;11(4):360-376. [DOI:10.61882/JSportBiomech.11.4.360]

13. McKiel A, Woods S, Gabriel DA, Vandenboom R, Falk B. Post-activation potentiation and potentiated motor unit firing patterns in boys and men. European Journal of Applied Physiology. 2024;124(5):1561-1574. [DOI:10.1007/s00421-023-05377-z]

14. Zhang Y, Diao P, Wang J, Li S, Fan Q, Han Y, et al. The effect of post-activation potentiation enhancement alone or in combination with caffeine on anaerobic performance in boxers: a double-blind randomized crossover study. Nutrients. 2024;16(2):235. [DOI:10.3390/nu16020235]

15. Nazari F, Fatahi A. Football biomechanics and performance enhancement: a systematic review. Journal of Sport Biomechanics. 2023;9(3):252-270. [DOI:10.61186/JSportBiomech.9.3.252]

16. Katushabe ET, Kramer M. Effects of combined power band resistance training on sprint speed, agility, vertical jump height, and strength in collegiate soccer players. International Journal of Exercise Science. 2020;13(4):950-963. [DOI:10.70252/WZLX5662]

17. Goethel MF, Vilas-Boas JP, Machado L, Ervilha UF, Moreira PVS, Bendilatti AR, et al. Performance, perceptual and reaction skills and neuromuscular control indicators of high-level karate athletes in the execution of the gyaku tsuki punch. Biomechanics. 2023;3(3):415-424. [DOI:10.3390/biomechanics3030034]

18. Genç S, Günay AR, Günay E. The effects of resistance-based post-activation performance enhancement on reaction time and change of direction in basketball players. PLoS One. 2025;20(3):e0320437. [DOI:10.1371/journal.pone.0320437]

19. Garrido NC, Maldonado CV, Valenzuela TH, da Silva Santos JF, Muñoz EEG, Gómez JV, et al. Effects of post-activation potentiation exercises on kicking frequency, fatigue rate and jump performance in taekwondo athletes: a case study. Retos. 2020;38:679-683. [DOI:10.47197/retos.v38i38.76755]

20. Cleary CJ, Cook SB, Herda AA. Evaluation of rest interval following a series of tuck jumps on anaerobic performance. Journal of Exercise Science and Fitness. 2025;23(1):1-6. [DOI:10.1016/j.jesf.2024.11.001]

21. Rinaldi M, Nasr Y, Atef G, Bini F, Varrecchia T, Conte C, et al. Biomechanical characterization of the junzuki karate punch: indexes of performance. European Journal of Sport Science. 2018;18(6):796-805. [DOI:10.1080/17461391.2018.1455899]

22. Liu Y, Zhu Z, Chen X, Deng C, Ma X, Zhao B. Biomechanics of the lead straight punch of different level boxers. Frontiers in Physiology. 2022;13:1015154. [DOI:10.3389/fphys.2022.1015154]

23. Wu G, Van der Helm FC, Veeger HD, Makhsous M, Van Roy P, Anglin C, et al. ISB recommendation on definitions of joint coordinate systems of various joints for the reporting of human joint motion-Part II: shoulder, elbow, wrist and hand. Journal of Biomechanics. 2005;38(5):981-992. [DOI:10.1016/j.jbiomech.2004.05.042]

24. Aguiar L, Santos-Rocha R, Branco M, Vieira F, Veloso A. Biomechanical model for kinetic and kinematic description of gait during second trimester of pregnancy to study the effects of biomechanical load on the musculoskeletal system. Journal of Mechanics in Medicine and Biology. 2014;14(1):1450004. [DOI:10.1142/S0219519414500043]

25. Lenetsky S, Brughelli M, Nates RJ, Neville J, Cross MR, Lormier AV. Defining the phases of boxing punches: a mixed-method approach. Journal of Strength and Conditioning Research. 2020;34(4):1040-1051. [DOI:10.1519/JSC.0000000000002895]

26. Yousefi M, Sadeghi H, Ilbeigi S, Ebrahimabadi Z, Kakavand M, Wikstrom EA. Center of pressure excursion and muscle activation during gait initiation in individuals with and without chronic ankle instability. Journal of Biomechanics. 2020;108:109904. [DOI:10.1016/j.jbiomech.2020.109904]

27. da Silva Santos JF, Franchini E. Is frequency speed of kick test responsive to training? A study with taekwondo athletes. Sport Sciences for Health. 2016;12(3):377-382. [DOI:10.1007/s11332-016-0300-2]

28. Macht JW, Abel MG, Mullineaux DR, Yates JW. Development of 1RM prediction equations for bench press in moderately trained men. Journal of Strength and Conditioning Research. 2016;30(10):2901-2906. [DOI:10.1519/JSC.0000000000001385]

29. McGowan CJ, Pyne DB, Thompson KG, Rattray B. Warm-up strategies for sport and exercise: mechanisms and applications. Sports Medicine. 2015;45(11):1523-1546. [DOI:10.1007/s40279-015-0376-x]

30. Amiri Khorasani A, Amiri Khorasani MT, Mohammadipour F. Comparison of the maximum angular velocity of lower limb joints in different methods of zenkutsu-dachi in karate. Journal of Sport Biomechanics. 2020;6(1):12-21. [DOI:10.32598/biomechanics.6.1.3]

31. Stull R, Barham J. An analysis of movement patterns utilized by different styles in the karate reverse punch in front stance. In: ISBS Conference Proceedings Archive. 1988.

32. Kember LS, Riehm CD, Schille A, Slaton JA, Oliver JL, Myer GD, et al. Kinetics during the tuck jump assessment and biomechanical deficits in female athletes 12 months after ACL reconstruction surgery. American Journal of Sports Medicine. 2025;53(2):333-342. [DOI:10.1177/03635465241308579]

33. Sari C, Aytac T, Koc H, Buzdagli Y, Esen O, Karayigit R. Post-activation performance enhancement effect of two tuck-jump protocols with different volumes on 15-s vertical jump performance. Kinesiologia Slovenica. 2024;30(2):105-120. [DOI:10.52165/kinsi.30.2.105-120]

34. Seitz LB, Haff GG. Factors modulating post-activation potentiation of jump, sprint, throw, and upper-body ballistic performances: a systematic review with meta-analysis. Sports Medicine. 2016;46(2):231-240. [DOI:10.1007/s40279-015-0415-7]

35. Cui W, Chen Y, Wang D. Research on the effect of post-activation potentiation under different velocity loss thresholds on boxer's punching ability. Frontiers in Physiology. 2024;15:1429550. [DOI:10.3389/fphys.2024.1429550]

36. Aandahl HS, Van den Tillaar R, Von Heimburg E. Effect of post-activation potentiation on kinematics and kicking performance in a roundhouse kick with trained martial arts practitioners. In: ISBS Conference Proceedings Archive. 2015.

37. Ioannides C, Despotopoulou C, Hadjicharalambous M, Zaras N. Effects of warm-ups with weighted vests and resistance bands on physical fitness and combat ability of kumite karate athletes. Sports. 2024;12(3):79. [DOI:10.3390/sports12030079]

38. Finlay MJ, Greig M, Bridge CA, Page RM. Post-activation performance enhancement of punch force and neuromuscular performance in amateur boxing: toward a more individualized and real-world approach. Journal of Strength and Conditioning Research. 2024;38(6):1063-1071. [DOI:10.1519/JSC.0000000000004740]

39. Sharma SK, Raza S, Moiz JA, Verma S, Naqvi IH, Anwer S, et al. Postactivation potentiation following acute bouts of plyometric versus heavy-resistance exercise in collegiate soccer players. BioMed Research International. 2018;2018:3719039. [DOI:10.1155/2018/3719039]

40. Izquierdo M, Gonzalez-Izal M, Navarro-Amezqueta I, Calbet JA, Ibanez J, Malanda A, et al. Effects of strength training on muscle fatigue mapping from surface EMG and blood metabolites. Medicine and Science in Sports and Exercise. 2011;43(2):303-311. [DOI:10.1249/MSS.0b013e3181edfa96]

41. Esformes JI, Cameron N, Bampouras TM. Postactivation potentiation following different modes of exercise. Journal of Strength and Conditioning Research. 2010;24(7):1911-1916. [DOI:10.1519/JSC.0b013e3181dc47f8]

42. Till KA, Cooke C. The effects of postactivation potentiation on sprint and jump performance of male academy soccer players. Journal of Strength and Conditioning Research. 2009;23(7):1960-1967. [DOI:10.1519/JSC.0b013e3181b8666e]

43. Miarka B, Del Vecchio FB, Franchini E. Acute effects and postactivation potentiation in the special judo fitness test. Journal of Strength and Conditioning Research. 2011;25(2):427-431. [DOI:10.1519/JSC.0b013e3181bf43ff]

44. Etnyre B, Kinugasa T. Postcontraction influences on reaction time. Research Quarterly for Exercise and Sport. 2002;73(3):271-281. [DOI:10.1080/02701367.2002.10609020]

45. Hamada T, Sale DG, MacDougall JD, Tarnopolsky MA. Postactivation potentiation, fiber type, and twitch contraction time in human knee extensor muscles. Journal of Applied Physiology. 2000;88(6):2131-2137. [DOI:10.1152/jappl.2000.88.6.2131]