Mot. Behav, 2026, 17 (62): 93-110, DOI: 10.22089/mbj.2025.16694.2151

Motor Behavior

Journal hompage: https://mbj.ssrc.ac.ir

Research Article

Observation, and Motor Imagery on Accuracy and Functional Degrees of Freedom of Golf Put: The Modulating Effect of Feedback

Davoud Fazeli*[1], Fatemeh Jabbari[2], Hossein Taghizadeh[2], Leila Ghohestani[2]

1. Corresponding Author, Department of Sports Sciences, Faculty of Education and Psychology, Shiraz University, Shiraz, Iran.
2. Department of Sports Sciences, Faculty of Education and Psychology, Shiraz University, Shiraz

Received: 21/04/2024, Accepted: 23/07/2025, Online Published: 01/08/2025

* Corresponding Author: Davoud Fazeli1, E-mail: d.fazeli@shirazu.ac.ir

How to Cite: Fazeli, D; Jabbari, F; Taghizadeh, H; Ghohestani, L. (2026). Observation, and Motor Imagery on Accuracy and Functional Degrees of Freedom of Golf Put: The Modulating Effect of Feedback. *Motor Behavior*, 17(62), 93-110. In Persian. DOI: 10.22089/mbj.2025.16694.2151.

Extended Abstract

Background and Purpose

Motor learning can occur through various practice modalities such as physical execution, action observation, and motor imagery. According to the simulation theory, these methods engage similar neural mechanisms and activate overlapping brain regions, suggesting a shared basis for skill acquisition. While several neurophysiological and behavioral studies have supported this claim, there is also evidence indicating distinct underlying mechanisms for these methods.

Despite extensive research on movement outcomes, few studies have examined the effects of these practice methods on coordination-related variables such as functional degrees of freedom (fDOF). fDOF reflects the flexibility and synergistic structure of neuromuscular coordination and can be quantified using techniques like principal component analysis.

This study investigates whether physical practice, action observation, and motor imagery similarly affect movement accuracy and fDOF during a golf putting task. Exploring these effects may clarify the extent to which these methods share underlying mechanisms and inform the development of optimized training protocols.

Methods

This semi-experimental study used a pretest–posttest design with four groups: physical practice, motor imagery, action observation, and control. Forty right-handed male university students (mean age = 25 ± 3.4 years) with normal or corrected-to-normal vision participated. Participants were randomly assigned to groups. The experimental task was golf putting on a 4×9 m artificial green using a standard club and ball. The target was a 4 cm diameter circle fixed to the green.

After signing consent forms, participants completed a revised Movement Imagery Questionnaire. Seventeen reflective markers were placed bilaterally on key anatomical points. Each participant performed 12 trials aiming at a target 2.44 meters away. Kinematic data were captured with a six-

Copyright: © 2023 by the authors. Submitted for possible open access publication under the terms and conditions of the Creative Commons Attribution (CC BY) license (https://creativecommons.org/licenses/by/4.0/).

camera SIMI motion analysis system at 200 Hz sample rate. Participants wore tight black clothing to improve marker visibility.

During acquisition, each group completed 162 practice trials across nine blocks (18 trials per block, 2-minute rest between blocks). The physical practice group performed actual strokes without verbal or visual feedback. The action observation group watched videos of matched physical participants. The motor imagery group imagined each putt while holding the club at the start position and verbally confirmed each trial. The control group did not train but read an article on exercise benefits during the same period.

Twenty-four hours later, all participants completed a retention test identical to the pretest. Putting accuracy was assessed by measuring radial error—the distance between the ball's edge and the target. Kinematic data were filtered with a 4th-order Butterworth filter (7 Hz cutoff frequency), then standardized (Z-scores). Principal component analysis (PCA) on 54 variables (X, Y, Z coordinates of 18 markers) was used to estimate functional degrees of freedom (fDOF).

A 4 (Group) × 2 (Test Phase) mixed-design ANOVA was used to analyze both accuracy and kinematic data. All statistical analyses were performed using SPSS version 16, with the significance level set at $p < 0.05$.

Results

The analysis of participants' imagery ability (both visual and kinesthetic dimensions) revealed no significant differences between groups, indicating homogeneity in baseline mental imagery skills (all $F < 1$).

Regarding putting accuracy, results from the 4 (Group) × 2 (Test Phase) mixed ANOVA indicated significant main effects of Group ($F(3,36) = 19.78$, $p < .001$, $\eta^2p = 0.62$), Test Phase ($F(1,36) = 102.36$, $p < 0.001$, $\eta^2p = 0.74$), and their interaction ($F(3,36) = 18.57$, $p < 0.001$, $\eta^2p = 0.60$). Post hoc comparisons showed no significant differences between groups at the pretest phase ($p = 0.98$), whereas all pairwise comparisons at the posttest were significant (all $p < 0.05$). In terms of accuracy, performance ranked from best to worst as follows: Physical ($M = 20.13$), Observation ($M = 26.39$), Imagery ($M = 29.52$), and Control ($M = 36.23$). Significant improvements from pretest to posttest were observed in all groups except the control group ($p = 0.81$), indicating the effectiveness of all three training methods, particularly physical and observational practice.

For functional degrees of freedom (fDOF), the ANOVA revealed significant main effects for Group ($F(3,36) = 3.03$, $p = 0.05$, $\eta^2p = 0.21$), Test Phase ($F(1,36) = 8.72$, $p = 0.005$, $\eta^2p = 0.19$), and their interaction ($F(3,36) = 5.76$, $p = 0.003$, $\eta^2p = 0.32$). There were no significant group differences at pretest ($p = 0.94$), but during the posttest, the physical practice group showed significantly lower fDOF than all other groups (all $p < 0.05$), and the observation group showed significantly lower fDOF than both the imagery and control groups (all $p < 0.05$). No significant difference was found between the imagery and control groups ($p = 0.08$). Mean posttest fDOF values were: Physical = 4.66, Observation = 5.16, Control = 5.72, Imagery = 6.06. Furthermore, significant within-group reductions in fDOF from pretest to posttest were observed in the physical and observation groups (both $p < 0.05$), but not in the imagery or control groups. These findings suggest that physical and observational training were more effective in enhancing coordination and reducing movement redundancy.

Conclusion

The results demonstrated that while all experimental groups improved in accuracy from pretest to posttest, physical practice yielded the highest performance, followed by action observation and motor imagery. Functional degrees of freedom (fDOF) decreased significantly only in the physical and observation groups, indicating more efficient movement coordination. These findings suggest that the three practice methods may rely on distinct underlying mechanisms.

Based on internal model theory (32), motor imagery may lack effective sensory feedback integration, leading to less precise motor tuning. In contrast, action observation allows visual feedback but still lacks proprioceptive engagement, resulting in intermediate effectiveness. Physical practice, combining both feedback modalities, produced the most efficient learning. The results align with models emphasizing error correction and feedback-based adaptation (30,35-37). Future research should manipulate feedback availability directly and include EEG or coordination metrics to further explore neural and behavioral mechanisms. Overall, combining these methods may optimize motor learning depending on task demands.

Keywords: Synergy, Internal Models, Feedback, Emulation.

Article Message

This study highlights the differential effectiveness of physical execution, action observation, and motor imagery in motor learning. While all three methods improved performance, physical practice showed superior outcomes in both accuracy and movement coordination. Action observation ranked second, outperforming motor imagery. Functional degrees of freedom analysis revealed more efficient neuromuscular control in the physical and observational groups. These results suggest that feedback availability and sensory engagement are critical for optimizing internal model updating. The findings support using combined or complementary practice strategies based on task complexity, offering practical implications for motor learning and rehabilitation interventions.

Ethical Considerations

This study was reviewed and approved by the Ethics Committee of Shiraz University.

Authors' Contributions

- Conceptualization: Davoud Fazeli
- Data Collection: Davoud Fazeli, Fatemeh Jabbari, Hossein Taghizadeh, Leila Ghohestani
- Data Analysis: Davoud Fazeli, Fatemeh Jabbari, Hossein Taghizadeh, Leila Ghohestani
- Manuscript Writing: Davoud Fazeli, Fatemeh Jabbari, Hossein Taghizadeh, Leila Ghohestani
- Review and Editing: Davoud Fazeli, Fatemeh Jabbari, Hossein Taghizadeh, Leila Ghohestani
- Responsible for funding: None declared
- Literature Review: Davoud Fazeli, Fatemeh Jabbari, Hossein Taghizadeh, Leila Ghohestani
- Project Manager: Davoud Fazeli
- Any Other Contributions: None

Conflict of Interest

The authors declare no conflict of interest related to the publication of this article.

Acknowledgments

The authors express their sincere gratitude to the participants whose cooperation made this research possible.

رفتار حرکتی، زمستان ۱۴۰۴، دوره ۱۷، شماره ۶۲، صص. ۱۱۰-۹۳. DOI: 10.22089/mbj.2025.16694.2151

Motor Behavior

Journal hompage: https://mbj.ssrc.ac.ir

نوع مقاله: پژوهشی

تأثیر اجرای جسمانی، مشاهده عمل و تصویرسازی حرکتی بر دقت و درجات آزادی کارکردی ضربه گلف: نقش تعدیل‌کننده بازخورد

داود فاضلی*[۱]، فاطمه جباری[۲]، حسین تقی‌زاده[۳]، لیلا قوهستانی[۴]

۱. بخش علوم ورزشی، دانشکده علوم تربیتی و روانشناسی، دانشگاه شیراز، شیراز، ایران.
۲. بخش علوم ورزشی، دانشکده علوم تربیتی و روانشناسی، دانشگاه شیراز، شیراز، ایران.
۳. بخش علوم ورزشی، دانشکده علوم تربیتی و روانشناسی، دانشگاه شیراز، شیراز، ایران.
۴. بخش علوم ورزشی، دانشکده علوم تربیتی و روانشناسی، دانشگاه شیراز، شیراز، ایران.

تاریخ دریافت: ۱۴۰۳/۰۲/۰۲، تاریخ پذیرش: ۱۴۰۴/۰۵/۰۱ ، تاریخ انتشار آنلاین:۱۴۰۴/۰۵/۱۰

*نویسنده مسئول: داود فاضلی، d.fazeli@shirazu.ac.ir

How to Cite: Fazeli, D; Jabbari, F; Taghizadeh, H; Ghohestani, L. (2026). Observation, and Motor Imagery on Accuracy and Functional Degrees of Freedom of Golf Put: The Modulating Effect of Feedback. *Motor Behavior*, 17(62), 93-110. In Persian. DOI: 10.22089/mbj.2025.16694.2151.

چکیده

هدف این پژوهش بررسی تأثیر اجرای جسمانی، مشاهده عمل و تصویرسازی حرکتی بر یادگیری و درجات آزادی کارکردی ضربه گلف بود، بر این اساس، ۴۰ دانشجوی مبتدی مرد راست‌دست (۳/۴±۲۵ سال) در این پژوهش شرکت کردند و به صورت تصادفی در چهار گروه تمرین جسمانی، مشاهده عمل، تمرین ذهنی و کنترل تقسیم شدند. ابتدا از شرکت‌کنندگان خواسته شد که یک پیش‌آزمون شامل ۱۲ کوشش را تکمیل کنند. بعد از پیش‌آزمون، شرکت‌کنندگان ضربه گلف را براساس گروه‌بندی‌های مربوط (۹ بلوک ۱۸ کوششی) تمرین کردند. یک روز پس از اکتساب، آزمون یادداری مشابه با پیش‌آزمون اجرا شد. متغیرهای دقت حرکت و کینماتیک حرکت در مراحل پیش‌آزمون و پس‌آزمون ثبت شدند. با استفاده از روش تجزیه و تحلیل مؤلفه‌های اصلی، درجات آزادی کارکردی اندازه‌گیری شدند. به‌منظور تحلیل داده‌ها از طرح تحلیل واریانس مرکب با ۴ (گروه) × ۲ (مراحل آزمون) استفاده شد. نتایج متغیر دقت حرکت نشان داد، گروه تمرین جسمانی در یادداری نسبت به دو گروه تجربی دیگر عملکرد سطح بالاتری داشت (همه $P<۰/۰۵$). همچنین گروه مشاهده‌ای نسبت به گروه ذهنی دقت بیشتری داشت ($P<۰/۰۵$). این نتایج در متغیر درجات آزادی کارکردی تکرار شد و گروه جسمانی بهتر از دو گروه تجربی دیگر عمل کرد (همه $P<۰/۰۵$). همچنین گروه مشاهده‌ای نسبت به گروه ذهنی درجات آزادی کارکردی کمتری داشت ($P<۰/۰۵$). این نتایج براساس ماهیت متفاوت بازخورد در این سه حالت اجرا و همچنین براساس تئوری مدل‌های درونی توجیه شدند.

واژگان کلیدی: هم‌کوشی، مدل‌های درونی، بازخورد، تقلید.

Copyright: © 2023 by the authors. Submitted for possible open access publication under the terms and conditions of the Creative Commons Attribution (CC BY) license (https://creativecommons.org/licenses/by/4.0/).

مقدمه

تمرین به‌عنوان سنگ‌بنای یادگیری حرکتی به روش‌های مختلف ازجمله روش تمرین جسمانی، یادگیری مشاهده‌ای و تمرین ذهنی انجام می‌شود. براساس نظریه شبیه‌سازی (۱)، هر سه روش تمرینی از مکانیزم مشابهی برای اثرگذاری بهره می‌برند. این نظریه اعتقاد دارد که هنگام اجرای این سه روش، نقاط مشابهی از مغز فعال می‌شوند؛ بنابراین احتمالاً مکانیزم‌های زیربنایی مشابهی نیز خواهند داشت. هم‌راستا با این نظریه، شواهد پژوهشی نشان می‌دهند در حین تصور، اجرای جسمانی یا مشاهده نقاط مشابهی در مغز فعال می‌شوند (۲). همچنین در حین تصور یک مهارت حرکتی، فعالیت‌های عضلانی مشابهی با اجرای جسمانی در عضلات اصلی حرکت‌دهنده اندام مشاهده می‌شود (۳). علاوه بر این، وجود نورون‌های آینه‌ای در مغز و کارکرد مشابه این نورون‌ها در حین اجرای جسمانی و مشاهده عمل دیگران، به‌عنوان شاهدی برای این نظریه در نظر گرفته می‌شود (۴).

علاوه بر این شواهد عصب‌شناختی، شواهد رفتاری نشان‌دهنده مکانیزم‌های زیربنایی مشابه برای این سه روش تمرینی هستند؛ به عنوان مثال، زمان اجرای یک حرکت به صورت واقعی با زمان اجرای حرکت به صورت تصویرسازی ذهنی متناسب است. همچنین ذکر شده است که مدت‌زمان اجرای راه‌رفتن در یک مسیر به صورت واقعی با مدت‌زمان موردنیاز برای تصویرسازی راه‌رفتن در آن مسیر تفاوت معناداری ندارد (۳). فراتر از این شواهد، پژوهش‌ها نشان می‌دهند که قوانین صادق در حالت‌های جسمانی و ذهنی و همچنین مشاهده عمل صدق می‌کنند؛ به عنوان مثال، قانون فیتز در هر سه حالت جسمانی، ذهنی و مشاهده عمل صادق است و حتی شیب خط رگرسیون نیز برای این سه حالت با هم تفاوت معناداری ندارد؛ یعنی میزان افزایش اطلاعات برای پردازش با بالا رفتن شاخص دشواری به صورت یکسان تغییر می‌کند (۶، ۵، ۳). این پژوهش‌ها تا آنجا پیش رفته‌اند که در برخی موارد ادعا شده است بازخورد حاصل از تصویرسازی با بازخورد واقعی حرکت مشابه است (۷). شباهت بین تصویرسازی و اجرای واقعی در پیش‌بینی خطای حرکت (۸) و همچنین استفاده از مدل‌های درونی برای پیش‌بینی پیامدهای حرکت (۹) نشان داده شده است.

با وجود این شواهد پژوهشی که در حمایت از مکانیزم‌های مشابه این سه روش هستند، شواهد نشان می‌دهند این روش‌ها ممکن است مکانیزم‌های مشابهی نداشته باشند. منظور از مکانیزم‌ها فرایندهای درونی شامل فرایندهای مغزی، شناختی یا ادراکی است که اثرگذاری این روش‌های تمرینی برای یادگیری یک مهارت را فراهم می‌کند؛ به عنوان مثال، با وجود فعال شدن نقاط مشابه مغز در این روش‌ها، تفاوت‌های زیربنایی نیز در نقاط مختلف مغزی در بین آن‌ها وجود دارد (۲). همچنین شواهد رفتاری این ادعا را تأیید می‌کنند؛ برای مثال، زمان کلی حرکت در حالت تصویرسازی و اجرای عمل مشابه است، اما زمان اجرای قسمت‌های مختلف یک حرکت در حالت تصویرسازی با حالت اجرای جسمانی متفاوت است (۱۰). در بسیاری از موارد نشان داده شده است که تمرین ذهنی به اندازه تمرین جسمانی منجر به یادگیری مهارت مدنظر نمی‌شود و همین موضوع توسط برخی پژوهشگران به‌عنوان مبنایی برای تفاوت بین این دو روش تمرینی لحاظ شده است (۱۱). یادگیری مشاهده‌ای از طریق فرایندهای آشکار صورت می‌گیرد؛ در حالی‌که اجرای واقعی از طریق فرایندهای پنهان رخ می‌دهد (۱۲). همچنین تمرین یک تکلیف به صورت تصویرسازی ذهنی برخلاف تمرین جسمانی منجر به به‌روزرسانی مدل‌های درونی نمی‌شود (۱۵-۱۳). در این بین برخی پژوهش‌ها نشان می‌دهند تمرین جسمانی و مشاهده‌ای در برخی متغیرها با تمرین ذهنی تفاوت دارند (۱۶). یکی از این متغیرها می‌تواند بازخورد موجود در حرکت در بین این سه روش اجرا باشد. استدلال بر این است که بازخورد موجود در حالت تصویرسازی با بازخورد موجود در حالت اجرای جسمانی و مشاهده عمل، تفاوت دارد. این تفاوت به مکانیزم از بالا به پایین تصویرسازی نسبت داده شده است. استدلال می‌شود که به دلیل نبود بازخورد، مدل‌های درونی در حین تصویرسازی به‌روزرسانی نمی‌شوند.

با بررسی پژوهش‌ها در این زمینه مشاهده می‌شود که بیشتر پژوهش‌ها یا در سطح نوروفیزیولوژیک یا در سطح نتیجه حرکت انجام شده‌اند و کمتر پژوهشی به بررسی تأثیر این روش‌های تمرینی بر متغیرهای کینماتیک و الگوی هماهنگی حرکتی پرداخته است. در پژوهش‌های معدود نشان داده شده است که عمل دسترسی و چنگ زدن در حالت اجرای جسمانی و شبیه‌سازی تحت‌تأثیر اندازه شیء قرار می‌گیرد و تعداد درجات آزادی پویای این عمل در حین اجرای جسمانی و شبیه‌سازی با هم تفاوت ندارد (۱۷). در پژوهش دیگر، نرمی حرکت در حین تمرین جسمانی و تصویرسازی حرکتی بررسی شد. براساس نتایج، تمرین ذهنی مانند تمرین بدنی موجب بهبود نرمی حرکت شد، اما این بهبود به اندازه تمرین جسمانی نبود (۱۸). این نتایج در پژوهش دیگر نیز تکرار شد. علاوه بر آن، نشان داده شده است که تغییرپذیری الگوی هماهنگی در بین حالت تصویرسازی و اجرای جسمانی با هم تفاوت معناداری ندارد (۱۹)؛ البته تاکنون پژوهش‌ها به شکل محدود به بررسی هماهنگی حرکتی در بین این سه روش اجرا به صورت هم‌زمان پرداخته‌اند و پژوهش‌های پیشین بیشتر به بررسی متغیرهای کینماتیکی پرداخته‌اند که بعد هماهنگی برای انجام تکلیف را مدنظر قرار نمی‌دهد. یکی از متغیرهایی که می‌تواند به‌عنوان هماهنگی برای اجرای تکلیف در نظر گرفته شود، درجات آزادی کارکردی است (۲۰).

درجات آزادی کارکردی به جفت شدن زیرسیستم‌ها به‌منظور برآورده کردن هدف خارجی گفته می‌شود. براساس تعریف، درجات آزادی کارکردی می‌توانند به‌عنوان تعداد درجات آزادی باقیمانده از درجات آزادی اولیه تعریف شوند که قابلیت تحرک آزادانه خواهند داشت (۲۰). یکی از روش‌ها برای سنجش تعداد درجات آزادی دینامیک (سینرژی‌ها)، استفاده از تجزیه و تحلیل مؤلفه‌های اصلی است (۲۰). در تحقیقات اشاره شده است که با تمرین تعداد این درجات آزادی کاهش می‌یابد (۲۱). پژوهش دنگ و همکاران نشان داد، تمرین تصویرسازی ذهنی در ورزشکاران تنیس باعث بهبود عملکرد سرویس شد، اما این اثر به شرط هم‌زمانی تصویرسازی با مشاهده عمل و حضور بازخورد ذهنی دقت بیشتری داشت (۲۲). این یافته‌ها نشان‌دهنده نقش مهم بازنمایی‌های درونی و مکانیزم‌های تصحیح خطا در اثرگذاری تمرینات غیر جسمانی بر یادگیری مهارت است. همچنین پژوهش‌های اخیر (۲۴، ۲۳) تأکید کرده‌اند که شاخص‌هایی مانند درجات آزادی عملکردی و نرمی حرکت می‌توانند معیاری حساس برای مقایسه اثربخشی این روش‌ها باشند؛ زیرا نشان‌دهنده کیفیت انسجام سینرژیک در سیستم عصبی‌عضلانی‌اند. حال سؤال این است که آیا تصویرسازی، مشاهده عمل و تمرین جسمانی می‌توانند به صورت مشابهی بر درجات آزادی کارکردی تأثیر بگذارند؟ پاسخ مثبت به این سؤال، می‌تواند شاهدی برای وجود مکانیزم‌های زیربنایی مشابه در این سه روش در نظر گرفته شود. اگر نشان داده شود که این سه روش از مکانیزم‌های مشابهی استفاده می‌کنند، می‌توان روش‌های تمرینی (مانند آرایش‌های تمرینی) مشابهی را برای بهبود یادگیری از طریق این سه روش به کار گرفت. همچنین می‌توان یکی از این سه روش را به‌عنوان جایگزین دو روش دیگر برای بهبود یادگیری یک مهارت توصیه کرد، اما اگر نشان داده شود که این تمرینات مکانیزم‌های متفاوتی دارند، می‌توان برای بهبود هر جنبه از یادگیری مهارت از نوع خاصی از این تمرینات استفاده کرد.

روش پژوهش

تکلیف

در این آزمایش از تکلیف ضربه گلف به‌عنوان مهارت هدف استفاده شد. برای اجرای این تکلیف از توپ و چوب استاندارد گلف و چمن مصنوعی به ابعاد ۴×۹ متر استفاده شد. نقطه هدف، دایره‌ای بود که روی چمن چسبانده شده بود و قطری به ابعاد چهار سانتی‌متر داشت. شکل (۱) ابزار و نحوه تنظیمات برای اجرای آزمایش را نشان می‌دهد.

شکل ۱- ابزار و نحوه قرارگیری نقطه هدف و نقطه شروع

Figure 1- Tools and how to locate the target point and starting point

شرکت‌کنندگان

روش پژوهش حاضر از نوع نیمه‌تجربی با راهبرد کمی و طرح پیش‌آزمون-پس‌آزمون بود. شرکت‌کنندگان، ۴۰ دانشجوی مبتدی مرد راست‌دست (میانگین سنی ۳/۴±۲۵ سال) بودند که همگی دید نرمال یا نرمال‌شده (استفاده از عینک) داشتند. شرکت‌کنندگان به روش نمونه‌گیری دردسترس انتخاب شده و به صورت تصادفی در چهار گروه تمرین جسمانی، تمرین ذهنی، مشاهده عمل و کنترل تقسیم شدند.

روش جمع‌آوری داده‌ها

شکل (۲) طرح شماتیک از مراحل مختلف اجرای این پژوهش را نشان می‌دهد. بعد از تقسیم تصادفی هر فرد به گروه‌های مربوط، چند دقیقه استراحت برای آشنایی با فضای آزمایشگاه به او داده شد و در این فاصله زمانی فرم رضایت‌نامه فردی توسط وی تکمیل شد. سپس به افراد پرسشنامه تجدیدنظرشده تصویرسازی حرکتی ارائه شد تا سطح تصویرسازی بینایی و حرکتی آن‌ها سنجیده شود (۲۵).

شکل ۲- طرح شماتیک مراحل مختلف اجرای این پژوهش

Figure 2- Schematic diagram of the different phases of performing this research

سپس به‌منظور ثبت کینماتیک حرکات، روی بدن هر آزمودنی ۱۷ مارکر منعکس‌کننده نور قرار داده شد که ترتیب آن‌ها به صورت زیر بود: سر دیستال استخوان پنجم کف پایی (انگشت)، قوزک پا (مچ پا)، کندیل خارجی ران (زانو)، برجستگی

بزرگ ران (ران) زائده آخرومی شانه (شانه)، اپی کندیل کناری (آرنج)، زائده نیزه‌ای زند اعلی (مچ) و سر دیستال استخوان اول کف دستی (انگشت) و وسط پیشانی (سر)؛ مارکرگذاری به صورت دوسویه در دو سمت بدن بود. بعد از مارکرگذاری، افراد ۱۲ کوشش را به سمت هدفی با فاصله ۲/۴۴ متر از نقطه شروع انجام دادند. به‌منظور ثبت کینماتیک حرکت از دستگاه آنالیز حرکتی شرکت سیمی[1] استفاده شد که شامل شش دوربین ویدیویی بود. سرعت نمونه‌برداری دوربین‌ها روی ۲۰۰ فریم بر ثانیه تنظیم شد. برای تسهیل در قرارگیری مارکرها، فرد یک لباس تیره چسبان پوشید که مارکرها روی آن قرار می‌گرفتند. نمونه‌ای از نحوه مارکرگذاری روی بدن در شکل (۳) نشان داده شده است.

شکل ۳- نحوه مارکرگذاری بر روی بدن از نمای روبرو و پهلو

Figure 3- How to apply markers to the body from the front and side views

بعد از پیش‌آزمون شرکت‌کنندگان وارد مرحله اکتساب شدند. شکل (۴) طرح شماتیکی از نحوه تمرین گروه‌ها را نشان می‌دهد. شرکت‌کنندگان باید ۱۶۲ کوشش تمرینی را در ۹ بلوک ۱۸ کوششی (دو دقیقه استراحت بین هر بلوک) براساس گروه‌بندی‌های مربوط انجام می‌دادند. در گروه جسمانی، افراد هربار توپ را در نقطه شروع قرار می‌دادند و به توپ ضربه می‌زدند. این گروه هیچ بازخوردی درمورد نحوه اجرای حرکت دریافت نمی‌کردند و فقط نتیجه حاصل از حرکت خود را می‌دیدند (فاصله نقطه توقف توپ از هدف). از افراد این گروه در حین تمرین از صفحه ساجیتال فیلم‌برداری شد تا بعداً به‌عنوان الگو به گروه مشاهده‌ای نمایش داده شود. در گروه مشاهده عمل، افراد تمرین گروه جسمانی را مشاهده می‌کردند و هر فرد در این گروه با یکی از افراد گروه جسمانی جفت شده بود. در گروه تصویرسازی حرکتی، افراد چوب را در دست می‌گرفتند و در نقطه شروع حرکت می‌ایستادند و بدون هیچ حرکت قابل‌مشاهده‌ای به تصور حرکت مورد نظر می‌پرداختند. هربار که افراد یک حرکت را تصور می‌کردند، می‌بایست به صورت کلامی اعلام می‌کردند و سپس کوشش بعدی را اجرا می‌نمودند. گروه کنترل نیز هیچ تمرینی نداشت و در فاصله زمانی مشابه با مدت تمرین، مشغول خواندن یک متن مربوط به فواید ورزش برای سلامتی بود. یک روز بعد از مرحله اکتساب، افراد در آزمون یادداری مشابه با پیش‌آزمون شرکت کردند.

1. SIMI

شکل ۴- طرح شماتیک تمرین گروه‌ها در مرحله اکتساب

Figure 4- A schematic presentation of practice of groups during the acquisition

متغیرهای سنجش‌شده

دقت ضربه افراد با استفاده از سنجش فاصله مستقیم محل توقف توپ از هدف (خطای شعاعی) اندازه‌گیری شد؛ براین اساس، فاصله لبه توپ تا لبه هدف به صورت مستقیم اندازه‌گیری شد. همچنین به‌منظور سنجش تعداد درجات آزادی پویای درگیر در حرکت، ابتدا داده‌های خام که از نرم‌افزار دستگاه آنایز حرکت سیمی استخراج شده بود، از یک فیلتر باتروورث مرتبه چهارم با فرکانس قطع ۷ هرتز عبور داده شد. برای به دست آوردن تعداد مؤلفه‌های اصلی در حرکت که نشان‌دهنده تعداد درجات آزادی کارکردی[1] در حرکت‌اند (تعداد هم‌کوشی‌های[2] حرکتی) از آنالیز مؤلفه‌های اصلی[3] (PCA) استفاده شد. بدین‌منظور PCA روی ۵۴ متغیر مستقل (مختصات X ,Y, Z مربوط به ۱۸ مارکر مختلف) روی کوشش‌های پیش‌آزمون و پس‌آزمون با استفاده از نرم‌افزار متلب[4] اجرا شد. برای اجرای این آزمون، ابتدا در متلب، داده‌ها با عنوان یک متغیر به نام data تعریف شدند و در ادامه صرفاً از دستور PCA (data) استفاده شد. قبل از این تحلیل، ابتدا از روش تبدیل داده‌ها به نمرات استاندارد (نمره Z) برای امکان مقایسه بین‌کوششی و بین‌فردی استفاده شد. اگر داده‌ها استاندارد نشوند، به دلیل دامنه حرکت متفاوت مفاصل و همچنین دامنه حرکت متفاوت بین کوشش‌ها و همچنین

1. Functional Degrees of Freedom
2. Synergy
3. Principal Component Analysis
4. MATLAB

مدت‌زمان متفاوت کوشش‌ها، امکان مقایسه درون‌فردی و بین‌فردی امکان‌پذیر نیست. به‌منظور دستیابی به تعداد ابعاد مستقل موردنیاز برای منطبق کردن ویژگی‌های حرکتی متعدد و دستیابی به مشارکت متغیرها به اجزای مستقل، از رویکرد آنالیز خطی استفاده شد (۲۱). تعداد مؤلفه‌هایی که می‌توانستند ۹۰ درصد از واریانس کل را تبیین کنند، به‌عنوان مؤلفه‌های اصلی در نظر گرفته شدند؛ این درصد، درصدی متعارف در پژوهش‌های پیشین برای حد قابل‌قبول تعداد مؤلفه‌های اصلی است (۲۶، ۲۱). سپس تعداد مؤلفه‌های اصلی بین گروه‌های مختلف در پیش‌آزمون و پس‌آزمون محاسبه شد. هرچقدر تعداد این مؤلفه‌های اصلی کمتر باشند، یعنی درجات آزادی مکانیکی بدن توسط هم‌کوشی‌های کمتری کنترل می‌شود و درجات آزادی کارکردی کمتری برای اجرای حرکت لازم است (۲۱). دراصل، تعداد مؤلفه‌های اصلی نشان‌دهنده تعداد هم‌کوشی‌های حرکتی است.

تجزیه و تحلیل آماری

برای تحلیل داده‌های دقت و داده‌های کینماتیک از طرح تحلیل واریانس مرکب با ۴ (گروه) × ۲ (مراحل آزمون) استفاده شد. تمام تحلیل‌ها با استفاده از نرم‌افزار SPSS نسخه ۱۶ در سطح معناداری ۰/۰۵ انجام شد.

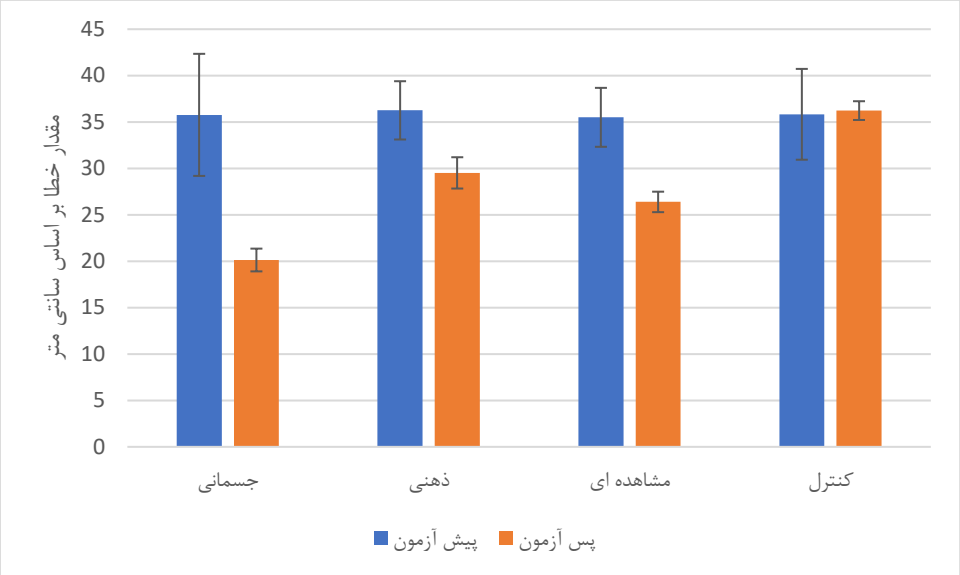
نتایج

داده‌های تصویرسازی

نتایج آزمون تحلیل واریانس نشان داد، اثر اصلی گروه در هر دو متغیر تصویرسازی بینایی و حرکتی معنادار نبود (همه F<۱). این یافته نشان‌دهنده نبود تفاوت بین گروه‌ها در این متغیرها است.

متغیر دقت

شکل (۵) میانگین خطای گروه‌ها را در مراحل مختلف نشان می‌دهد. نتایج آزمون تحلیل واریانس نشان داد، اثر اصلی گروه ($F_{(۳،۳۶)}=۱۹/۷۸$، $P<۰/۰۰۱$، $\eta^2_p=۰/۶۲$)، اثر اصلی آزمون ($F_{(۱،۳۶)}=۱۰۲/۳۶$، $P<۰/۰۰۱$، $\eta^2_p=۰/۷۴$) و اثر تعاملی گروه در مراحل آزمون ($F_{(۳،۳۶)}=۱۸/۵۷$، $P<۰/۰۰۱$، $\eta^2_p=۰/۶۰$) معنادار بودند. برای اثر تعاملی گروه در مراحل آزمون، آزمون تعقیبی اجرا شد که نتایج نشان داد، در پیش‌آزمون تفاوت معناداری بین گروه‌ها وجود نداشت ($P=۰/۹۸$)، اما نتایج این آزمون نشان داد، در مرحله پس‌آزمون همه گروه‌ها با همدیگر تفاوت معناداری داشتند (همه $P<۰/۰۵$). مقایسه میانگین‌ها نشان داد، گروه‌ها به صورت کلی به لحاظ دقت می‌توانند به ترتیب زیر مرتب شوند: جسمانی، مشاهده‌ای، ذهنی و کنترل (میانگین‌ها: جسمانی=۲۰/۱۳، ذهنی=۲۹/۵۲، مشاهده‌ای=۲۶/۳۹، کنترل=۳۶/۲۳). علاوه بر این، این نتایج نشان داد، در همه گروه‌ها به‌جز گروه کنترل ($P=۰/۸۱$)، تفاوت بین پیش‌آزمون با پس‌آزمون معنادار بود (همه $P<۰/۰۵$). همان طور که در شکل (۱) مشاهده می‌شود، گروه‌های تجربی در مرحله پس‌آزمون نسبت به مرحله پیش‌آزمون پیشرفت داشتند.



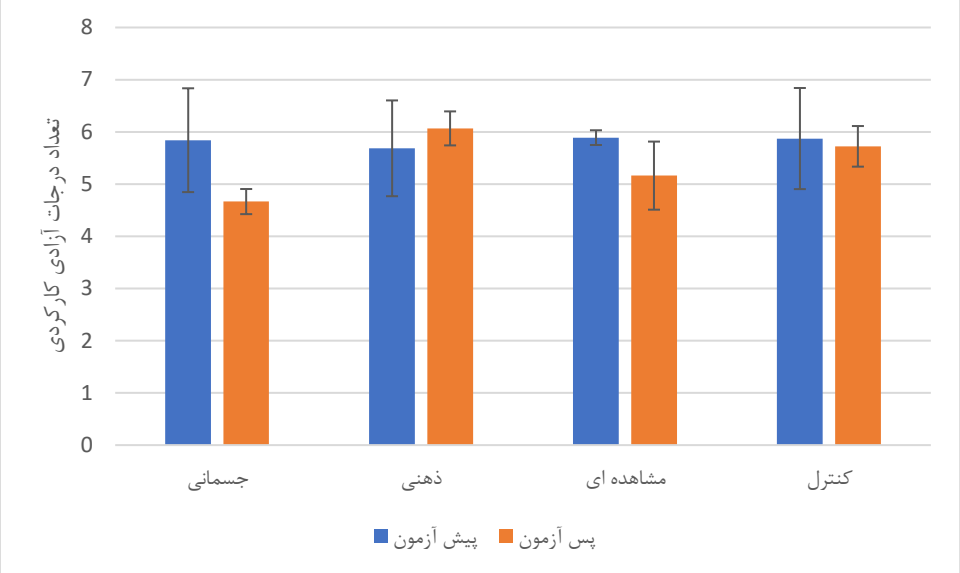
شکل ۴- میانگین خطای گروه‌ها در مراحل مختلف

(نوارهای خطا نشان‌دهنده انحراف استاندارد هستند)

Figure 4- the means of error for groups in different stages (Error bars indicate standard deviation)

درجات آزادی کارکردی

شکل (۵) میانگین تعداد درجات آزادی کارکردی را نشان می‌دهد. نتایج آزمون تحلیل واریانس نشان داد، اثر اصلی گروه (η^2_p=۰/۲۱ ،P=۰/۰۵ ،F(۳،۳۶)=۳/۰۳)، اثر اصلی مراحل آزمون (η^2_p=۰/۱۹ ،P=۰/۰۰۵ ،F(۱،۳۶)=۸/۷۲) و تعامل گروه در مراحل آزمون (η^2_p=۰/۳۲ ،P=۰/۰۰۳ ،F(۳،۳۶)=۵/۷۶) معنادار بودند. برای اثر تعاملی گروه در مراحل آزمون، آزمون تعقیبی اجرا شد که نتایج نشان داد، در مرحله پیش‌آزمون تفاوت معناداری بین گروه‌ها وجود نداشت (P=۰/۹۴)، اما در مرحله پس‌آزمون، گروه جسمانی با همه گروه‌ها تفاوت معناداری داشت (همه P<۰/۰۵). همچنین گروه مشاهده‌ای با گروه‌های ذهنی و کنترل تفاوت معناداری داشت (همه P<۰/۰۵)، اما تفاوت بین گروه‌های ذهنی و کنترل معنادار نبود (P=۰/۰۸). مقایسه میانگین‌ها نشان داد، گروه جسمانی نسبت به سایر گروه‌ها درجات آزادی کارکردی کمتری داشت و گروه مشاهده‌ای نیز نسبت به گروه‌های ذهنی و کنترل درجات آزادی کارکردی کمتری داشت (میانگین‌ها: جسمانی=۴/۶۶، ذهنی=۶/۰۶، مشاهده‌ای=۵/۱۶، کنترل=۵/۷۲). علاوه بر این، نتایج نشان داد، در گروه‌های جسمانی و مشاهده‌ای تفاوت معناداری بین پیش‌آزمون و پس‌آزمون وجود داشت (همه P<۰/۰۵)، اما تفاوت بین پیش‌آزمون و پس‌آزمون برای گروه‌های تصویرسازی و کنترل معنادار نبود (همه P>۰/۰۵). همان طور که در شکل (۲) مشاهده می‌شود، گروه‌های جسمانی و مشاهده‌ای در پس‌آزمون نسبت به پیش‌آزمون پیشرفت داشتند.



شکل ۵- میانگین تعداد درجات آزادی کارکردی برای گروه‌ها در مراحل مختلف آزمون
(نوارهای خطا نشان‌دهنده انحراف استاندارد هستند)

Figure 5- The number of functional degrees of freedom for groups in different tests
(Error bars indicate standard deviation)

بحث و نتیجه‌گیری

هدف مطالعه حاضر، بررسی تأثیر تمرین جسمانی، مشاهده‌ای و ذهنی بر یادگیری ضربه گلف و کنترل درجات آزادی کارکردی در حین اجرای این تکلیف بود. به طور کلی نتایج متغیر دقت حرکت نشان داد، در مرحله پس‌آزمون، گروه جسمانی نسبت به گروه‌های دیگر دقت بیشتری داشت و همچنین گروه مشاهده‌ای نسبت به گروه‌های ذهنی و کنترل دقت بیشتری داشت؛ اما این نتایج نشان داد که همه گروه‌های تجربی ازجمله گروه تصویرسازی از پیش‌آزمون به پس-آزمون در متغیر دقت حرکت پیشرفت داشتند. این نتایج براساس استدلال برخی از پژوهشگران (۱۱) می‌تواند نشان‌دهنده تفاوت در مکانیزم‌های زیربنایی این سه روش تمرینی باشد. براساس استدلال این پژوهشگران، در صورتی که مکانیزم‌های زیربنایی این سه روش مشابه باشد، باید میزان یادگیری آن‌ها بر اثر تعداد کوشش‌های مشابه با هم تفاوت معناداری نداشته باشد. این استدلال ممکن است منطقی به نظر برسد، اما می‌تواند به‌نوعی یک استدلال خام باشد. سؤال عمیق‌تر این است که چه چیزی بین این سه روش تمرینی با هم تفاوت دارد که منجر به نتایج متفاوت می‌شود؟

برای پاسخ به این سؤال باید به نتایج دیگر این پژوهش دقت کرد. در پژوهش حاضر نشان داده شد که در مرحله پس‌آزمون درجات آزادی کارکردی در تمرین جسمانی نسبت به تمرین مشاهده‌ای و ذهنی کمتر هستند که نشان می‌دهد مفاصل بدن در حالت جسمانی به صورت واحدهای ساختاری کمتری با هم هماهنگ شده‌اند تا هدف مدنظر در این تکلیف را برآورده کنند که نشان‌دهنده نیاز یا بار کنترلی کمتر روی سیستم مرکزی عصبی است (۲۰). همچنین براساس این پژوهش، در مشاهده عمل نسبت به تصویرسازی درجات آزادی کارکردی کمتری وجود دارد. علاوه بر این، فقط در تمرین جسمانی و مشاهده‌ای تفاوت در پیش‌آزمون و پس‌آزمون وجود دارد که نشان‌دهنده پیشرفت در کنترل درجات آزادی کارکردی در بین این دو گروه است. این نتایج هم‌راستا با مطالعاتی است که نشان می‌دهند، تمرین جسمانی مکانیزمی

متفاوت با تمرین ذهنی و مشاهده عمل دارد (۲۸، ۲۷) و نیز هم‌راستا با پژوهش‌هایی است که نشان‌دهنده تفاوت بین حالت جسمانی و مشاهده‌ای هستند (۱۵، ۱۴).

این یافته‌ها را می‌توان با دلایل متعددی توجیه کرد. ابتدا به بیان دلیل احتمالی برای عملکرد متفاوت گروه تصویرسازی در دقت حرکت با دو گروه تجربی پرداخته می‌شود. به اعتقاد برخی از پژوهشگران، تصویرسازی، فرایندی از بالا به پایین است که فقط شامل تولید یک دستور حرکتی است که در سطوح پایین‌تر قبل از اجرای واقعی این دستور یا به صورت کامل یا جزئی (در مواردی که فعالیت عضلانی مشاهده می‌شود) بازداری می‌شود (۲۹). از این دیدگاه، تصویرسازی فقط فرایند شبیه‌سازی حرکت بدون درگیر شدن فرایندهای از پایین به بالا (با فرایندهای ادراکی) است. براساس نظریه پژهان (۳۰)، تصویرسازی، فرایندی از بالا به پایین است که در آن بهره فیلتر کالمن طوری تعیین شده است که اطلاعات حسی واقعی هیچ تأثیری بر کپی‌های وابرانی نداشته باشند و پژهانگر (مغز) کپی وابرانی را براساس پویایی‌های خودش تولید می‌کند. دیگر عقیده نظریه پژهان این است که در تصویرسازی، فیلتر کالمن طوری تعدیل می‌یابد که دستورات حرکتی از عمل کردن بر بدن منع می‌شوند. ایده اصلی در پشت فیلتر کالمن این است که با تعیین برخی ضرایب (بهره‌ها)، مغز تخمین بهینه از وضعیت پردازش اصلی ایجاد می‌کند و سپس این تخمین را در ارزیابی مشابهی قرار می‌دهد که سیگنال اصلی را تولید می‌کند. نتیجه تخمین بهینه از سیگنال بدون نویز است؛ به عبارت ساده‌تر، این فیلتر موجب می‌شود که فرد بتواند از سیگنال‌هایی بهینه که برای حرکت استفاده می‌کند، برای تصویرسازی نیز استفاده کند، اما چون بازخوردهای حسی واقعی وجود ندارد، معمولاً تخمین مناسبی برای تولید سیگنال تصویرسازی نخواهد داشت. بهره کالمن مقدار تأثیرگذاری باقیمانده حسی بر پیش‌تخمین تولیدشده توسط پژهانگر را تعیین می‌کند. از این دیدگاه، نبودن بازخورد در حالت تصویرسازی (چه بازخورد حاصل از حرکت تصور شده و چه دخالت نداشتن بازخورد حسی برای صدور دستورات حرکتی) موجب می‌شود که این فرایند با حالت اجرای جسمانی تفاوت داشته باشد. برخلاف عقیده نظریه شبیه‌سازی (۱)، نظریه پژهان (۳۰) اعتقاد دارد که حس‌های جنبشی و عمقی در حالت تصویرسازی مصنوعی هستند و شباهتی به حس‌های واقعی ندارند. احتمال دارد نبود حس‌های ناشی از حرکت در حالت تصویرسازی موجب یادگیری کمتر در این حالت باشد. اعتقاد دیدگاه‌های نوین یادگیری بر این است که جفت شدن بین ادراک و عمل از طریق فرایندی از پایین به بالا و از طریق فرایندهای حسی ناشی از حرکت (یعنی فرایند از پایین به بالا) روی می‌دهد (۳۱)؛ بنابراین احتمال دارد که نبود این بازخوردهای حسی واقعی موجب افت در فرایند یادگیری در حالت تصویرسازی شده باشد. هم‌راستا با این ادعا، برخی از پژوهش‌های تجربی نشان داده‌اند که بازخورد بینایی هنگام تصویرسازی با بازخورد بینایی در حالت جسمانی و مشاهده متفاوت است (۱۶). شواهد پژوهشی نشان داده‌اند، زمانی که بازخورد بینایی از حالت اجرای جسمانی و مشاهده حذف شود، اثرات تمرین جسمانی و مشاهده عمل در حد تصویرسازی حرکتی تنزل می‌یابد که به‌نوعی این نتایج نشان‌دهنده تفاوت بازخورد حاصل از حرکت واقعی یا مشاهده شده با بازخورد حاصل از تصویرسازی است (۱۶). این یافته‌ها با پژوهش‌هایی که نشان‌دهنده تشابه بازخورد در حالت تصویرسازی با حالت جسمانی هستند، همخوانی ندارد (۷). این نتایج براساس نظریه مدل‌های درونی نیز توجیه‌شدنی است و هم‌راستا با این نظریه است. براساس نظریه مدل‌های درونی، مدل مستقیم براساس وضعیت فعلی بدن و کپی وابرانی از دستور حرکتی صادرشده وضعیت حسی-حرکتی آینده را پیش‌بینی می‌کند. اعتقاد بر این است که در حین تمرین جسمانی، بازخورد حسی که حاوی نویز و مقداری تأخیر است، با خروجی پیش‌بینی‌شده از مدل مستقیم ترکیب می‌شود تا تخمین دقیق از وضعیت بدن فراهم کند (۳۲). علاوه بر این، اعتقاد مدل‌های درونی بر این است که در حین حرکات شبیه‌سازی‌شده تخمین وضعیت بدن تنها براساس خروجی مدل درونی مستقیم رخ می‌دهد (۳۳). براساس این نظریه، در حین تمرین جسمانی، وضعیت تخمین‌زده‌شده از سیستم حرکتی که توسط ترکیبی از پیامد حسی واقعی و پیامد مدل مستقیم به وجود می‌آید، می‌تواند دستورات حرکتی آینده

را تنظیم دقیق کند. همچنین این نظریه اعتقاد دارد که در حین تمرین ذهنی این نوع تنظیمات دقیق رخ می‌دهد، اما چون تخمین وضعیت سیستم حرکتی تنها از مدل رو به جلو رخ می‌دهد، سیگنالی که این تنظیمات دقیق را فراهم می‌کند، دقت کمتری نسبت به حالت جسمانی خواهد داشت (۳۵، ۳۴). براساس این نظریه، در حین تمرین ذهنی پیش‌بینی مدل رو به جلو بهبود می‌یابد و این بهبود دلیل پیشرفت در اجرای فرد بعد از تمرین ذهنی است، اما چون بازخورد واقعی با خروجی مدل مستقیم ترکیب نمی‌شود، بهبود در اجرا به اندازه تمرین جسمانی نخواهد بود (۳۵). هم‌راستا با ادعای مذکور در این پژوهش نشان داده شد که پیشرفت در اجرا در حالت ذهنی نسبت به حالت بدون تمرین بیشتر بود، اما این مقدار پیشرفت از حالت جسمانی کمتر بود.

یافته جالب‌توجه دیگر در این پژوهش این بود که گروه مشاهده عمل نسبت به گروه جسمانی دقت کمتری داشت، اما در مقایسه با گروه تصویرسازی دقت بیشتری از خود نشان داد. این یافته‌ها با سایر یافته‌هایی که نشان‌دهنده تأثیر بیشتر مشاهده عمل بر یادگیری یک تکلیف نسبت به تصویرسازی هستند، همراستا است (۳۷، ۳۶)، اما با یافته‌هایی که نشان‌دهنده تأثیر یکسان تصویرسازی و مشاهده عمل است، هم‌راستا نیست (۱۵). همچنین این نتایج با پژوهش‌هایی که مشاهده را فرایندی صرفاً از بالا به پایین (۱۳) یا فرایندی صرفاً از پایین به بالا در نظر می‌گیرند (۳۸، ۲۹) هم‌راستا نیست. امروزه اعتقاد بر این است که مشاهده عمل فرایندی دوسویه است که هم مبتنی بر فرایندهای شناختی از بالا به پایین و هم مبتنی بر فرایندهای ادراک محور از پایین به بالا است (۳۹). از این دیدگاه، مشاهده عمل مکانیزمی جداگانه از تصویرسازی دارد که صرفاً به‌عنوان یک فرایند شناختی از بالا به پایین در نظر گرفته می‌شود. نتایج این پژوهش با این ادعا سازگاری دارد. در این پژوهش نشان داده شد که مشاهده عمل نسبت به حالت تمرین جسمانی هم در متغیر دقت حرکت و هم در متغیر هم‌کوشی حرکتی اثربخشی کمتری دارد، اما نسبت به تمرین ذهنی اثربخشی بیشتری را از خود نشان داد. اگر براساس ادعای نظریه شبیه‌سازی این سه حالت اجرا از مکانیزم‌های زیربنایی یکسانی استفاده می‌کردند و بازخورد حاصل از این سه حالت اجرا با هم یکسان بود، این انتظار می‌رفت که اثربخشی این سه حالت در دو متغیر دقت و هم‌کوشی با هم متناظر باشد؛ موضوعی که در این پژوهش تأیید نشد. این یافته‌ها را می‌توان براساس نظریه مدل‌های درونی توجیه کرد. براساس مدلی به نام «مدل موزایک»[1]، وقتی ما در حال آماده کردن یک حرکت هستیم، مغز به طور هم‌زمان مدل‌های رو به جلوی متعددی را راه‌اندازی می‌کند که رفتار سیستم حرکتی را پیش‌بینی می‌کنند تا پویایی‌های فعلی بدن را هنگام تعامل با اشیای مختلف را تعیین کنند. هر پیش‌بینی‌کننده (هر مدل رو به جلو) می‌تواند به‌عنوان آزمونگر فرضیه برای زمینه‌ای که شبیه‌سازی می‌کند، در نظر گرفته شود. در حین اجرای حرکت، هرکدام از این پیش-بینی‌ها با پیامدهای حسی واقعی قیاس می‌شوند. هرچقدر خطا در پیش‌بینی کمتر باشد، احتمال استفاده از آن مدل بیشتر می‌شود. علاوه بر این، هر پیش‌بینی‌کننده با یک کنترل‌کننده متناظر جفت می‌شود و یک جفت کنترل‌کننده-پیش‌بینی‌کننده را تشکیل می‌دهد. اگر پیش‌بینی یکی از مدل‌های رو به جلو به طور نزدیکی با بازخورد حسی واقعی انطباق داشته باشد، کنترل‌کننده جفت‌شده آن انتخاب خواهد شد و برای تعیین دستورات حرکتی بعدی استفاده خواهد شد. براساس این ایده، مدل‌های درونی می‌توانند برای تعاملات اجتماعی نیز به کار روند. در این مورد، پاسخ فرد دیگر به دستورات حرکتی فرد مشاهده‌گر مدل‌سازی می‌شود. تفاوت در رفتار مشاهده‌شده و رفتار پیش‌بینی‌شده برای غربال کردن این مدل استفاده می‌شود. براساس این دیدگاه، فرد مشاهده‌کننده اطلاعات بینایی فرد اجراکننده را به‌عنوان ورودی سیستم حرکتی خود استفاده می‌کند و در ادامه مشاهده‌گر دستورات حرکتی را صادر می‌کند که بتواند مسیر حرکت و وضعیت فعلی بدن فرد اجراکننده (مدل) را تولید (شبیه‌سازی) کند. مشاهده‌کننده از ماژول‌های متعدد خود برای

1. Modular Selection and Identification for Control

شبیه‌سازی عمل مشاهده‌شده استفاده خواهد کرد. دقت این وضعیت بعدی پیش‌بینی‌شده می‌تواند با وضعیت بعدی اجراکننده مقایسه شود تا خطای پیش‌بینی را تولید کند. مجدد، این خطاهای پیش‌بینی به احتمالات تبدیل می‌شوند که تعیین می‌کنند کدام‌یک از کنترل‌کننده‌های مشاهده‌کننده باید فعال شود تا حرکت مشاهده‌شده را تولید کند. مدل‌های مورداستفاده برای تولید دستورات حرکتی فرد اجراکننده و فرد مشاهده‌گر یکسان نیستند؛ بنابراین همواره مقداری خطا در پیش‌بینی وجود خواهد داشت و همچنین چون اطلاعات بازخورد حسی فرد مشاهده‌گر کاملاً یکسان با فرد اجراکننده نیست (کمبود بازخوردهای حس جنبشی در حالت مشاهده) فرایندهای تنظیم دقیقی که در اجرای جسمانی دیده می‌شود، شاید در حالت مشاهده وجود نداشته باشد (۴۰، ۳۴، ۳۳)، اما چون در حالت مشاهده، فرد پیش‌بینی حاصل از مدل‌های رو به جلو را با اجرای فرد الگو مقایسه می‌کند (به دلیل وجود بازخورد بینایی در حالت مشاهده) مقدار یادگیری نسبت به حالت تصویرسازی ذهنی که منبعی برای قیاس پیش‌بینی حاصل از مدل رو به جلو ندارد، بیشتر خواهد بود (۳۴، ۳۳، ۱۶)؛ موضوعی که در این پژوهش نیز نشان داده شد. این تئوری هم‌راستا با نتایج این پژوهش ادعا می‌کند که سه روش تمرینی مذکور از مکانیزم‌های زیربنایی متفاوتی استفاده می‌کنند. هم‌راستا با این ادعا شواهد پژوهشی نشان می‌دهند که به‌روزرسانی مدل‌های درونی فقط در حالت تمرین ذهنی رخ نمی‌دهند (۱۵–۱۳).

درخورتوجه است که یافته‌های پژوهش حاضر که نشان‌دهنده تفاوت معنادار در سازمان‌یافتگی درجات آزادی کارکردی میان سه روش تمرینی است، هم‌راستا با شواهد تجربی جدیدی است که تأکید دارند تفاوت در دسترس بودن و کیفیت بازخورد نقش تعیین‌کننده‌ای در فرایند یادگیری دارد. در مطالعه دنگ و همکاران، تمرین تصویرسازی ذهنی زمانی مؤثرتر واقع شد که با بازخورد بیرونی ترکیب شد؛ در حالی که تمرین صرفاً ذهنی بدون بازخورد ملموس، تغییرپذیری بیشتری در عملکرد ایجاد کرد (۲۲). یافته‌های پژوهش فاضلی و همکاران نیز به‌روشنی نشان داد که تمرین جسمانی منجر به کاهش قابل‌توجه‌تری در درجات آزادی عملکردی نسبت به تصویرسازی و مشاهده عمل می‌شود و این پدیده با بهبود دقت حرکتی و نرمی حرکت همبسته است (۲۴). از منظر نظری، این نتایج با مدل‌های درونی (۲۳) نیز سازگار است، که در آن یادگیری موفق در تصویرسازی تنها در صورتی اتفاق می‌افتد که مکانیزم‌های تصحیح خطا و پیش‌بینی مؤثر از طریق تجربه قبلی فعال شوند؛ بنابراین تفاوت در توانایی روش‌ها در ایجاد یا بازآفرینی بازخورد مؤثر، می‌تواند توجیه‌گر تفاوت در سازمان‌یافتگی سینرژی‌های حرکتی و تثبیت الگوی هماهنگی باشد؛ موضوعی که یافته‌های این پژوهش به‌روشنی آن را تأیید می‌کند.

درمجموع نتایج این پژوهش نشان داد، تمرین جسمانی نسبت به تمرین ذهنی و مشاهده عمل هم در سطح دستیابی به هدف تکلیف و هم در سطح هم‌کوشی مفاصل منجر به اثربخشی بیشتری می‌شود. همچنین نشان داده شد که مشاهده عمل نیز نسبت به تمرین ذهنی هم در سطح دقت حرکت و هم در سطح هم‌کوشی مفاصل اثربخشی بیشتری دارد. این یافته‌ها با توجه به نقش بازخورد و همچنین تأثیر این متغیر مهم بر تنظیمات دقیق مدل‌های درونی توجیه شد. با توجه به این استدلال و با توجه به اینکه در این پژوهش بازخورد دستکاری قرار نشد، پیشنهاد می‌شود که در پژوهش‌های آتی بازخورد ناشی از حرکت به صورت مستقیم در حالت اجرای جسمانی و مشاهده عمل دستکاری شود تا صحت این استدلال بیشتر بررسی شود. همچنین در این پژوهش از اطلاعات کینماتیک فقط درجات آزادی کارکردی استخراج شد؛ بنابراین پیشنهاد می‌شود در پژوهش‌های آتی از سنجش‌های هماهنگی استفاده شود تا تشابهات و تفاوت‌های احتمالی بین این سه روش اجرا با دقت بیشتری بررسی شود. به‌علاوه در این پژوهش از سنجش‌های امواج مغزی استفاده نشد؛ ازاین‌رو پیشنهاد می‌شود در پژوهش‌های آتی از سنجش امواج مغزی استفاده شود تا مکانیزم‌های زیربنایی این سه روش به صورت مستقیم‌تری ارزیابی شوند. با توجه به اینکه این سه روش تمرینی هرکدام سطوح مختلفی از یادگیری تکلیف را تحت‌تأثیر

قرار می‌دهند و مکانیزم‌های مختلفی دارند، پیشنهاد می‌شود برای آموزش تکالیف مشابه از ترکیبی از این روش‌ها استفاده شود.

پیام مقاله

این مطالعه بر تفاوت در میزان اثربخشی اجرای جسمانی، مشاهده عمل و تصویرسازی حرکتی در یادگیری حرکتی تأکید دارد. در حالی که هر سه روش موجب بهبود عملکرد شدند، اجرای جسمانی در هر دو شاخص دقت و هماهنگی حرکتی نتایج برتری نشان داد. مشاهده عمل در رتبه دوم قرار گرفت و عملکرد بهتری نسبت به تصویرسازی حرکتی داشت. تحلیل درجات آزادی کارکردی نشان داد، کنترل عصبی‌عضلانی در گروه‌های اجرای جسمانی و مشاهده عمل کارآمدتر بود. این نتایج بیانگر آن است که دسترس‌پذیری بازخورد و درگیری حسی نقش مهمی در بهینه‌سازی به‌روزرسانی مدل درونی دارند. یافته‌ها از استفاده از راهبردهای تمرینی ترکیبی یا مکمل براساس پیچیدگی تکلیف حمایت می‌کنند و کاربردهای عملی مهمی برای یادگیری حرکتی و مداخلات توان‌بخشی دارند.

ملاحظات اخلاقی

این مطالعه به تأیید کمیته اخلاق دانشگاه شیراز رسید.

مشارکت نویسندگان

ایده‌پردازی: داود فاضلی، فاطمه جباری، حسین تقی‌زاده و لیلا قوهستانی

جمع‌آوری داده‌ها: داود فاضلی، فاطمه جباری، حسین تقی‌زاده و لیلا قوهستانی

تحلیل داده‌ها: داود فاضلی، فاطمه جباری، حسین تقی‌زاده و لیلا قوهستانی

نوشتن مقاله: داود فاضلی، فاطمه جباری، حسین تقی‌زاده و لیلا قوهستانی

بازبینی و ویرایش: داود فاضلی، فاطمه جباری، حسین تقی‌زاده و لیلا قوهستانی

مرور ادبیات: داود فاضلی، فاطمه جباری، حسین تقی‌زاده و لیلا قوهستانی

مدیر پروژه: داود فاضلی

تعارض منافع

بنابر اظهار نویسندگان، این مقاله تعارض منافع ندارد.

تشکر و قدردانی

از تمامی شرکت‌کنندگان در این پژوهش تشکر و قدردانی می‌شود.

منابع

1. Jeannerod M. Neural simulation of action: a unifying mechanism for motor cognition. Neuroimage. 2001;14(1 Pt 2): S103-9. https://doi.org/10.1006/nimg.2001.0832 Macuga KL, Frey SH. Neural representations involved in observed, imagined, and imitated actions are dissociable and hierarchically organized. Neuroimage. 2012;59(3):2798-807. https://doi.org/10.1016/j.neuroimage.2011.09.083
2. Guillot A, Lebon F, Rouffet D, Champely S, Doyon J, Collet C. Muscular responses during motor imagery as a function of muscle contraction types. Int J Psychophysiol. 2007;66(1):18-27. https://doi.org/10.1016/j.ijpsycho.2007.05.009
3. Rizzolatti G, Craighero L. The mirror-neuron system. Annu Rev Neurosci. 2004;27:169-92. https://doi.org/10.1146/annurev.neuro.27.070203.144230
4. Decety J, Jeannerod M. Mentally simulated movements in virtual reality: does Fitts's law hold in motor imagery? Behav Brain Res. 1995;72(1-2):127-34. https://doi.org/10.1016/0166-4328(96)00141-6

5. Grosjean M, Shiffrar M, Knoblich G. Fitts's law holds for action perception. Psychol Sci. 2007;18(2):95-9. https://doi.org/10.1111/j.1467-9280.2007.01854.x
6. Krigolson O, Van Gyn G, Tremblay L, Heath M. Is there "feedback" during visual imagery? Evidence from a specificity of practice paradigm. Can J Exp Psychol. 2006;60(1):24-32. https://doi.org/10.1037/cjep2006004
7. Dahm SF, Rieger M. Is imagery better than reality? Performance in imagined dart throwing. Hum Mov Sci. 2019;66:38-52. https://doi.org/10.1016/j.humov.2019.03.005
8. Kilteni K, Andersson BJ, Houborg C, Ehrsson HH. Motor imagery involves predicting the sensory consequences of the imagined movement. Nat Commun. 2018;9(1):1617. https://doi.org/10.1038/s41467-018-03989-0
9. Calmels C, Holmes P, Lopez E, Naman V. Chronometric comparison of actual and imaged complex movement patterns. J Mot Behav. 2006;38(5):339-48. https://doi.org/10.3200/JMBR.38.5.339-348
10. Coelho CJ, Nusbaum HC, Rosenbaum DA, Fenn KM. Imagined actions aren't just weak actions: task variability promotes skill learning in physical practice but not in mental practice. J Exp Psychol Learn Mem Cogn. 2012;38(6):1759-64. https://doi.org/10.1037/a0028065
11. Kelly SW, Burton AM, Riedel B, Lynch E. Sequence learning by action and observation: Evidence for separate mechanisms. Br J Psychol. 2003;94(Pt 3):355-72. https://doi.org/10.1348/000712603767876271
12. Larssen BC, Ong NT, Hodges NJ. Watch and learn: seeing is better than doing when acquiring consecutive motor tasks. PLoS One. 2012;7(6):e38938. https://doi.org/10.1371/journal.pone.0038938
13. Ong NT, Hodges NJ. Absence of after-effects for observers after watching a visuomotor adaptation. Exp Brain Res. 2010;205(3):325-34. https://doi.org/10.1007/s00221-010-2366-4
14. Ong NT, Larssen BC, Hodges NJ. In the absence of physical practice, observation and imagery do not result in updating of internal models for aiming. Exp Brain Res. 2012;218(1):9-19. https://doi.org/10.1007/s00221-011-2996-1
15. Fazeli D, Taheri H, Kakhki AS. Utilizing the variability of practice in physical execution, action observation, and motor imagery: similar or dissimilar mechanisms? Motor Control. 2021;25(2):198-210. https://doi.org/10.1123/mc.2020-0020
16. Maycock J, Bläsing B, Bockemühl T, Ritter H, Schack T. Motor synergies and object representations in virtual and real grasping. In: 1st International Conference on Applied Bionics and Biomechanics (ICABB); 2010. pp.1-8.
17. Mohammed Suberi NA, Razman R, Callow N. Does imagery facilitate a reduction in movement variability in a targeting task? In: International Conference on Movement, Health and Exercise. Springer; 2016. https://doi.org/10.1007/978-981-10-3737-5_31
18. Fazeli D, Taheri H, Saberi Kakhki A, Shakeri Chenari F. Effect of physical and mental practice on variability of movement coordination and smoothness. Motor Behavior, 2023. https://doi.org/10.22089/mbj.2023.13689.2059 [In Persian].
19. Li ZM. Functional degrees of freedom. Motor Control. 2006;10(4):301-10. 10.1123/mcj.10.4.301
20. Chen HH, Liu YT, Mayer-Kress G, Newell KM. Learning the pedalo locomotion task. J Mot Behav. 2005;37(3):247–56. https://doi.org/10.3200/JMBR.37.3.247-256
21. Deng N, Soh KG, Abdullah BB, Huang D. Does motor imagery training improve service performance in tennis players? A systematic review and meta-analysis. Behav Sci (Basel). 2024;14(3):207. https://doi.org/10.3390/bs14030207
22. Pierella C, Casadio M, Mussa-Ivaldi FA, Solla SA. The dynamics of motor learning through the formation of internal models. PLoS Comput Biol. 2019;15(12):e1007118. https://doi.org/10.1371/journal.pcbi.1007118 Fazeli D, Taghizadeh H, Jabbari F, Ghohestani L. Addressing Mechanisms of Physical Performance, Action Observation and Mental Practice Using Manipulation of Feedback: a Kinematics Study. Journal of Sports and Motor Development and Learning. 2024. https://doi.org/10.22059/jsmdl.2024.379355.1791 [In Persian].
23. Sohrabi, M., Farsi, A., & Fouladian, J. (2010). Validation of the Iranian translation of the movement imagery questionnaire revised. Journal of Studies in Sport Sciences, 5(1), 13-24. [In Persian].
24. O'Dwyer N, Rattanaprasert U, Smith R. Quantification of coordination in human walking. From Basic Motor Control to Functional Recovery II. Sofia: Academic Publishing House. 2001. pp. 107-19.

25. Frank C, Land WM, Popp C, Schack T. Mental representation and mental practice: experimental investigation on the functional links between motor memory and motor imagery. PLoS One. 2014;9(4):e95175. https://doi.org/10.1371/journal.pone.0095175
26. Moradi N, Fazeli D. Investigation of effect of routine introduction, imagery and mixed methods on performance and mental representation of volleyball overhand float-serve. Sport Psychology Studies. 2017;6(20):149-68. https://doi.org/10.22089/spsyj.2017.4184.1435 [In Persian].
27. Holmes P, Calmels C. A neuroscientific review of imagery and observation use in sport. J Mot Behav. 2008;40(5):433-45. https://doi.org/10.3200/JMBR.40.5.433-445
28. Grush R. The emulation theory of representation: Motor control, imagery, and perception. Behav Brain Sci. 2004;27(3):377-96. https://doi.org/10.1017/s0140525x04000093
29. Frank C, Land WM, Schack T. Mental representation and learning: The influence of practice on the development of mental representation structure in complex action. Psychol Sport Exerc. 2013;14(3):353-361. https://doi.org/10.1016/j.psychsport.2012.12.001
30. Wolpert DM, Ghahramani Z, Jordan MI. An internal model for sensorimotor integration. Science. 1995;269(5232):1880-2. https://doi.org/10.1126/science.7569931
31. Wolpert DM, Flanagan JR. Motor prediction. Curr Biol. 2001;11(18):R729-32. https://doi.org/10.1016/s0960-9822(01)00432-8
32. Wolpert DM, Doya K, Kawato M. A unifying computational framework for motor control and social interaction. Philos Trans R Soc Lond B Biol Sci. 2003;358(1431):593-602. https://doi.org/10.1098/rstb.2002.1238
33. Gentili R, Han CE, Schweighofer N, Papaxanthis C. Motor learning without doing: trial-by-trial improvement in motor performance during mental training. J Neurophysiol. 2010;104(2):774-83. https://doi.org/10.1152/jn.00257.2010
34. Gatti R, Tettamanti A, Gough PM, Riboldi E, Marinoni L, Buccino G. Action observation versus motor imagery in learning a complex motor task: a short review of literature and a kinematics study. Neurosci Lett. 2013;540:37-42. https://doi.org/10.1016/j.neulet.2012.11.039
35. Kim T, Frank C, Schack T. A systematic investigation of the effect of action observation training and motor imagery training on the development of mental representation structure and skill performance. Front Hum Neurosci. 2017 ;11:499. https://doi.org/10.3389/fnhum.2017.00499
36. Mattar AA, Gribble PL. Motor learning by observing. Neuron. 2005;46(1):153-60. https://doi.org/10.1016/j.neuron.2005.02.009
37. Roberts JW, Bennett SJ, Elliott D, Hayes SJ. Top-down and bottom-up processes during observation: Implications for motor learning. Eur J Sport Sci. 2014;14 Suppl 1:S250-6. https://doi.org/10.1080/17461391.2012.686063
38. Wolpert DM, Kawato M. Multiple paired forward and inverse models for motor control. Neural Netw. 1998;11(7-8):1317-29. https://doi.org/10.1016/s0893-6080(98)00066-5

پژوهشگاه علوم انسانی و مطالعات فرهنگی
پرتال جامع علوم انسانی