Journal of
Biomechanics and technology in sport

Vol. 1, No. 1, Winter 2026

Research Paper

Investigating the relationship between the spectral characteristics of hand tremor at rest and shooting performance of recurve archery athletes

* Mohammadreza Amirseyfadini[1] Sasan Naderi[2] Zahra Esmaili[3]

1. Associate Professor, Sports Biomechanics Group, Sports Pathology and Biomechanics Department, Faculty of Sport Sciences, Shahid Bahonar University of Kerman, Kerman, Iran

2. Assistant Professor, Sports Biomechanics Group, Sports Pathology and Biomechanics Department, Faculty of Sport Sciences, Shahid Bahonar University of Kerman, Kerman, Iran

3. Student of Sports Biomechanics, Sports Biomechanics Department, Sports Pathology and Biomechanics Department, Faculty of Sport Sciences, Shahid Bahonar University of Kerman, Kerman, Iran

Citation Amirseifdini M, Naderi S, Esmaili Z. Investigating the relationship between the spectral characteristics of hand tremor at rest and shooting performance of recurve archery athletes (In Persian). Journal of Biomechanics and technology in sport. 2026;1(1): [27-40].

doi: 10.22103/jbts.2026.26621.1017

Keywords

Archery

Resting Hand Tremor

Spectral Analysis

Sports Performance

ABSTRACT

Introduction: Hand tremor is an involuntary, oscillatory movement of the limbs that can affect shooting accuracy. The aim of this study was to investigate the relationship between resting hand tremor spectral characteristics and shooting performance in recurve archers.
Methods: This semi-experimental study was conducted on 12 recurve archers (male and female, 18 years and older). Hand tremor at rest was measured with the hands hanging over the chair armrests and reflective markers attached to the backs of the hands in the distal third metacarpal region. The performance test was conducted with a simulated competition involving firing 60 shots from a distance of 18 meters, and the average shooting accuracy was evaluated. The recorded data for spectral analyzes, including frequency indices (PeakFreq, MedianPF) and amplitude indices (RMS, Total Power, PercentAroundPeak), were processed.
Results: The results showed that frequency-related indices of hand tremor at rest were not significantly associated with shooting accuracy ($P > 0.05$). In contrast, amplitude-related tremor indices in the bow arm showed a tendency toward a positive association with shooting accuracy, with the highest correlation observed for RMS ($r = 0.358$, $P = 0.280$). Amplitude-related indices in the string hand showed no significant relationship with shooting accuracy.
Conclusion: Hand tremor at rest is not a direct predictor of shooting accuracy in recurve archers. However, amplitude-related tremor indices in the bow arm showed a tendency toward positive association with shooting accuracy, which may reflect underlying neuromuscular characteristics related to isometric stability and motor control.

Received: 2025/12/28

Accepted: 2026/02/22

Available Online:2026/03/07

*Corresponding Author
Mohammadreza Amirseyfaddini, Associate Professor
Address: Department of Sports Pathology and Biomechanics, Faculty of Sports Sciences, Shahid Bahonar University of Kerman, Kerman, Iran.
Email: seyfaddini@uk.ac.ir

Journal of
Biomechanics and technology in sport

Extended Abstract

Introduction

Tremor is defined as an involuntary, rhythmic, and oscillatory movement that can occur in different parts of the body. It may be observed both in healthy individuals and in people with neurological disorders or under the influence of certain substances. Tremor is generally divided into two main categories: rest tremor, which occurs without voluntary muscle contraction, and action tremor, which appears during movement or voluntary contraction and includes postural, kinetic, and isometric tremors. One of the most common forms of action tremor is physiological tremor, which is also present in healthy individuals and results from a complex interaction of neural and mechanical factors. Although this tremor is a normal part of body function, factors such as fatigue, stress, and caffeine consumption can intensify it. The frequency of hand physiological tremor is usually reported in the range of 8 to 12 Hz, and some studies have identified two distinct spectral peaks: the first in the 8–12 Hz range, mainly associated with central neural activity, and the second in the 20–25 Hz range, which is likely related to mechanical resonance of the upper limb. Hand tremor is not merely a simple physiological phenomenon; it can significantly affect daily quality of life. By impairing fine motor skills, it makes tasks such as writing, grasping objects, and eating more difficult. This issue becomes even more important in sports that require high precision and fine neuromuscular control. One important example is recurve archery, a sport in which performance success depends on upper-limb stability, precise movement control, and maintaining proper arrow alignment. In this sport, even mild tremor can reduce shooting accuracy and increase aiming error. From a sports biomechanics perspective, the stability of shoulder and forearm muscles during the aiming phase is essential for maintaining posture and shooting precision. However, even mild physiological tremor can challenge this required stability. Research has shown that elite archers have lower tremor than non-elite individuals, suggesting that a better balance between agonist and antagonist muscles plays a key role in reducing tremor and improving shooting accuracy. Hand tremor, even at rest, can also be considered an indicator of neuromuscular control and motor stability. Tremor characteristics such as amplitude and frequency are closely related to motor control and learning; therefore, improvement in motor skills may be accompanied by changes in tremor patterns. In recent years, modern methods for assessing hand tremor using inertial sensors in wearable devices and smartphones have attracted researchers' attention. These tools have enabled detailed evaluation of tremor characteristics under different conditions. Some studies have also shown that the additional mass of a measuring device can significantly alter the spectral distribution of hand tremor; therefore, this factor should be considered when comparing results obtained from different instruments.

Therefore, the present study aims to investigate the spectral characteristics of hand tremor at rest and their relationship with archery performance. By emphasizing the importance of spectral analysis in elucidating neuromuscular control mechanisms and utilizing a high-precision 3D motion analysis system, this research seeks to provide a deeper understanding of the role of tremor in performance accuracy, thereby addressing the existing gap in the literature.

Method

This quasi-experimental, applied, and prospective study involved 12 purposively selected recurve archers (male and female, aged ≥18) from Kerman. Inclusion criteria required 1–3 years of training experience, no professional ranking, and upper limb integrity. Exclusion criteria included caffeine or nicotine consumption on the test day and the onset of limb pain during testing. Given the high repetition rate (60 shots per participant), the sample size was sufficient for correlation analysis. Hand tremor data were captured using a high-precision H-Raptor 3D motion analysis system (USA) equipped with six infrared cameras at a sampling rate of 200 Hz. Retroreflective markers were placed on the third metacarpal of both hands. According to the

Nyquist theorem, the 200 Hz sampling rate being significantly higher than the maximum tremor frequency (~25 Hz) ensured accurate spectral reconstruction and prevented aliasing. Additionally, the system's hardware filters were utilized to eliminate noise beyond the Nyquist frequency. Data processing was conducted using CORTEX software, followed by advanced signal and frequency analysis in MATLAB, with statistical computations performed via SPSS version 26. This study was conducted at the Biomechanics Laboratory of Bahonar University, Kerman, following ethical approval. In the first phase, resting hand tremor was recorded for 30 seconds (after a 2-minute rest) while participants sat with their forearms supported on chair armrests and hands hanging freely. In the second phase, archery performance was assessed through a simulated competition involving 60 shots with a recurve bow. These shots were performed in two 10-end qualifications, where each end consisted of 3 shots fired within 90 seconds from a distance of 18 meters. For data processing, hand acceleration signals were first denoised using a Hampel filter, and linear trends were removed. Subsequently, a fourth-order Butterworth bandpass filter was applied within a 3–20 Hz range to eliminate low-frequency voluntary movements and high-frequency environmental noise. Frequency-domain analysis was performed using Welch's method with a Hamming window to extract indices such as peak frequency, Median Power Frequency (MPF), Mean Power Frequency (MeanPF), and Mean Frequency (MeanF). In the time domain, RMS and signal power were calculated. Finally, Pearson correlation coefficients were employed to examine the relationship between tremor indices and shooting accuracy, following normality testing via the Shapiro-Wilk test.

Result

The correlation analysis between resting tremor indices (frequency and amplitude) of the right (draw hand) and left (bow hand) wrists and archery accuracy revealed distinct patterns between the two hands. Regarding frequency-domain indices, no significant correlations were observed between tremor frequency variations and shooting accuracy in either wrist, suggesting that resting tremor frequency alone is not a reliable predictor of performance. In contrast, amplitude-domain indices exhibited divergent trends. In the right wrist, indices such as RMS and Total Power showed weak, non-significant negative correlations with accuracy, indicating that increased tremor amplitude in the draw hand may potentially impair performance. Conversely, the left wrist demonstrated a tendency toward positive correlations, with RMS and Total Power showing slight positive associations with accuracy, although these remained statistically non-significant. Overall, while amplitude indices showed hand-specific trends, none of the resting tremor characteristics reached statistical significance in predicting shooting accuracy (Tables 2).

Vibration indicator	Right wrist		
	Mean ± SD	R	P
PeakFreq (Hz)	4.33 ± 0.53	-0.333	0.317
MedianPF (Hz)	7.03 ± 0.60	0.202	0.552
RMS (mm/s^2)	710.21 ± 185.67	-0.282	0.401
Total Power	490920.47 ± 290574.36	-0.322	0.333
PercentAroundPeak	22.97 ± 3.15	-0.135	0.693

Conclusion

The study revealed that frequency indices of hand tremor at rest show no significant correlation with the shooting accuracy of recurve archers, due to the mechanistic differences between resting and task-related tremor. However, amplitude indices in the left hand—specifically the percentage of power around the peak frequency—demonstrated moderate positive correlations with accuracy, potentially reflecting the neuromuscular capacity required for isometric stability. Consequently, the findings suggest that investigating tremor during functional performance (during the shot) represents a promising future research pathway to better understand motor control in archery.

Ethical Considerations

Compliance with ethical guidelines

This study was conducted in strict adherence to the ethical guidelines and protocols governing human subject research. Prior to participation, all individuals were fully briefed on the study's objectives and procedures, subsequently providing their voluntary informed written consent. Furthermore, the study design prioritized the safety and well-being of the participants, ensuring that no foreseeable risks or adverse effects were present.

Funding

This research received no specific grant from any funding agency in the public, commercial, or not-for-profit sectors.

Authors' contributions

All authors contributed to the writing of this article.

Conflict of interest

The authors of the article declare that there is no conflict of interest between them.

مقاله پژوهشی

بررسی رابطه ویژگی‌های طیفی لرزش دست در وضعیت استراحت با عملکرد تیراندازی ورزشکاران تیروکمان ریکرو

* محمدرضا امیرسیف الدینی [۱]، ساسان نادری [۲] زهرا اسمعیلی [۳]

۱. دانشیار، گروه بیومکانیک ورزشی، بخش آسیب شناسی و بیومکانیک ورزشی، دانشکده علوم ورزشی، دانشگاه شهید باهنر کرمان، کرمان،ایران

۲. استادیار، گروه بیومکانیک ورزشی، بخش آسیب شناسی و بیومکانیک ورزشی، دانشکده علوم ورزشی، دانشگاه شهید باهنر کرمان، کرمان،ایران

۳. دانشجو بیومکانیک ورزشی، گروه بیومکانیک ورزشی، بخش آسیب شناسی و بیومکانیک ورزشی، دانشکده علوم ورزشی، دانشگاه شهید باهنر کرمان، کرمان،ایران

Citation Amirseyfaddini M, Naderi S, Esmaili Z. Investigating the relationship between the spectral characteristics of hand tremor at rest and shooting performance of recurve archery athletes (In Persian). Journal of Biomechanics and technology in sport. 2026;1(1): [27-40].

doi: 10.22103/jbts.2026.26621.1017

چکیده

مقدمه: لرزش دست، حرکت غیرارادی و نوسانی اندام‌ها است که می‌تواند بر دقت تیراندازی تأثیر بگذارد. هدف این پژوهش بررسی رابطه ویژگی‌های طیفی لرزش دست در وضعیت استراحت با عملکرد تیراندازی در کمانداران ریکرو بود.

روش پژوهش: این مطالعه نیمه‌تجربی بر روی ۱۲ کماندار ریکرو (زن و مرد، ۱۸ سال و بالاتر) انجام شد. لرزش دست در وضعیت استراحت با قرارگیری دست‌ها به صورت آویزان روی دسته صندلی و نصب مارکرهای بازتابنده روی پشت دست‌ها در ناحیه دیستال متاکارپ سوم اندازه‌گیری شد. آزمون عملکردی با یک مسابقه شبیه‌سازی شده شامل شلیک ۶۰ تیر در فاصله ۱۸ متری اجرا شد و میانگین دقت تیراندازی بررسی گردید. داده‌های ثبت‌شده برای تحلیل‌های طیفی شامل شاخص‌های فرکانسی (PeakFreq, MedianPF) و دامنه‌ای (PercentAroundPeak ,Total Power, RMS) مورد پردازش قرار گرفتند.

یافته‌ها: نتایج نشان داد شاخص‌های فرکانسی لرزش دست در وضعیت استراحت رابطه معناداری با دقت تیراندازی نداشتند ($P>0.05$). در مقابل، شاخص‌های دامنه‌ای لرزش در دست کمان گرایشی به همبستگی مثبت با دقت تیراندازی نشان دادند، به‌طوری که بیشترین همبستگی مربوط به شاخص RMS بود ($P=0.280$ ، $r=0.358$). شاخص‌های دامنه‌ای در دست زه ارتباط معناداری با دقت نشان ندادند.

نتیجه‌گیری: نتایج این پژوهش نشان داد که لرزش دست در وضعیت استراحت شاخص پیش‌بینی‌کننده مستقیمی برای دقت تیراندازی کمانداران ریکرو نیست. با این حال، شاخص‌های دامنه‌ای لرزش در دست کمان گرایشی به ارتباط مثبت با دقت تیراندازی نشان دادند که ممکن است بازتابی از برخی ویژگی‌های کنترل عصبی–عضلانی مرتبط با پایداری ایزومتریک و کنترل حرکتی باشند.

کلمات کلیدی:

تیراندازی با کمان

لرزش دست استراحت

تحلیل طیفی

عملکرد ورزشی

تاریخ دریافت: ۱۴۰۴/۱۰/۰۷

تاریخ پذیرش: ۱۴۰۴/۱۲/۰۳

تاریخ انتشار: ۱۴۰۴/۱۲/۱۶

نویسنده مسئول:

محمدرضا امیرسیف‌الدینی، دانشیار گروه بیومکانیک ورزشی

آدرس: بخش آسیب شناسی و بیومکانیک ورزشی، دانشکده علوم ورزشی، دانشگاه شهید باهنر کرمان، کرمان، ایران

پست الکترونیکی: **seyfaddini@uk.ac.ir**

مقدمه

لرزش، نوعی حرکت غیرارادی، ریتمیک و نوسانی است که در یک یا چند بخش از بدن رخ می‌دهد. این پدیده هم در افراد سالم و هم در مبتلایان به اختلالات عصبی یا تحت تأثیر مصرف برخی مواد مشاهده می‌شود و معمولاً اندام‌هایی مانند انگشتان، دست‌ها، بازوها، پاها، صورت یا حتی صدا را درگیر می‌کند. به‌طور کلی، لرزش به دو گروه اصلی تقسیم می‌شود: لرزش استراحتی، که بدون انقباض ارادی عضلات رخ می‌دهد، و لرزش حین حرکت، که هنگام انجام فعالیت یا انقباض ارادی عضلات بروز می‌کند و شامل انواعی نظیر لرزش وضعیتی، حرکتی و ایزومتریک است (۱).

لرزش فیزیولوژیک یکی از شایع‌ترین انواع لرزش حین حرکت در افراد سالم است که از تعامل پیچیده‌ی عوامل عصبی و مکانیکی بدن نشأت می‌گیرد (۲-۴). اگرچه این نوع لرزش در حالت عادی ماهیتی طبیعی دارد، اما می‌تواند تحت تأثیر عواملی نظیر خستگی، استرس و مصرف کافئین تشدید گردد. در واقع، تغییرات در عملکرد واحدهای حرکتی، بازخوردهای حسی-حرکتی و سیگنال‌های عصبی مرکزی نقش عمده‌ای در تنظیم این پدیده ایفا می‌کنند (۳). لرزش فیزیولوژیک دست بسیار رایج است و فرکانس آن معمولاً در محدوده ۸ تا ۱۲ هرتز گزارش می‌شود (۵). همچنین، مطالعات نشان داده‌اند که لرزش فیزیولوژیک دست دارای دو قله فرکانسی مشخص است؛ قله اول در محدوده ۸ تا ۱۲ هرتز که بیشتر با فعالیت‌های عصبی مرکزی مرتبط است و قله دوم در محدوده ۲۰ تا ۲۵ هرتز که احتمالاً ناشی از رزونانس مکانیکی اندام فوقانی می‌باشد (۶).

از سویی دیگر، لرزش دست می‌تواند به‌طور قابل توجهی بر کیفیت زندگی روزمره تأثیر بگذارد و با ایجاد اختلال در مهارت‌های حرکتی ظریف، انجام فعالیت‌هایی نظیر نوشتن و غذا خوردن را با مشکل مواجه سازد (۷) . این مسئله در ورزش‌هایی که نیازمند دقت بالا و کنترل عصبی–عضلانی ظریف هستند، اهمیت دوچندان می‌یابد. به‌ویژه در تیراندازی با کمان ریکرو، که موفقیت عملکرد به ثبات اندام فوقانی و کنترل دقیق حرکات وابسته است، وجود لرزش دست می‌تواند منجر به کاهش دقت شلیک و افزایش خطای هدف‌گیری شود (۸، ۹).

در حوزه بیومکانیک ورزشی، پایداری عضلات شانه و ساعد در فاز نشانه‌گیری برای حفظ راستای تیر و ثبات نشانه‌گیری ضروری است. با این وجود، حتی لرزش‌های فیزیولوژیک خفیف نیز می‌توانند ثبات مورد نیاز برای اجرای ورزشکاران نخبه را به چالش بکشند (۱۰). پژوهش‌ها نشان داده‌اند که تیراندازان نخبه نسبت به افراد غیرنخبه لرزش کمتری دارند که این امر بیانگر نقش کلیدی تعادل بین عضلات آگونیست و آنتاگونیست در کاهش لرزش و افزایش دقت تیراندازی است(۱۱).

علاوه بر این، لرزش دست، حتی در وضعیت استراحت، به‌عنوان بازتابی از وضعیت کنترل عصبی-عضلانی و میزان پایداری حرکتی ورزشکار در نظر گرفته می‌شود (۱۲). ازاین‌رو، ویژگی‌های لرزش، از جمله دامنه و فرکانس آن، ارتباط مستقیمی با سطح کنترل و یادگیری حرکتی دارند؛ به‌گونه‌ای که بهبود مهارت‌های حرکتی می‌تواند با اصلاح الگوی لرزش همراه باشد (۱۳).

در سال‌های اخیر، روش‌های ارزیابی لرزش دست، به‌ویژه با استفاده از سنسورهای اینرسی در ابزارهای پوشیدنی و گوشی‌های هوشمند، مورد توجه پژوهشگران قرار گرفته است. در این راستا، مطالعات متعددی به بررسی ویژگی‌های طیفی لرزش دست در شرایط استراحت و وضعیت‌های ثابت پرداخته‌اند. برای مثال، آلوز سانتوس و همکاران (۲۰۲۲) نشان دادند که جرم

اضافه‌شده توسط دستگاه اندازه‌گیری می‌تواند به‌طور معناداری توزیع طیفی لرزش دست را تغییر دهد و این موضوع بر مقایسه نتایج حاصل از ابزارهای مختلف تأثیرگذار است (۱۴).

تحلیل طیف توان، حتی در جمعیت‌های بالینی، اطلاعات ارزشمندی درباره سازوکارهای لرزش ارائه کرده است. در این زمینه، هیدا و همکاران (۲۰۱۳) با استفاده از تحلیل چگالی طیف توان (PSD) نشان دادند که لرزش‌های استراحتی و عملیاتی الگوی فرکانسی مشابهی دارند و تغییرات توان در باندهای فرکانسی مختلف بیانگر تعادل بین بروز لرزش و سرکوب آن است (۱۵).

با توجه به هدف تحقیق حاضر و اهمیت وجود داده‌های مرجع در ورزشکاران سالم، گایوسکی و همکاران (۲۰۲۳) ویژگی‌های طیفی لرزش فیزیولوژیک ساعد را در ورزشکاران جوان زن و مرد بررسی کردند. نتایج این مطالعه نشان داد که اگرچه توان لرزش در مردان بیشتر از زنان است، اما فرکانس‌های غالب لرزش در هر دو جنس مشابه بوده و در محدوده‌های فرکانسی پایین و بالا قرار دارند. این یافته‌ها چارچوب مناسبی برای مقایسه ویژگی‌های طیفی لرزش در ورزشکاران فراهم می‌کند (۱۶).

با توجه به یافته‌های پیشین که بر وجود الگوهای فرکانسی مشخص و اهمیت تحلیل طیف توان در لرزش فیزیولوژیک دست تأکید دارند، بررسی ویژگی‌های طیفی لرزش دست به‌عنوان ابزاری کلیدی برای درک سازوکارهای کنترل عصبی–عضلانی مطرح می‌شود. این ویژگی‌ها می‌توانند اطلاعات دقیق‌تری درباره منشأ لرزش، از جمله تمایز بین مؤلفه‌های فیزیولوژیک و مکانیکی، فراهم آورند. با این حال، تحلیل جامع ویژگی‌های طیفی لرزش دست، به‌ویژه در جمعیت کمانداران، تاکنون به‌طور نظام‌مند مورد توجه قرار نگرفته است.

ازاین‌رو، پژوهش حاضر با تأکید بر اهمیت تحلیل ویژگی‌های طیفی لرزش دست در تبیین سازوکارهای کنترل عصبی-عضلانی و با بهره‌گیری از سیستم دقیق تحلیل حرکت سه‌بعدی، به بررسی ویژگی‌های طیفی لرزش دست در وضعیت استراحت و ارتباط آن با عملکرد تیراندازی در کمانداران می‌پردازد تا درکی عمیق‌تر از نقش لرزش در دقت عملکرد ارائه دهد و شکاف موجود در ادبیات پژوهش را برطرف سازد.

روش‌شناسی پژوهش

شرکت‌کنندگان

پژوهش حاضر از نظر روش اجرا نیمه‌تجربی، از لحاظ هدف کاربردی و از نظر زمانی آینده‌نگر بود. جامعه آماری شامل تمامی تیراندازان با کمان شهر کرمان بود که تعداد آن‌ها حدود ۹۰ نفر برآورد شد. نمونه شامل ۱۲ نفر از کمانداران ریکرو (زن و مرد) با رده سنی ۱۸ سال و بالاتر بود که به روش هدفمند و در دسترس انتخاب شدند. انتخاب آزمودنی‌ها با هماهنگی باشگاه‌های فعال تیر و کمان شهر کرمان و بر اساس تمایل به همکاری و شرایط ورود به مطالعه انجام شد.

با توجه به ماهیت بیومکانیکی پژوهش، طراحی درون‌گروهی، تعداد بالای تکرارها (۶۰ تیر برای هر آزمودنی) و مشابهت با مطالعات پیشین، حجم نمونه حاضر برای تحلیل روابط همبستگی کفایت آماری لازم را داشت (۱۰, ۱۱, ۱۷). شرایط ورود به مطالعه شامل داشتن سابقه تمرین در رشته تیر و کمان حداقل یک و حداکثر سه سال، نداشتن بیش از یک سابقه شرکت در مسابقات رسمی کشوری، نداشتن رتبه یا درجه حرفه‌ای از سوی فدراسیون یا باشگاه معتبر، و نداشتن هرگونه آسیب یا مشکل

خاص در اندام فوقانی بود (۹, ۱۰). شرایط خروج از مطالعه نیز شامل مصرف فرآورده‌های حاوی کافئین در روز آزمون، استعمال سیگار، و بروز درد یا ناراحتی در اندام فوقانی حین انجام آزمون تعیین شد (۱۱, ۱۸).

ابزار

برای ثبت داده‌های لرزش دست از سیستم آنالیز حرکت سه‌بعدی Motion Analysis مدل H-Raptor System Time Real Digital (ایالات متحده آمریکا) استفاده شد. این سیستم شامل شش دوربین مادون‌قرمز با نرخ نمونه‌برداری ۲۰۰ هرتز بود. مارکرهای بازتابنده بر روی پشت هر دو دست آزمودنی‌ها، در ناحیه دیستال استخوان متاکارپ سوم نصب شدند.

در خصوص کفایت نرخ نمونه‌برداری ۲۰۰ هرتز، مطالعات پیشین نشان می‌دهد که مؤلفه‌های اصلی لرزش فیزیولوژیک دست شامل قله‌های عصبی در بازه فرکانسی ۸ تا ۱۲ هرتز و رزونانس‌های مکانیکی در محدوده ۲۰ تا ۲۵ هرتز می‌باشند(۶). با توجه به اینکه بالاترین فرکانس نوسانی معنادار گزارش‌شده برای لرزش دست حدود ۲۵ هرتز است، نرخ نمونه‌برداری ۲۰۰ هرتز در پژوهش حاضر حدود ۸ برابر بیشینه فرکانس سیگنال بوده و بر اساس قانون نایکوئیست (حداقل دو برابر فرکانس بیشینه)، امکان بازسازی کامل و دقیق طیف فرکانسی لرزش و جلوگیری از بروز پدیده آلیاسینگ را به‌طور کامل فراهم می‌کند. افزون بر این، سیستم Raptor-H به‌صورت پیش‌فرض مجهز به فیلترهای سخت‌افزاری ضد آلیاسینگ است که نویزهای فراتر از فرکانس نایکوئیست را حذف کرده و دقت ثبت داده‌ها را افزایش می‌دهد.

پردازش اولیه داده‌ها در نرم‌افزار CORTEX انجام گرفت و تحلیل‌های پیشرفته سیگنال و فرکانسی با استفاده از MATLAB (شرکت MathWorks ، آمریکا) صورت پذیرفت. تحلیل‌های آماری نیز با نرم‌افزار SPSS نسخه ۲۶ انجام شد.

روند اجرای پژوهش

تمامی مراحل پژوهش در آزمایشگاه بیومکانیک ورزشی دانشگاه باهنر کرمان انجام شد و طرح پژوهش با کد اخلاق IR.KMU.REC.1404.394 توسط کمیته اخلاق دانشگاه علوم پزشکی کرمان تصویب گردید. پیش از آغاز آزمون‌ها، هدف پژوهش و مراحل اجرا برای آزمودنی‌ها تشریح شد و فرم رضایت‌نامه آگاهانه تکمیل شد. اطلاعات فردی، قد و وزن شرکت‌کنندگان نیز ثبت شد.

در مرحله نخست، آزمون لرزش در وضعیت استراحت انجام شد. در این آزمون، آزمودنی بر روی صندلی دارای دسته می‌نشست به‌گونه‌ای که ساعدها بر روی دسته قرار گرفته و دست‌ها از ناحیه مچ به پایین آزادانه آویزان می‌ماندند. مارکرها بر روی پشت هر دو دست در ناحیه دیستال استخوان متاکارپ سوم نصب شدند. پس از ۲ دقیقه استراحت، داده‌های لرزش دست در ۳۰ ثانیه پایانی ثبت گردید(۱۹).

در مرحله دوم، آزمون عملکرد ورزشی در قالب مسابقه شبیه‌سازی‌شده و در فضای سرپوشیده آزمایشگاه برگزار شد. آزمودنی‌ها با کمان ریکرو و در فاصله ۱۸ متری از سیبل استاندارد تمام‌رخ سه‌تایی عمودی با قطر ۴۰ سانتی‌متر تیراندازی کردند. هر آزمودنی ۶۰ تیر را در قالب دو کوآلی ۱۰ اندی شلیک کرد. در هر اند، ۳ تیر در مدت ۹۰ ثانیه شلیک شد. بین دو کوآلی، ۱۵ دقیقه و بین هر اند، ۹۰ ثانیه زمان استراحت در نظر گرفته شد. محل برخورد تیرها به صورت دستی ثبت شد تا دقت تیراندازی ارزیابی شود.

روش آماری

سیگنال‌های شتاب دست کمانداران برای بررسی لرزش در وضعیت استراحت و بازه ۳۰ ثانیه انتهایی پردازش شدند. ابتدا نویزهای لحظه‌ای با فیلتر Hampel حذف و روند خطی سیگنال‌ها برداشته شد. سپس فیلتر Butterworth باندگذر مرتبه چهارم در بازه ۳ تا ۲۰ هرتز به‌صورت دوطرفه اعمال گردید.

انتخاب این بازه فرکانسی با هدف پوشش کامل طیف لرزش‌های فیزیولوژیک دست و حذف نویزهای غیربرخوردار از اهمیت فیزیولوژیک صورت گرفت. پژوهش‌های پیشین گزارش می‌دهند که مؤلفه‌های فرکانسی لرزش دست (اعم از لرزش استراحتی و وضعیتی) عمدتاً در فرکانس‌های بالاتر از ۳ هرتز ظاهر می‌شوند؛ ازاین‌رو انتخاب کران پایین ۳ هرتز موجب حذف نوسانات بسیار کند ناشی از حرکات ارادی یا نویز های جابه‌جایی بدنی شده و تمرکز تحلیل را بر نوسانات ریتمیک مرتبط با لرزش حفظ می‌کند. همچنین، مطابق نتایج این مطالعه، فرکانس‌های لرزش فیزیولوژیک نرمال به‌طور معمول پایین‌تر از ۲۰ هرتز قرار دارند؛ بنابراین انتخاب کران بالای ۲۰ هرتز، راهکاری بهینه برای جلوگیری از ورود نویزهای فرکانس بالا و نویزهای محیطی محسوب می‌شود(۲۰).

برای تحلیل فرکانسی، طیف توان (PSD) با روش Welch و پنجره Hamming و هم‌پوشانی مناسب محاسبه شد. شاخص‌های فرکانس پیک، فرکانس توان میانه(MPF) ، میانگین فرکانس توان (MeanPF) و میانگین فرکانس (MeanF) استخراج گردیدند. در حوزه زمانی نیز مقدار RMS سیگنال فیلترشده، توان کل در بازه ۳ تا ۲۰ هرتز و توان نسبی در محدوده ±۱ هرتز اطراف فرکانس پیک محاسبه شد.

برای بررسی رابطه بین شاخص‌های لرزش دست در وضعیت استراحت و دقت عملکرد، با توجه به نرمال بودن توزیع متغیرها (بر اساس آزمون شاپیرو–ویلک)، از ضریب همبستگی پیرسون در نرم‌افزار SPSS نسخه ۲۶ استفاده شد. سطح معناداری آزمون‌ها ۰/۰۵ در نظر گرفته شد. تمامی محاسبات در MATLAB انجام و خروجی هر پرتاب در فایل Excel ذخیره شد تا برای تحلیل‌های آماری بعدی از جمله محاسبه ضریب همبستگی با دقت تیراندازان مورد استفاده قرار گیرد.

یافته‌ها

جامعه مورد بررسی، متشکل از ۱۲ کماندار ریکرو ، از نظر مشخصه‌های دموگرافیک یک گروه نسبتاً همگن را تشکیل دادند. میانگین سن آزمودنی‌ها ۲۲/۵۰±۶/۷۸ سال و سابقه تمرینی آن‌ها ۵/۷۱ ± ۲۳ ماه بود(جدول ۱).

جدول ۱: اطلاعات دموگرافی آزمودنی ها

متغیر	سن (سال)	قد (متر)	جرم (کیلوگرم)	سابقه تمرینی (ماه)
میانگین ± انحراف استاندارد	۲۲/۵۰±۶/۷۸	۱/۷۰ ±۰/۱۰	۷۲/۳۶ ±۲۸/۳۳	۲۳ ± ۵/۷۱

یافته‌های حاصل از بررسی همبستگی شاخص‌های فرکانسی و دامنه‌ای لرزش در مچ دست راست (دست زه) و مچ دست چپ (دست کمان) در وضعیت استراحت و ارتباط آن با میانگین دقت تیراندازی نشان داد که نقش این شاخص‌ها در دو دست یکسان نیست.

در بخش شاخص‌های فرکانسی، نتایج نشان داد که در هر دو مچ دست راست و چپ، رابطه معناداری بین تغییرات فرکانس لرزش و میانگین دقت تیراندازی وجود ندارد. در مچ دست راست، افزایش شاخص‌های PeakFreq و MedianPF با کاهش خفیف دقت همراه بود، اما این روابط از نظر آماری معنادار نبودند (R=-۰/۳۳۳ ، P=۰/۳۱۷ و R=-۰/۲۰۲ ، P=۰/۵۵۲). در مچ دست چپ نیز شاخص MedianPF رابطه‌ای منفی و غیرمعنادار با دقت نشان داد (R=-۰/۰۷۵ ، P =۰/۸۲۷)، در حالی که شاخص PeakFreq ارتباطی مثبت و ضعیف مثبت و ضعیف اما غیرمعنادار داشت (R=۰/۰۷۴ ، P= ۰/۸۲۸). این نتایج بیانگر آن است که در وضعیت استراحت، تغییرات فرکانس لرزش به تنهایی نمی‌تواند پیش‌بینی‌کننده دقت تیراندازی باشد.

در مقابل، الگوی شاخص‌های دامنه‌ای لرزش با میانگین دقت تیراندازی بین دو دست تفاوت بیشتری را نشان داد. در مچ دست راست، شاخص RMS تقریباً هیچ ارتباطی با دقت تیراندازی نداشت (R=-۰/۲۸۲ ، P=۰/۴۰۱) و شاخص‌های Power Total و PercentAroundPeak نیز همبستگی‌های منفی ضعیف و غیرمعناداری با دقت نشان دادند (R=-۰/۳۲۲ ، P= ۰/۳۳۳ و R=-۰/۱۳۵ ، P=۰/۶۹۳). این یافته‌ها نشان می‌دهد که افزایش دامنه لرزش در دست زه، حتی به صورت محدود، می‌تواند با کاهش عملکرد همراه باشد، هرچند این تأثیر در وضعیت استراحت به سطح معناداری نرسیده است.

در مچ دست چپ، نتایج متفاوت بود. شاخص‌های دامنه‌ای لرزش در این دست گرایش به رابطه مثبت با دقت تیراندازی نشان دادند، به طوری که پارامتر RMS (R=۰/۳۵۸ ، P=۰/۲۸۰) و شاخص Total Power (R=۰/۳۳۰ ، P=۰/۳۲۲) هر دو با افزایش خفیف دقت همراه بودند، هرچند این روابط نیز از نظر آماری معنادار نبودند. همچنین شاخص PercentAroundPeak یک همبستگی مثبت ضعیف تا متوسط با دقت تیراندازی نشان داد (R=۰/۳۰۴ ، P=۰/۳۶۳)(جداول ۲ و ۳).

جدول ۲: همبستگی بین میانگین دقت تیراندازی و پارامترهای لرزش در وضعیت استراحت مچ دست راست

شاخص لرزش	مچ دست راست		
	Mean ± SD	R	P
PeakFreq (Hz)	۴/۳۳ ± ۰/۵۳	-۰/۳۳۳	۰/۳۱۷
MedianPF (Hz)	۷/۰۳± ۰/۶۰	۰/۲۰۲	۰/۵۵۲
RMS (mm/s^2)	۷۱۰/۲۱ ± ۱۸۵/۶۷	-۰/۲۸۲	۰/۴۰۱
Total Power	۴۹۰۹۲۰/۴۷ ± ۲۹۰۵۷۴/۳۶	-۰/۳۲۲	۰/۳۳۳
PercentAroundPeak	۲۲/۹۷± ۳/۱۵	-۰/۱۳۵	۰/۶۹۳

جدول ۳: همبستگی بین میانگین دقت تیراندازی و پارامترهای لرزش در وضعیت استراحت مچ دست چپ

شاخص لرزش	مچ دست چپ		
	Mean ± SD	R	P
PeakFreq (Hz)	۴/۹۰ ± ۰/۹۹	۰/۰۷۴	۰/۸۲۸
MedianPF (Hz)	۶/۸۸ ± ۰/۵۸	-۰/۰۷۵	۰/۸۲۷
RMS (mm/s^2)	۹۳۹/۷۹ ± ۴۱۷/۸۹	۰/۳۵۸	۰/۲۸۰
Total Power	۹۵۲۳۶۷/۱۳ ± ۸۰۳۶۶۲/۰۵	۰/۳۳۰	۰/۳۲۲
PercentAroundPeak	۲۳/۲۸ ± ۳/۰۷	۰/۳۰۴	۰/۳۶۳

بحث

پژوهش حاضر با هدف بررسی رابطه بین ویژگی‌های طیفی لرزش دست در وضعیت استراحت و عملکرد تیراندازی کمانداران ریکرو انجام شد. نتایج نشان داد که شاخص‌های فرکانسی لرزش دست در وضعیت استراحت هیچ رابطه معناداری با دقت تیراندازی ندارند. در مقابل، شاخص‌های دامنه‌ای لرزش در دست کمان (دست چپ) گرایش به همبستگی مثبت، هرچند غیرمعنادار، با دقت تیراندازی نشان دادند. این یافته‌ها در چارچوب مفاهیم کنترل عصبی–عضلانی و تفاوت الگوی لرزش در وضعیت‌های مختلف مورد بررسی قرار می‌گیرند.

عدم وجود رابطه معنادار بین ویژگی‌های طیفی لرزش دست در وضعیت استراحت و دقت تیراندازی، در ابتدا ممکن است غیرمنتظره به نظر برسد، اما با توجه به تفاوت‌های مکانیسمی لرزش در دو حالت استراحت و وضعیتی ، این یافته کاملاً توجیه‌پذیر است و با مطالعات نوروفیزیولوژیک همسو است.

عدم وجود رابطه معنادار بین ویژگی‌های طیفی لرزش دست در وضعیت استراحت و دقت تیراندازی ممکن است در نگاه اول غیرمنتظره به نظر برسد، اما با توجه به تفاوت‌های اساسی الگوی لرزش در دو حالت استراحت و وضعیتی این نتیجه کاملاً قابل توجیه است. مطالعات نوروفیزیولوژیک نشان داده‌اند که الگوی لرزش در حالت استراحت با الگوی لرزش هنگام حفظ یک وضعیت عملکردی تفاوت دارد. موریسون و نیوول (۲۰۰۰) و استورمن و همکاران (۲۰۰۵) نشان دادند که لرزش در وضعیت استراحت، که در غیاب انقباض ارادی یا بارگذاری عضلانی رخ می‌دهد، عمدتاً بازتاب مؤلفه‌های مکانیکی و نوسانات با فرکانس پایین‌تر است. در مقابل، در حالت وضعیتی، درگیری فعال‌تر مکانیسم‌های عصبی مرکزی و بازخوردهای رفلکسی موجب تغییر مشخصات لرزش می‌شود. برای مثال، استورمن و همکاران (۲۰۰۵) گزارش کردند که فرکانس اصلی لرزش در حالت وضعیتی به طور قابل توجهی بالاتر از حالت استراحت است (۲۱، ۲۲).

همچنین، دی روکو و همکاران (۲۰۲۵) بیان کرده‌اند که لرزش در حالت استراحت، شاخص مناسبی برای ارزیابی سازوکارهای عصبی_عضلانی درگیر در مهارت‌های حرکتی ظریف و کنترل وضعیت نیست. از آنجا که تیراندازی با کمان یک فعالیت عملکردی است که نیازمند حفظ پایداری موقعیت در شرایط بارگذاری ایزومتریک است، لرزش استراحتی به‌تنهایی توان پیش‌بینی موفقیت در این مهارت را ندارد. این موضوع محدودیت استفاده از لرزش استراحت به عنوان شاخص عملکرد را نشان می‌دهد و بر ضرورت بررسی لرزش در حین اجرای واقعی مهارت تأکید می‌کند (۲۳).

در تمامی تحلیل‌های انجام شده، شاخص‌های فرکانسی لرزش (MedianPF, PeakFreq) در وضعیت استراحت، هیچ ارتباط معناداری با دقت تیراندازی نشان ندادند. این یافته در حوزه پایداری پارامترهای لرزش فیزیولوژیک در جمعیت ورزشکاران، کاملاً همسو با ادبیات پژوهشی مرجع است.

گایوسکی و همکاران (۲۰۲۳) در مطالعه‌ای گسترده بر روی طیف توان لرزش در ورزشکاران جوان، اعلام کردند که فرکانس‌های اصلی طیف لرزش بین گروه‌های مختلف ورزشکاران تفاوت معناداری ندارند. این ثبات فرکانسی نشان می‌دهد که فرکانس لرزش فیزیولوژیک که منشأ مرکزی دارد یک ویژگی کیفی و تنظیم‌شده در افراد سالم و ورزشکار است که به راحتی تحت تأثیر تفاوت‌های فردی یا سطح مهارت نسبی قرار نمی‌گیرد (۱۶). توماتچاک و همکاران (۲۰۱۴) نیز این پایداری

نسبی مؤلفه‌های فرکانسی لرزش را تحت شرایط چالش‌برانگیز مانند خستگی تأیید کرده‌اند. بنابراین، عدم همبستگی فرکانس‌ها نشان می‌دهد که تغییرات جزئی در فرکانس مرکزی لرزش در حالت استراحت، عامل تعیین‌کننده دقت در یک مهارت وضعیتی پیچیده نیست (۴).

در مقابل، الگوی همبستگی شاخص‌های دامنه‌ای لرزش بین دو دست، تفاوت عملکردی قابل توجهی را نشان داد. در حالی که دامنه لرزش مچ دست راست (دست زه) ارتباطی با دقت تیراندازی نداشت، شاخص‌های دامنه‌ای لرزش در مچ دست چپ (دست کمان)، به‌ویژه شاخص RMS، همبستگی‌های مثبت قوی‌تری با دقت تیراندازی نشان دادند. این تفاوت با یافته‌های حوزه بیومکانیک ورزشی و کنترل حرکتی همخوانی دارد.

دست زه وظیفه کشیدن و رها کردن زه را بر عهده دارد و عملکرد آن بیش از آنکه به میزان لرزش استراحتی وابسته باشد، به دقت رهاسازی تیر و هماهنگی عصبی–عضلانی در لحظه اجرا وابسته است. بنابراین، لرزش استراحت دست زه لزوماً نمی‌تواند کیفیت عملکرد این دست در زمان رهاسازی تیر را پیش‌بینی کند. گایوسکی و همکاران (۲۰۲۳) نیز گزارش کردند که در جمعیت سالم، تفاوت ذاتی معناداری در لرزش استراحت بین دست غالب و غیرغالب وجود ندارد، که این یافته از تفسیر حاضر حمایت می‌کند(۱۶).

در مقابل، دست کمان وظیفه حفظ کمان در یک وضعیت ثابت را بر عهده دارد و نقش اصلی آن ایجاد و حفظ پایداری موقعیت در شرایط بارگذاری ایزومتریک است. در این دست، دامنه لرزش بالاتر (RMS, Total Power) همراه با تمرکز طیفی بیشتر ممکن است بازتابی از ویژگی‌های کنترل عصبی–عضلانی باشد. چنین سیستمی می‌تواند با توانایی حفظ نیروی ایزومتریک مناسب مرتبط باشد و به کنترل نوسانات دست در حین نشانه‌گیری کمک کند. این تفسیر در چارچوب یافته‌های کالکاوان و همکاران (۲۰۲۵) که بر اهمیت قدرت ایزومتریک و ثبات دست نگه‌دارنده کمان تأکید کرده‌اند، قابل بحث است (۲۴).همچنین، نتایج حاضر با گزارش‌های توکماچچی و همکاران (۲۰۲۳) درباره نقش کنترل وضعیتی در بهبود عملکرد تیراندازی همخوانی دارد (۲۵).

در خصوص سازوکارهای عصبی-عضلانی، لاکی و همکاران (۲۰۱۲) گزارش کردند که قله‌های فرکانسی لرزش دست در وضعیت استراحت و وضعیتی، بیش از آنکه وابسته به نوسان‌سازهای عصبی و فعالیت واحدهای حرکتی باشند، ناشی از رزونانس مکانیکی اندام و ویژگی‌های فیزیکی عضلات است. از این رو، تمرکز این پژوهش بر شاخص‌های طیفی حاصل از تحلیل حرکت برای ارزیابی پایداری و عملکرد تیراندازی کفایت لازم را داشته و تحلیل کینماتیک لرزش، به‌خوبی بازتاب‌دهنده ویژگی‌های مکانیکی سیستم کنترل حرکتی ورزشکار است. لازم به ذکر است که جمع‌آوری داده‌های EMG همزمان در این مطالعه انجام نشده است و این موضوع به‌عنوان محدودیت مطالعه قابل ذکر است (۲۶).

نتیجه‌گیری

پژوهش حاضر نشان داد که شاخص‌های فرکانسی لرزش دست‌ها در وضعیت استراحت هیچ همبستگی معناداری با دقت تیراندازی کمانداران ریکرو ندارند. این یافته با توجه به تفاوت‌های مکانیسمی بین لرزش استراحت و لرزش وضعیتی قابل توجیه است و تأکید می‌کند که لرزش استراحت به تنهایی پیش‌بینی‌کننده عملکرد مهارتی پیچیده‌ای مانند تیراندازی نیست. با این

حال، شاخص‌های دامنه‌ای لرزش در دست چپ ، به ویژه درصد توان اطراف فرکانس پیک، همبستگی‌های مثبت متوسط با دقت تیراندازی نشان دادند. این موضوع نشان می‌دهد که این شاخص‌ها ممکن است بازتاب‌دهنده ظرفیت عصبی_عضلانی پایه مورد نیاز برای حفظ ثبات ایزومتریک و کنترل حرکتی دقیق در حین تیراندازی باشند. اگرچه روابط به سطح معناداری آماری نرسیدند، اما گرایش مشاهده شده در شاخص‌های دامنه‌ای لرزش دست کمان نشان می‌دهد که بررسی لرزش در شرایط عملکردی (حین اجرای تیر) می‌تواند به‌عنوان یک مسیر پژوهشی آینده برای درک بهتر کنترل حرکتی در تیراندازی مدنظر قرار گیرد.

ملاحظات اخلاقی

پیروی از اصول اخلاقی

این مطالعه در چارچوب اصول اخلاقی مربوط به آزمودنی‌های انسانی انجام شد. شرکت‌کنندگان پس از دریافت توضیحات کامل درباره اهداف و نحوه اجرای تحقیق، با امضای رضایت‌نامه کتبی و به‌صورت کاملاً داوطلبانه در فرآیند پژوهش مشارکت کردند.

حامی مالی

این مقاله توسط سازمان یا نهادی تامین مالی نشده است.

مشارکت نویسندگان

تمامی نویسندگان در نگارش این مقاله مشارکت داشتند.

تعارض منافع

بین نویسندگان تعارض در منافع وجود ندارد.

منابع

1. Aljihmani L, Zhuz Y, Abbas HT, Mehta R, Sasangohar F, Erraguntla M, et al., editors. Spectral analysis of hand tremors induced during a fatigue test. 2019 IEEE 32nd International Symposium on Computer-Based Medical Systems (CBMS); 2019: IEEE.
2. Park W ,Lee J, Lee H, Hong G, Park H-Y, Park J. Analysis of physiological tremors during different intensities of armcurl exercises using wearable three-axis accelerometers in healthy young men: a pilot study. Physical Activity and Nutrition. 2022;26(4):32.
3. Papale O, Di Rocco F, Festino E, Gammino V, Cortis C, Fusco A. Do Hand Exercises Influence Physiological Hand Tremor? An Observational Cohort Study on Healthy Young Adults. Applied Sciences. 2024;14(11):4467.
4. Tomczak A, Gajewski J, Mazur-Różycka J. Changes in physiological tremor resulting from sleep deprivation under conditions of increasing fatigue during prolonged military training. Biol Sport. 2014;31(4):303-8.
5. Charles PD, Esper GJ, Davis TL, Maciunas RJ, Robertson D. Classification of tremor and update on treatment. American family physician. 1999;59(6):1565-72.
6. Vernooij CA, Lakie M, Reynolds RF. The complete frequency spectrum of physiological tremor can be recreated by broadband mechanical or electrical drive. J Neurophysiol. 2015;113(2):6.٥٦-٤٧

7. Gallahue DL, Ozmun JC, Goodway JD. Understanding motor development : infants, children, adolescents, adults. 7th ed. New York: McGraw-Hill; 2012.
8. Falaahudin A, Saleh RAP, Triprayogo R, Nadzalan AM. Analysis of Eye Coordination, Arm Power and VO2max in Archery Athletes in Terms of Gender. International Journal of Multidisciplinary Research and Analysis. 2024;07.(۰۱)
9. Sarro KJ, Viana TDC, De Barros RML. Relationship between bow stability and postural control in recurve archery. European journal of sport science. 2021;21(4):515-20.
10. Lin J-J, Hung C-J, Yang C-C, Chen H-Y, Chou F-C, Lu T-W. Activation and tremor of the shoulder muscles to the demands of an archery task. Journal of sports sciences. 2010;28(4):415-21.
11. Liu Y, Hu N, Sun M, Qu F, Zhou X. The effects of hand tremors on the shooting performance of air pistol shooters with different skill levels. Sensors. 2024;24(8):2438.
12. Ganjave P, S.Dabholkar D. Comparative Analysis of Upper Extremity Performance Variables in Elite and Novice Recurve Archers: A Cross-Sectional Observational Study: Life Sciences-Physiotherapy. International Journal of Life Science and Pharma Research. 2022:77-84.
13. Walecki P, Lasoń W, Kunc M, Gorzelańczyk EJ. Analysis of tremor in motor learning task. Bio-Algorithms & Med-Systems. 2013;9.(۱)
14. Santos PSA, Santos EGR, Monteiro LCP, Santos-Lobato BL, Pinto GHL, Belgamo A, et al. The hand tremor spectrum is modified by the inertial sensor mass during lightweight wearable and smartphone-based assessment in healthy young subjects. Scientific Reports. 2022;12(1):16808.
15. Heida T, Wentink EC, Marani E. Power spectral density analysis of physiological, rest and action tremor in Parkinson's disease patients treated with deep brain stimulation. Journal of neuroengineering and rehabilitation. 2013;10(1):70.
16. Gajewski J, Mazur-Różycka J, Górski M, Buśko K. Reference values of the forearm tremor power spectra for youth athletes. Journal of Human Kinetics. 2023;86:133.
17. Ogasawara T, Fukamachi H, Aoyagi K, Kumano S, Togo H, Oka K. Archery skill assessment using an acceleration sensor. IEEE Transactions on Human-Machine Systems. 2021;51(3):221-8.
18. Ko JH, Han DW, Newell KM. Skill level constrains the coordination of posture and upper-limb movement in a pistol-aiming task. Hum Mov Sci. 2017;55:255-63.
19. de Araujo ACA, Santos E, de Sa KSG, Furtado VKT, Santos FA, de Lima RC, et al. Hand Resting Tremor Assessment of Healthy and Patients With Parkinson's Disease: An Exploratory Machine Learning Study. Front Bioeng Biotechnol. 2020;8:778.
20. Chan PY, Ripin ZM, Halim SA, Arifin WN, Yahya AS, Eow GB, et al. Motion characteristics of subclinical tremors in Parkinson's disease and normal subjects. Sci Rep. 2022;12(1):4021.
21. Vaillancourt DE, Newell KM. The dynamics of resting and postural tremor in Parkinson's disease. Clin Neurophysiol. 2000;111(11):2046-56.
22. Sturman MM, Vaillancourt DE, Corcos DM. Effects of aging on the regularity of physiological tremor. J Neurophysiol. 2005;93(6):3064-74.
23. Di Rocco F, Festino E, Papale O, De Maio M, Cortis C, Fusco A. Acute Effects of Complex Hand Proprioceptive Task on Low-Frequency Hand Rest Tremor. Sensors (Basel). 2025;25.(۲۰)
24. Kalkavan A, Kavalcı İ, Nihan AK. The Contribution of Fine Motor Skills and Isometric Hand Strength to Competitive Archery Performance: A Cross-Sectional Study. International Journal of Kinesiology & Sports Science. 2025;13(3):5.
25. Tokmakci HH, Özgür S, Varol T. Anxiety sensitivity, stress, and postural control: their implications on archery performance in 11–14-year-olds. Human Movement. 2023;24(4):80-9.
26. Lakie M, Vernooij CA, Osborne TM, Reynolds RF. The resonant component of human physiological hand tremor is altered by slow voluntary movements. J Physiol. 2012;590(10):2471-83.