Sport. Med. Stud, 2024, 16(41): 17-32, DOI: 10.22089/smj.2024.16028.1729

Sport Medicine Studies

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

Original Article

A Systematic Review of the Effect of Exercise on Biomechanical Parameters of the Achilles Tendon

Nazfar Nikjoo[1], Davood Khezri[2], Fereshteh Talebpour Amiri[3], Ali Fatahi[4]

1. Department of Sports Biomechanics, CT.C., Islamic Azad University, Tehran, Iran.
2. Assistant Professor in Sport Biomechanics, Department of Sport Biomechanics and Technology, Sport Science Research Institute, Tehran, Iran
3. Full Professor of Department of Anatomy, Faculty of Medicine, Mazandaran University of Medical Sciences, Sari, Iran
4. Department of Sports Biomechanics, CT.C., Islamic Azad University, Tehran, Iran.

Received: 02/12/2023, Revised: 17/01/2024, Accepted: 22/01/2024

* Corresponding Author: Davood Khezri, E-mail: daividkhezry@gmail.com

How to Cite: Nikjoo, N; Khezri, D; Talebpour Amiri, F; Fatahi, A. (2024). A Systematic Review of the Effect of Exercise on Biomechanical Parameters of the Achilles Tendon. Sport Medicine Studies, 16(41), 17-32. In Persian.

Extended Abstract

Background and Purpose

Achilles tendon injuries and dysfunctions, particularly Achilles tendinopathy, represent common issues among athletes and physically active individuals. The Achilles tendon, being the largest and strongest tendon in the human body, plays a critical role in locomotion by storing and releasing elastic energy during dynamic activities such as walking, running, and jumping. Given its high mechanical demands and vulnerability to overuse injuries, optimizing rehabilitation strategies for Achilles tendinopathy is essential. Exercise, particularly those involving mechanical loading, has emerged as a primary intervention. However, the precise effects of various exercise modalities and intensities on the tendon's biomechanical properties remain a subject of ongoing investigation. This systematic review explores these impacts to guide evidence-based rehabilitation and prevention strategies. This study aims to systematically review the literature on how different forms and intensities of exercise influence the biomechanical parameters of the Achilles tendon, particularly stiffness, cross-sectional area (CSA), tendon elongation, and force transmission. The research also evaluates the effects of these exercise-induced changes on rehabilitation outcomes following Achilles tendinopathy.

Methods & Materials

Following PRISMA guidelines, a comprehensive literature search was conducted across four major databases (PubMed, Scopus, Web of Science, and Google Scholar) for studies published between January 2020 and November 2023. Keywords included combinations of "Achilles tendon," "exercise," "stiffness," "biomechanics," and "rehabilitation" using Boolean operators (AND/OR). From an initial pool of 845 articles, 10 studies met the inclusion criteria after applying predefined

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/).

filters related to language, methodology, relevance, and publication date. Studies involving amputation or cognitive disorders were excluded. All selected studies were independently evaluated by four reviewers using a standardized data extraction form and a modified MINORS scoring system for quality assessment.

Results

Across the selected studies, various types of exercise interventions—ranging from short-term treadmill running to high-load resistance training—were found to significantly affect the mechanical and structural properties of the Achilles tendon. The results indicated that adequate external force application during exercise interventions is critical for improving tendinopathy outcomes. Significant correlations were observed between tendon stiffness, activity levels, and the Achilles Tendon Total Rupture Score (ATRS), highlighting the clinical relevance of stiffness and plantar pressure measurements. High-load interventions were found to induce significant mechanical and morphological adaptations in the plantar flexor muscle-tendon unit, potentially protecting the tendon from strain-induced damage. These findings suggest that high-load exercises can serve as an effective therapeutic protocol for Achilles tendon injury rehabilitation.

However, the review also revealed that stiffness measurements alone may not fully capture changes in Achilles tendon properties, emphasizing the importance of selecting appropriate evaluation methods during treatment and follow-up. The Achilles tendon is a dynamic tissue that adapts to mechanical loads, underscoring the need for tailored exercise and rehabilitation strategies.

Discussion

This review emphasizes that the Achilles tendon is a dynamic, load-responsive tissue that adapts to exercise in a dose-dependent manner. Exercise interventions can modulate mechanical properties like stiffness and CSA, which are crucial for tendon resilience. High-load exercises, particularly those incorporating eccentric movements and maximal dorsiflexion, appear most effective in promoting tendon adaptation and rehabilitation. Nonetheless, the measurement of stiffness alone is insufficient to evaluate tendon health comprehensively.

Clinical outcomes are influenced not only by structural changes but also by neuromuscular coordination, proprioception, and metabolic efficiency. As such, multi-dimensional evaluation protocols—including biomechanical assessments, functional tests, and patient-reported outcome measures—should be integrated into tendon rehabilitation programs. Moreover, early intervention and tailored exercise protocols based on individual activity levels and injury history can enhance treatment efficacy and prevent recurrence.

Age-related changes also warrant consideration. With aging, tendon stiffness naturally declines, contributing to increased metabolic cost of walking and reduced gait efficiency. Rehabilitation strategies targeting the plantar flexor muscle–tendon unit in older adults may therefore need to incorporate both loading exercises and gait retraining using wearable biofeedback devices.

Conclusion

The biomechanical properties of the Achilles tendon are modifiable through exercise, particularly when high mechanical loads are applied consistently over time. This systematic review demonstrates that exercise protocols focusing on tendon stiffness, CSA, and force transmission yield clinically significant improvements in tendinopathy rehabilitation. However, optimal assessment requires a comprehensive, multidimensional approach beyond stiffness measurement alone. Tailored

rehabilitation strategies that consider patient-specific biomechanics, training history, and functional outcomes are essential for effective tendon recovery and injury prevention.
Keywords: Achilles Tendon, Stiffness, Biomechanics, Exercise, Tendinopathy

Article Message

High-load, biomechanically informed exercise interventions can effectively improve Achilles tendon structure and function, serving as an optimal rehabilitation strategy for tendinopathy when integrated with comprehensive assessment methods.

پژوهشگاه علوم انسانی و مطالعات فرهنگی
پرتال جامع علوم انسانی

مطالعات طب ورزشی، پاییز ۱۴۰۳، دوره ۱۶، شماره ۴۱، صص ۳۲-۱۷.DOI: 10.22089/smj.2024.16028.1729

مطالعات طب ورزشی
Journal hompage: https://smj.ssrc.ac.ir

مقالهٔ‌پژوهشی

مرور نظام‌مند اثر ورزش بر پارامترهای بیومکانیکی تاندون آشیل

نازفر نیکجو[۱]، داود خضری[۲]، فرشته طالب‌پور امیری[۳]، علی فتاحی[۴]

۱.گروه بیومکانیک ورزشی، واحد تهران مرکزی، دانشگاه آزاد اسلامی، تهران، ایران
۲. استادیار گروه بیومکانیک وفناوری ورزشی، پژوهشگاه تربیت بدنی و علوم ورزشی، تهران، ایران
۳. استاد گروه آناتومی، دانشکده پزشکی، دانشگاه علوم پزشکی مازندران، ساری، ایران
۴. گروه بیومکانیک ورزشی، واحد تهران مرکزی، دانشگاه آزاد اسلامی، تهران، ایران

تاریخ دریافت: ۱۴۰۲/۰۹/۱۱ ، تاریخ اصلاح: ۱۴۰۲/۱۰/۲۷ ، تاریخ پذیرش: ۱۴۰۲/۱۱/۰۲

* Corresponding Author: Davood Khezri, E-mail: daividkhezry@gmail.com

How to Cite: Nikjoo, N; Khezri, D; Talebpour Amiri, F; Fatahi, A. (2024). A Systematic Review of the Effect of Exercise on Biomechanical Parameters of the Achilles Tendon. Sport Medicine Studies, 16(41), 17-32. In Persian.

چکیده

تأثیر ورزش و میزان شدت آن بر پارامترهای بیومکانیک بافت آشیل، چالشی آشکار برای محققان این حوزه است؛ بنابراین مطالعه حاضر با هدف مرور نظام‌مند مطالعات انجام‌شده در حوزه اثر تمرینات ورزشی بر ویژگی‌های بیومکانیکی تاندون آشیل و تأثیر آن بر توان‌بخشی پس از آسیب تاندون آشیل، انجام شد. برای این بررسی از مطالعات انجام‌شده در سال‌های ۲۰۲۰ تا نوامبر ۲۰۲۳ استفاده شد. جست‌وجوی کلمات کلیدی در چهار پایگاه اطلاعاتی معتبر google scholer، Pub Med، Web of Scince، Scopus، مطابق با PRISMA موارد گزارش برگزیده برای بررسی‌های سیستماتیک و متاانالیز انجام شد. در این مطالعه عبارات جست‌وجو شامل Achilles Tendon, Stiffness, Exercise, Biomechanics با کلمات مترادف با دستور Boolean AND ترکیب شده و با دستور Boolean OR پیوند داده شدند. درنهایت، ویژگی‌های بیومکانیکی تاندون با دو عامل سفتی و مداخلات تمرین ورزشی یا توان‌بخشی تندینوپاتی تاندون آشیل و متغیرهای آن بررسی شد. از ۸۴۵ مقاله یافت‌شده، ۱۰ مقاله برای این پژوهش انتخاب شد. به‌طورکلی نتایج نشان داد که برای افزایش اثربخشی در هنگام مداخلات تمرینی تندینوپاتی باید در تمرینات نیروی خارجی به اندازه کافی اعمال شود. همبستگی‌های درخورتوجهی بین سفتی تاندون و فعالیت‌های مختلف و نمره کل پارگی تاندون آشیل وجود دارد که نشان‌دهنده اهمیت بالینی سفتی تاندون و اندازه‌گیری فشار پلانتار پا است. نتایج حاضر نشان می‌دهد که چگونه تغییر در ساختار آشیل می‌تواند بر فعالیت‌های روزانه بیماران تأثیر بگذارد. مداخله با بار بالا تنظیمات مکانیکی و مورفولوژیک چشمگیری در واحد عضلات-تاندون پلانتار فلکسور ایجاد می‌کند. این امر ممکن است به حفاظت از تاندون در برابر آسیب ناشی از کشش کمک کند. مداخله با بار بالا را می‌توان به‌عنوان پروتکل درمانی (جایگزین) مؤثر در مدیریت توان‌بخشی آسیب تاندون آشیل در نظر گرفت؛ بنابراین انتخاب ورزش مناسب در بازتوانی تاندون آشیل بسیار اهمیت دارد.

واژگان کلیدی: تاندون آشیل، سفتی، بیومکانیک، تمرین، تاندونپاتی.

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

بررسی پارامترهای بیومکانیکی اندام‌ها و بافت‌های بدن برای جلوگیری از آسیب و ارتقای عملکرد آن بسیار مهم است (۴-۱). تاندون آشیل[1] (AT) ضخیم‌ترین و قوی‌ترین تاندون بدن انسان است. توانایی ذخیره و آزادسازی انرژی الاستیک در حین راه رفتن، دویدن و پریدن در طول، ضخامت و سطح مقطع تاندون آشیل (CSA)[2] همگی ارتباط مثبت با فعالیت‌های فیزیکی مؤثر بر سرعت، نیرو و قدرت دارد (۶، ۵). علاوه بر این، مطالعات نشان داده‌اند که تغییرات در ویژگی‌هایی از قبیل طول، ضخامت، CSA و سفتی می‌تواند منجر به تغییر در نیرو و گشتاور شود و بر میزان انحطاط تاندون و آسیب در ساختار بافتی تأثیر بگذارد (۷، ۶). درک چگونگی نقش این عوامل در آسیب تاندون برای مدیریت و پیشگیری از جراحت و پارگی تاندون آشیل، اهمیت دارد.

راه‌رفتن و دویدن از فعالیت‌های بدنی متداولی هستند که در فرایند توان‌بخشی بیماران با آسیب تاندون آشیل به‌خوبی استفاده می‌شوند. در حین راه‌رفتن، AT بارگذاری معادل حدود سه برابر وزن بدن را (۹، ۸) تحمل می‌کند. این بارگذاری می‌تواند در حین دویدن به بیش از دوازده برابر وزن بدن برسد (۱۰)؛ بااین‌حال، بیومکانیک تاندون آشیل در طول تمرینات توان‌بخشی هنوز با استفاده از روش‌های سازگار اندازه‌گیری نشده است؛ روشی که ضروری به نظر می‌رسد ترتیب تمرینات به‌منظور ایمن‌ترین روش برای انتقال بیماران از قبیل راه رفتن، دویدن و پریدن و درنهایت بازگشت کامل فرد به فعالیت است (۱۱). هدف مطالعه حاضر، مرور سیستماتیک برای پاسخ به این سؤال است که تمرینات ورزشی چه تأثیری بر ویژگی‌های بیومکانیکی AT دارد و ویژگی گزارش شده AT چگونه ممکن است بر توان‌بخشی پس از آسیب AT تأثیر بگذارد.

روش پژوهش

استراتژی جست‌وجو

جست‌وجوی کلمات کلیدی در چهار پایگاه اطلاعاتی معتبر Pub Med،google scholer، Web of Scince، Scopus انجام شد. این جست‌وجو از ۲۰ سپتامبر ۲۰۲۳ تا ۲ نوامبر ۲۰۲۳ صورت گرفت. مطابق با PRISMA[3] موارد گزارش برگزیده برای بررسی‌های سیستماتیک و متاآنالیز انتخاب شدند (۱۲). در مطالعه مروری حاضر عبارات جست‌وجو شامل Achilles Tendon, Stiffness, Exercise, Biomechanics با کلمات مترادف با دستور Boolean AND ترکیب شده و با دستور Boolean OR پیوند داده شدند. ویژگی‌های بیومکانیکی تاندون آشیل با دو عامل زیر بررسی شدند: سفتی و مداخلات تمرین ورزشی یا توان‌بخشی تندینوپاتی تاندون آشیل و متغیرهای آن که براساس نتایج مطالعات مربوط و توصیه‌های کارشناسان سازمان‌دهی شدند.

معیارهای ورود و خروج مقالات

مقالات چاپ‌شده در مجلات به زبان‌های انگلیسی و فارسی بودند. مطالعات در زمینه قطع عضو و با اختلالات شناختی و ادراکی یا اختلالات حافظه از این مطالعه خارج شدند. همچنین مقالات قبل از سال ۲۰۲۰، مقالات مروری یا متاآنالیز در این

1. Achilles Tendon
2. Cross-Sectional Area
3. Preferred Reporting Items for Systematic Reviews and Meta-Analysis

مطالعه بررسی نشدند. پژوهش‌هایی بررسی شدند که درباره ویژگی‌های بیومکانکی تاندون آشیل در ورزش و تمرین بودند و هر چهار پژوهشگر مطالعه حاضر تأیید کردند.

انتخاب مطالعه

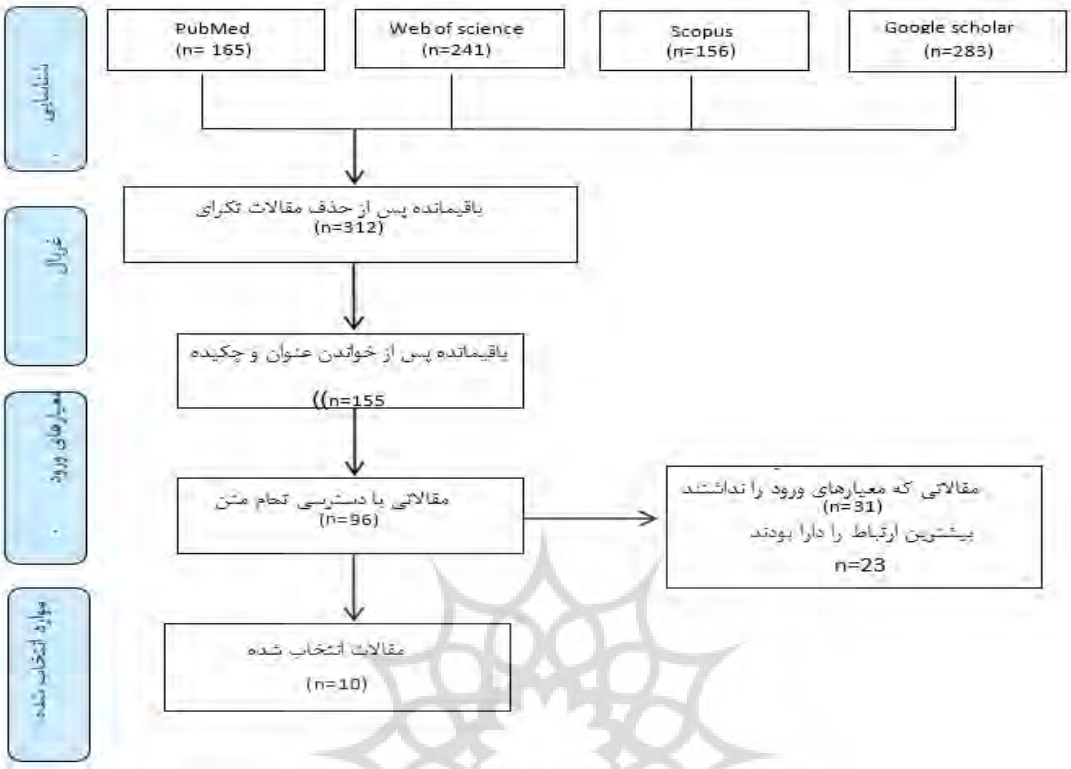
در این جست‌وجو تلاش شد سیر پیشرفت پژوهش‌ها درباره بیومکانیک تاندون آشیل بدون در نظر گرفتن هیچ‌گونه محدودیت مکانی و در بازه گسترده زمانی تا سال ۲۰۲۳ ارزیابی شود. با این جست‌وجو گستره وسیعی از مقالات به دست آمد، ولی هدف مطالعه حاضر تنها بررسی پژوهش‌هایی بود که در آن‌ها پروتکل حرکتی تعریف‌شده برای آزمودنی‌ها صرفاً بررسی خواص بیومکانیکی تاندون آشیل بود؛ بنابراین تعداد مقالات یافت‌شده ۸۴۵ عدد بود که پس از غربالگری اولیه و حذف مطالعات تکراری و مطالعات قبل از سال ۲۰۱۹، ۹۶ مقاله شد. پس از حذف مقالاتی که به زبان انگلیسی نبودند یا متن کامل آن‌ها در دسترس نبود، از مجموع مقالات یافت‌شده، ۶۵ مقاله باقی ماند. از طریق مطالعه چکیده‌های مقالات، مطالعاتی که بیشترین ارتباط موضوعی را با هدف مدنظر ما داشتند، ۲۳ مقاله بود که با معیار اصلی در انتخاب مقالات شاملِ توجه به پارامترهای بیومکانیکی تاندون آشیل با مطالعه متن کامل مقاله، مطابقت داشتند. پس از مطالعه تمام متن مقالات توسط چهار پژوهشگر، ۱۰ مقاله که بیشترین ارتباط موضوعی با مطالعه حاضر را داشتند، انتخاب شدند (نمودار روند غربالگری مقالات در شکل ۱).

استخراج داده‌ها، تجزیه و تحلیل، تفسیر

معیارهای اولیه شامل سفتی، طول AT، CSA بود و معیارهای بعدی اوج نیرو، سرعت بارگذاری و انقباض ارادی عضلانی بود. پیامد شامل تأثیر تمرین بر ویژگی‌های تاندون آشیل و سازگاری بود. نتایج معیار براساس درصد مطالعاتی که هرکدام را ارزیابی کردند، گزارش شد. اطلاعات و نتایج با استفاده از «فرم استخراج داده‌ها» «Data Extraction Form» که براساس هدف پژوهش طراحی شده بود (جدول ۱)، جدول‌بندی شدند و مطالعات در صورت وجود در تجزیه و تحلیل گنجانده شدند. چهار بازبین هر مطالعه را ارزیابی کرده و به‌طور مستقل اطلاعات را استخراج کردند. این داده‌ها توسط چهار نویسنده به‌طور مستقل جمع‌آوری شد و در هر مورد اگر بین سه پژوهشگر (نازفر نیکجو، داود خضری و فرشته طالب‌پور) در انتخاب مقاله‌ای اجماع‌نظر وجود نداشت، از پژوهشگر چهارم (علی فتاحی) نظرسنجی شد.

ارزیابی کیفیت

ارزیابی کیفیت توسط چهار نویسنده به‌طور مستقل با استفاده از فرم اصلاح‌شده ارزیابی کیفیت Modified Minors Score (۱۳) انجام شد. امتیازات حاصل از این ارزیابی برای هریک از مقالات براساس کسب امتیاز ارزیابی شامل کیفیت پایین، متوسط و بالا تعریف شد. معیارهای امتیازدهی در این ارزیابی عبارت بود از: منتشرشده در یک مجله معتبر (PRJ)، هدف بیان‌شده (SA)، گروه‌های مقایسه‌ای (CG)، ارزیابی نقاب‌دار (MA)، مقایسه و برای جنس/جنسیت (SG) کنترل‌شده، معیارهای ورود/خروج تعریف‌شده (IE)، داشتن تجزیه و تحلیل آماری (ASA)، پیامدهای مشخصی که انجام شد (SOP) و دارای پایه برای معادل گروه‌ها (BE). اگر اجماع‌نظر حاصل نمی‌شد، نویسنده چهارم به‌طور مستقل بررسی می‌کرد و تصمیم گرفته می‌شد. همه مطالعات حاضر در این مرور سیستماتیک امتیازدهی شدند (امتیاز دهی در پیوست آورده شده است).



شکل ۱- نمودار روند غربالگری مقالات

Figure 1- Diagram of the article screening process

جدول ۱- فرم استخراج داده‌های پژوهش

Table 1- Research data extraction form

ردیف	نویسنده	عنوان	ازمودنی ها	روش	ابزار	نتایج پژوهش
1	Mengcun Chen et al (14)	Short- and Long-Term Exercise Results in a Differential Achilles Tendon Mechanical Response	۱۳۶ موش از نژاد اسپراگ داولی	یوانات در گروه‌های EX منفرد، ۳، ۱۲، ۲۴ یا ۴۸ ساعت پس از اتمام یک جلسه تمرین (۱۰ متر در دقیقه، ۱ ساعت) و حیوانات گروه‌های EX کوتاه مدت به مدت ۳ روز، ۱ یا ۲ هفته روی تردمیل صاف می‌دویدند و حیوانات در گروه‌های EX طولانی، ۸ هفته می‌دویدند.	تردمیل	یک جلسه ورزش باعث افزایش سفتی تاندون بعد از ۴۸ ساعت بهبودی شد. ورزش کوتاه مدت تا ۱ هفته باعث کاهش سطح مقطع، سفتی، مدول و مدول دینامیک تاندون آشیل شد. درمقابل، ۸ هفته ورزش روزانه باعث افزایش سفتی، مدول و مدول دینامیک تاندون شد.

جدول ۱- فرم استخراج داده‌های پژوهش

Table 1- Research data extraction form

ردیف	نویسنده	عنوان	ازمودنی ها	روش	ابزار	نتایج پژوهش
2	Goran Radovanović et al. (15)	Evidence-Based High-Loading Tendon Exercise for 12 Weeks Leads to Increased Tendon Stiffness and Cross-Sectional Area in Achilles Tendinopathy: A Controlled Clinical Trial	مردان ۲۰ تا ۵۵ سال	یک کارآزمایی بالینی کنترل شده با یک مرحله مداخله سه‌ماهه انجام شد. تاندیوپاتی مزمن آشیل توسط پزشک با سونوگرافی تأیید شد. یک مداخله با دارو، دفعات فیزیوتراپی و فعالیت‌های ورزشی اجرا شد.	MRI	MVC فلکسور پلانتار، سفتی تاندون، میانگین CSA و حداکثر کشیدگی تاندون بهبود یافت. در گروه مداخله با بار بالا با ۹.۹ ± ۷.۲٪ (p=۰.۰۴۵)، ۲۰.۵ ±۲۰.۱٪ (p=۰.۰۴۹)، ۵.۸ ± ۸.۹۸ و به ترتیب ۱۲.۴ ± ۱۰.۳٪ (p=۰.۰۰۱). سفتی در گروه درمان غیرفعال کاهش یافت (۲۱.۲ ± ۷.۷-٪، p=۰.۰۴۲). هیچ تغییری در مدول یانگ در هر دو گروه مشاهده نشد.
3	Freddy Sichting et al. (16)	An Identical Twin Study on Human Achilles Tendon Adaptation: Regular Recreational Exercise at Comparatively Low Intensities Can Increase Tendon Stiffness	۴۰ دوقلوی همسان (۱۹ زن و ۲۱ مرد)	وسط تاندون آشیل طول تاندون آشیل، طول ساق پا محاسبه شد. سپس هر دو دوقلو باید روی یک صندلی می‌نشستند و زانوهایشان را ۹۰ خم می‌کردند و با زاویه ۲۰ دورسی فلکشن، روی یک سازه قرار می‌دادند. این موقعیت امکان اندازه‌گیری سفتی تاندون آشیل را فراهم می‌کرد.	دستگاه نوسان دستی برای تعیین خواص مکانیکی تاندون آشیل (handheld oscillation device)	به نظر می‌رسد تاندون آشیل، خود را با تمرینات تفریحی منظم با شدت نسبتاً کم سازگار می‌کند. سفتی، سختی تاندون آشیل در دوقلوهای فعال ۲۸ درصد بیشتر از غیرفعال بود (p<۰.۰۵).
4	Abdulhamit Misir et al. (17)	Repair within the first 48 h in the treatment of acute Achilles tendon ruptures achieves the best biomechanical and histological outcomes	۳۶ موش صحرایی نژاد اسپراگ داولی	موش‌ها تحت تنوتومی آشیل با قرار گرفتند. تاندون‌های آشیل در ۲۴ ساعت اول (گروه ۱)، ۲۴ تا ۴۸ ساعت (گروه ۲)، ۴۸ تا ۷۲ ساعت (گروه ۳)، یا > ۷۲ ساعت (میانگین: ۱۲۰ ± ۵.۲ ساعت) (گروه ۴) ترمیم	همبستگی بین نتایج بیومکانیکی و بافت‌شناسیS tol تجزیه و تحلیل شد.	تفاوت معناداری بین گروه‌های ۱، ۲ و ۳ درمورد میانگین بار شکست وجود نداشت. تاندون‌های بهبودیافته در گروه‌های ۱، ۲ و ۳ به‌طور درخورتوجهی سفتی بیشتری داشتند. تمام تاندون‌های

جدول ۱- فرم استخراج داده‌های پژوهش

Table 1- Research data extraction form

ردیف	نویسنده	عنوان	ازمودنی ها	روش	ابزار	نتایج پژوهش
				شدند. بعد از تنوتومی شش هفته پس از ترمیم، تاندون در هر گروه از نظر بیومکانیکی و بافت شناسی ارزیابی شد.		بهبودیافته دارای سطح مقطع بزرگ‌تری بودند. تفاوت معناداری در طول تاندون بین گروه‌ها وجود نداشت. همچنین تفاوت معناداری در مدول یانگ بین گروه‌ها وجود نداشت.
5	Chia-Han Yeh et al. (18)	Maximum dorsiflexion increases Achilles tendon force during exercise for midportion Achilles tendinopathy	۱۸ هجده داوطلب سالم (۱۱ مرد، ۷ زن، سن: ۲۹.۶ ± ۳.۸، وزن: ۱۲.۴ ± ۷۰.۷ کیلوگرم، قد: ۷.۵ ± ۱۷۱.۸ سانتی‌متر)	متغیرهای GRF نیرو و سینماتیک که بر نیروی تاندون آشیل (AT) در تمرینات (ECC) تمرینات (HSR) تأثیر می‌گذارند، در طی ECC و HSR از آزمودنی ها در چهار حالت جمع آوری شد. تخمین بازوی گشتاوری AT از روی MRI و محاسبه گشتاور زانو از طریق داینامیک معکوس بود.	ماشین اسمیت	در هر دو روش ECC و HSR در نیروی AT در فاز اسنتریک و کانسنتریک تفاوت وجود نداشت و تحت همان بار خارجی، نیروی عبوری از AT در ECC با زانو خم، به دلیل افزایش زاویه دورسی فلکشن مچ پا، بیشتر از HSR با زانو صاف بود.
6	Daniel Jandacka et al. (19)	Achilles tendon structure is associated with regular running volume and biomechanics	۳۵۰ شرکت‌کننده سالم (دوندگان و کنترل‌های غیرفعال، ۳۰-۵۰ سال)	آزمون cise به‌منظور تعیین حداکثر میزان مصرف اکسیژن و تصویربرداری نانس پس از ارزیابی‌های انسان‌شناسی انجام شد و تست‌های عملکردی اندام تحتانی و تست مکانیکی توسط هر شرکت‌کننده اجرا شد. این اندازه‌گیری‌های پایه دو روز و در چهارده روز دنبال شد.	سیستم ضبط حرکت با سرعت بالا با ۱۰ دوربین، سه صفحه نیرو ساخته شده در یک باند ۱۷ متری، تشدید مغناطیسی اسکنر ۱.۵ T Magnetom Sempra	افراد غیردونده و کسانی که بیش از ۴۰ کیلومتر در هفته دویدند، شانس ابتلا به تندینوپاتی را افزایش دادند. زمان شل‌شدن تاندون T2* به‌عنوان شاخص غیرمستقیم ساختار تاندون آشیل، رابطه مثبتی با حداکثر لحظه کشش زانو در حین دویدن داشت.

جدول ۱- فرم استخراج داده‌های پژوهش

Table 1- Research data extraction form

ردیف	نویسنده	عنوان	ازمودنی ها	روش	ابزار	نتایج پژوهش
7	Richard E. Pimentel et al. (20)	Simulations suggest walking with reduced propulsive force would not mitigate the energetic consequences of lower tendon stiffness	۱۲ (۸ زن) جوان سالم بزرگسالان (میانگین ± انحراف معیار: سن: ۳.۱±۲۳.۳؛ قد= ۰.۱۲±۱.۷۴ متر؛ جرم= ۷۴.۷ (± ۱۴.۳	شرکت‌کنندگان چهار گذر را در یک مسیر با گیت‌های زمان‌بندی به فاصله ۳۰ متر از هم راه رفتند. برای تعیین سرعت راه رفتن ترجیحی آن‌ها یک آزمایش پنج دقیقه‌ای پیاده‌روی معمولی برای هر شرکت‌کننده روی دستگاه ضبط شد.	تردمیل دو تسمه	سفتی تاندون و نیروی محرکه فشاری هر دو بر هزینه متابولیک تأثیر می‌گذارند. نتایج، هیچ شواهدی برای تعامل بین سفتی تاندون و نیروی محرکه فشاری در بزرگسالان جوان‌تر نشان نمی‌دهد.
8	Didier Laurent et al. (21)	Relationship between tendon structure, stiffness, gait patterns and patient reported outcomes during the early stages of recovery after an Achilles tendon rupture	۱۵ بیمار	شرکت‌کنندگان تا سه ماه پس از پارگی AT اندازه‌گیری شدند.	الاستوگرافی موجی (SWE) و کفی های پوشیدنی	در هفته دوم پس از آسیب، سفتی تاندون آسیب دیده از m/s 1.62 ± 6.00 متغیر بود. در نواحی دیستال و میانی در هفته هشتم، سرعت موج برشی در ناحیه پروگزیمال مشاهده شد. تنها به ۶۵ درصد از مقدار مقابل در هفته ۱۲ بهبود یافت.
9	Stephan J Breda et al. (22)	Decreasing patellar tendon stiffness during exercise therapy for patellar tendinopathy is associated with better outcome	۷۶ ورزشکاران مبتلا به تاندونوپاتی کشکک (۵۸ مرد، میانگین سنی ۴ ± ۲۴ سال)	آزمودنی‌ها حداقل سه بار در هفته ورزش‌های بارگذاری تاندون را انجام می‌دادند. تاندینوپاتی کشکک از با سونوگرافی تأیید شد. سفتی تاندون با استفاده از الاستوگرافی موج برشی ارزیابی شد. پیامد بالینی با استفاده از پرسش‌نامه (VISA-P؛ محدوده ۰- ۱۰۰) ارزیابی شد: هر دو در ابتدا، ۱۲ و ۲۴ هفته.	سونوگرافی الاستوگرافی موج برشی پرسشنامه VISA-P	هیچ ارتباطی بین سفتی پایه و VISA-P پس از ۲۴ هفته یافت نشد (۰.۵۲ = P). کاهش سفتی (اختلاف میانگین تعدیل شده = ۱۰ کیلو پاسکال (۹۵٪ فاصله اطمینان (CI: 4-15)) به‌طور درخورتوجهی با بهبود نتیجه بالینی در ۱۲ هفته در همه ورزشکاران (p=۰.۰۲) و در ورزشکارانی تمرین درمانی

جدول ۱- فرم استخراج داده‌های پژوهش

Table 1- Research data extraction form

ردیف	نویسنده	عنوان	ازمودنی ها	روش	ابزار	نتایج پژوهش
						با بارگذاری پیشرونده تاندون هر دو هفته ۱۲ و ۲۴ (p=۰.۰۱) در ارتباط بود.
10	C. M. Waugh et al. (23)	Substantial Achilles adaptation following strength training has no impact on tendon function during walking	۱۴نفر (۷مرد، ۷.۹±۳۰.۱سال، وزن ۶.۰±۸۳.۲ کیلوگرم، قد ۱۸۱.۹±۵.۸ و ۷زن ۲۹.۹±۵.۲ سال، وزن ۷.۲±۶۱.۳ کیلوگرم، قد ۷.۵±۱۶۴.۵)	قبل و بعد از مداخله، شرکت‌کنندگان با سرعت دلخواه خود روی یک تردمیل با ابزار کامل راه می‌رفتند. سینماتیک حرکت، سینتیک و جابجایی محل اتصال عضله-تاندون گاستروکنمیوس مدیالیس به طور هم‌زمان ثبت شد.	تصویربرداری حرکتی سه بعدی و تصویربرداری اولتراسوند	تغییرات در کینماتیک مفاصل، کشیدگی تاندون، سرعت، کار و قدرت و فعالیت عضلانی در طول مرحله ایستادن، همگی نبود تغییر در پاسخ به مداخله را نشان دادند و اینکه افزایش درخورتوجه در سفتی AT بر عملکرد تاندون در طول راه رفتن تأثیر ندارد.

نتایج

مداخلات تمرینی و سفتی، سطح مقطع، مدول AT

ورزش کوتاه‌مدت تا یک هفته باعث کاهش سطح مقطع، سفتی، مدول و مدول دینامیک تاندون آشیل می‌شود. درمقابل، هشت هفته ورزش روزانه باعث افزایش سفتی، مدول و مدول دینامیک تاندون و یک جلسه ورزش موجب افزایش سفتی تاندون می‌شود. پس از ۴۸ ساعت بهبودی، ورزش کوتاه‌مدت تا یک هفته باعث کاهش سطح مقطع سفتی، مدول و مدول دینامیک تاندون آشیل می‌شود. همچنین هشت هفته ورزش روزانه موجب افزایش سفتی، مدول و مدول دینامیک تاندون می‌شود. این مطالعه پاسخ تاندون آشیل به تمرینات تک و مداوم را برجسته می‌کند (۱۴). به نظر می‌رسد تاندون آشیل، خود را با تمرینات تفریحی منظم با شدت نسبتاً کم سازگار می‌کند (۱۶). با افزایش سن سفتی تاندون آشیل کاهش می‌یابد و سفتی تاندون و نیروی محرکه فشاری هر دو بر هزینه متابولیک راه‌رفتن تأثیر می‌گذارند (۲۰). تغییرات در کینماتیک مفاصل، کشیدگی تاندون، سرعت، کار و قدرت و فعالیت عضلانی در طول مرحله ایستادن، همگی نبود تغییر در پاسخ به مداخله یک دوره تمرین قدرتی را نشان دادند و اینکه افزایش درخورتوجه در سفتی AT بر عملکرد تاندون در طول راه‌رفتن تأثیر ندارد (۲۳).

مداخلات تمرینی و نیروی AT

نیروی AT در فاز اکسنتریک بزرگ نیست و بارگذاری خارجی بر نیرویی که از طریق AT منتقل می‌شود، در حالت نشسته یا ایستاده تأثیر می‌گذارد، اما تأثیر اوج دورسی فلکشن مچ پا بر این نیرو هنگام ایستادن افزایش می‌یابد. پس از تنظیم برای وزن تنه، ایستادن ممکن است همچنان مؤثرتر باشد و باعث افزایش بارگذاری AT در مقایسه با حالت نشسته شود (۱۸).

ارتباط بین سازگاری‌های ساختاری و خواص بالینی

انطباق ساختاری برتر به ویژگی‌های بالینی برتر منجر نخواهد شد. ویژگی‌های مکانیکی و مورفولوژیک AT در گروه مداخله تغییری نمی‌کند و حتی سفتی تاندون در گروه فعال تحت‌درمان کاهش می‌یابد؛ بنابراین محافظت AT از خطر آسیب ناشی از پارگی ممکن است کاهش یابد (۱۵).

تندینوپاتی AT

با مداخلات تمرینی در تندینوپاتی مشخص شد تمام تاندون‌های بهبودیافته دارای سفتی و سطح مقطع بزرگ‌تری بودند. تفاوت معناداری در طول تاندون بین گروه‌های تمرین و کنترل دیده نشد. همچنین تفاوت معناداری در مدول یانگ بین گروه‌ها وجود نداشت (۱۷). قدرت انقباضی عضلات پلانتار فلکسور، سفتی تاندون، میانگین مساحت مقطع عرضی و کشش بیشینه تاندون فقط در گروه تندینوپاتی بهبود یافت که مداخله با بار بالا دریافت کردند، اما سفتی در گروه درمان فعال کاهش و درد افزایش یافت (۱۵). افراد غیردونده و کسانی که بیش از ۴۰ کیلومتر در هفته دویدند، شانس ابتلا به تندینوپاتی در آن‌ها افزایش یافت. زمان شل‌شدن تاندون به‌عنوان شاخص غیرمستقیم ساختار تاندون آشیل، رابطه مثبتی با حداکثر لحظه کشش زانو در حین دویدن دارد (۱۹). همچنین الاستوگرافی موج مشترک (SWE) می‌تواند به‌عنوان یک رویکرد قابل‌اعتماد و به اندازه کافی حساس برای تشخیص ناحیه معیوب در تاندون در نظر گرفته شود و همچنین برای نظارت بر بهبود دوره زمانی سفتی تاندون پس از پارگی مفید باشد (۲۱). کاهش سفتی با بهبود نتایج بالینی در هفته ۱۲ برای تمام ورزشکاران و در هفته‌های ۱۲ و ۲۴ برای ورزشکاران تخصیص‌داده‌شده به درمان ورزشی پیش‌رونده بار تاندون، به‌طور درخورتوجهی مرتبط بود (۲۲).

بحث و نتیجه‌گیری

هدف این مرور سیستماتیک پاسخ به این سؤال بود که تمرینات ورزشی چه تأثیری بر ویژگی‌های بیومکانیکی AT دارد و اینکه ویژگی گزارش شده AT چگونه ممکن است بر توان‌بخشی پس از آسیب AT تأثیر بگذارد. نتایج مطالعه حاضر نشان داد که فواصل زمانی کافی برای ایجاد سازگاری تاندون در هنگام شروع یک دوره تمرینی جدید و اثرات مفید کلی بر تاندون آشیل مهم است (۲۲). به نظر می‌رسد، سفتی تاندون بیشتر به فعالیت‌های ورزشی شامل یک فاز هوایی مانند دویدن و پریدن پاسخ می‌دهد (۱۶). همبستگی‌های معنادار بین سفتی تاندون، متغیرهای کفش طبقه‌بندی‌شده و فعالیت‌های مختلف ATRS، نشان‌دهنده اهمیت بالینی سفتی تاندون و اندازه‌گیری فشار پلانتار پا است. این نتایج نشان می‌دهد که تغییر ساختار آشیل می‌تواند بر فعالیت‌های روزمره بیماران تأثیر بگذارد و نشان می‌دهد که نشانگرهای دیجیتال می‌توانند بازگشت عملکرد را در طول زمان پیگیری کنند (۲۱). شواهد درخورتوجهی وجود دارد که نشان می‌دهد با افزایش سن افراد و کاهش فعالیت بدنی، نیروی محرکه فشاری کاهش می‌یابد. کاهش نیروی محرکه فشاری با توانایی‌های ضعیف‌تر راه‌رفتن مرتبط است (۲۵، ۲۴). دستگاه‌های پوشیدنی و استراتژی‌های توان‌بخشی می‌توانند روی سفتی تاندون و نیروی محرکه فشاری تمرکز کنند تا

افزایش‌های مرتبط با سن در هزینه متابولیک راه رفتن را کاهش دهند (۲۶، ۲۰). تاندون، بافتی پویا است که به‌طور فعال به بارگذاری مکانیکی پاسخ می‌دهد و به‌طور متفاوتی با سطوح مختلف فعالیت سازگار می‌شود (۲۷). ایجاد روش‌های ورزشی مفید و اجتناب از مضرات صدمات ناشی از استفاده بیش از حد و بازتوانی پس از آسیب تاندون آشیل بسیار اهمیت دارد.

پس از آسیب AT تصمیم برای بازگشت به تحمل وزن کامل برای تمرین ورزش یا فعالیت‌های شدید فقط براساس ویژگی‌های بالینی است (۲۱). مداخله با بار بالا تنظیمات مکانیکی و مورفولوژیک درخورتوجهی در واحد عضلات-تاندون پلانتار فلکسور ایجاد می‌کند. این امر ممکن است به حفاظت از تاندون در برابر آسیب ناشی از کشش کمک کند؛ بنابراین مداخله با بار بالا را می‌توان به‌عنوان پروتکل درمانی (جایگزین) مؤثر در مدیریت توان‌بخشی آسیب AT در نظر گرفت (۱۵). برای افزایش اثربخشی بارگذاری AT، در هنگام مداخلات تمرینی تندینوپاتی باید در تمرینات نیروی خارجی به اندازه کافی اعمال شده و در حین حرکت با حداکثر دورسی فلکشن انجام شود. اوج زاویه دورسی فلکشن بر نیروی AT در وضعیت ایستاده با سرعت دو برابر نسبت به یک موقعیت نشسته تأثیر می‌گذارد که نشان می‌دهد ایستادن می‌تواند برای همان بارگذاری خارجی و اوج زاویه دورسی فلکشن مؤثرتر باشد (۱۸). همبستگی‌های چشمگیری بین سفتی تاندون، متغیرهای کفش و فعالیت‌های مختلف و نمره کل پارگی تاندون آشیل وجود دارد که نشان‌دهنده اهمیت بالینی سفتی تاندون و اندازه‌گیری فشار پلانتار پا است. این نتایج نشان می‌دهد که چگونه تغییر ساختار آشیل می‌تواند بر فعالیت‌های روزانه بیماران تأثیر بگذارد و نشانگرهای دیجیتال قادر به پیگیری بهبود عملکرد در طول زمان هستند (۲۱)؛ اما ارزیابی سفتی تاندون آشیل با الاستوگرافی موج برشی به‌عنوان یک ابزار اندازه‌گیری پیش‌بینی‌کننده منفرد، برای پیامد بالینی نامناسب است (۲۲). انتخاب روش‌های ارزیابی در طول دوره درمان و پیگیری اهمیت بسزایی دارد (۲۶، ۲۲).

نتایج مطالعه مروری نشان داد که تاندون بافتی پویا است که به‌طور فعال به بارگذاری‌های مکانیکی پاسخ می‌دهد و به‌طور متفاوتی با سطوح مختلف فعالیت سازگار می‌شود. ایجاد روش‌های ورزشی مفید و بازتوانی پس از آسیب تاندون آشیل بسیار اهمیت دارد.

پیوست- ارزیابی کیفیت با ابزار Modified Minors Score

Appendix- Quality assessment with the Modified Minors Score tool

Author	PRJ	SA	CG	MA	SG	IE	ASA	SOP	BE	Total Score (out of 9)
Mengcun Chen et al.[15]	•	•		•		•	•	•	•	7
Goran Radovanović et al.[18]	•	•	•	•		•	•	•	•	8
Freddy Sichting et al.[19]	•	•	•	•	•	•	•	•	•	9
Abdulhamit Misir et al.[16]	•	•	•	•	•	•	•	•	•	9
Chia-Han Yeh.[23]	•	•	•	•	•	•	•	•	•	9
Daniel Jandacka et al.[24]	•	•	•	•	•	•	•	•	•	9
Richard E. Pimentel et al.[21]	•	•	•			•	•	•	•	7
Didier Laurent et al.[22]	•	•		•	•		•	•	•	7
Stephan J Breda et al.[22]	•	•	•			•	•	•		7
C. M. Waugh et al.[20]	•	•	•	•		•	•	•	•	9

PRJ: مجله بررسی‌شده؛ SA: هدف بیان‌شده؛ CG: گروه‌های مقایسه‌ای؛ MA: ارزیابی نقابدار؛ SG: جنسیت/جنسیت؛ IE: شمول/استخراج؛ ASA: تجزیه و تحلیل آماری کافی؛ SOP: نتایج مشخص‌شده؛ BE: هم‌ارزی پایه.

پیام مقاله

مداخلات ورزشی با بار بالا و مبتنی بر بیومکانیک می‌توانند ساختار و عملکرد تاندون آشیل را به طور مؤثر بهبود بخشند و در صورت ادغام با روش‌های ارزیابی جامع، به‌عنوان استراتژی توانبخشی بهینه برای تاندونوپاتی عمل کنند.

منابع

1. Eslami M, Khezri D, Hoseinnezhad M. The effect of two different types of shoes out soles on the frequency content of the ground reaction force components. Studies in Sport Medicine. 2015;6(16):33-44.
2. Khezri D, Uosef Pour R, Fayyaz Moghar A. The establishment of normative values for lower limbs strength, flexibility and alignment in runners of Mazandaran province. Studies in Sport Medicine. 2019;10(24):69-82.
3. Mehrlatifan S, Fatahi A, Khezri D. Frequency content of ground reaction forces during walking: a comparison in the elderly fallers and non-fallers. Journal of Advanced Sport Technology. 2023;7(1):57-68.
4. Seyedi M, Nobari H, Abbasi H, Khezri D, Oliveira R, Pérez-Gómez J, et al. Effect of four weeks of home-based balance training on the performance in individuals with functional ankle instability: a remote online study. Healthcare. 2021;9(11):1428.
5. Doral MN, Alam M, Bozkurt M, et al. Functional anatomy of the Achilles tendon. Knee Surg Sports Traumatol Arthrosc. 2010;18(5):638-43.
6. Kubo K, Miyazaki D, Tanaka S, Shimoju S, Tsunooda N. Relationship between Achilles tendon properties and foot strike patterns in long-distance runners. J Sports Sci. 2015;33(7):665-9.
7. Kubo K, Kanehisa H, Fukunaga T. Gender differences in the viscoelastic properties of tendon structures. Eur J Appl Physiol. 2003;88(6):520-6.
8. Keuler EM, Loegering IF, Martin JA, Roth JD, Thelen DG. Shear wave predictions of Achilles tendon loading during human walking. Sci Rep. 2019;9(1):1–9.
9. Shokrian F, Khezry D, Matin Homayi H, Fattahi A. Comparing the electrical activity of selected ankle muscles in athletes during landing from different heights. The Scientific Journal of Rehabilitation Medicine. 2000;11(1):98-113.
10. Komi PV. Relevance of in vivo forcemeasurements to human biomechanics. J Biomech. 1990;23(1 Suppl):23–34.
11. Baxter JR, Corrigan P, Hullfish TJ, O'Rourke P, Silbernagel KG. Exercise progression to incrementally load the Achilles tendon. Med Sci Sports Exerc. 2021;53(1):124-130.
12. Page MJ, McKenzie JE, Bossuyt PM, et al. The PRISMA 2020 statement: an updated guideline for reporting systematic reviews. BMJ. 2021;372:n71.
13. Slim K, Nini E, Forestier D, Kwiatkowski F, Panis Y, Chipponi J. Methodological index for non-randomized studies (minors): development and validation of a new instrument. ANZ J Surg. 2003;73(9):712-6.
14. Chen M, Shetye SS, Rooney SI, Soslowsky LJ. Short- and long-term exercise results in a differential achilles tendon mechanical response. J Biomech Eng. 2020;142(8):081011.
15. Radovanović G, Bohm S, Peper KK, Arampatzis A, Legerlotz K. Evidence-based high-loading tendon exercise for 12 weeks leads to increased tendon stiffness and cross-sectional area in achilles tendinopathy: a controlled clinical trial. Sports Med Open. 2022;8(1):149.
16. Sichting F, Kram NC, Legerlotz K. An identical twin study on human achilles tendon adaptation: regular recreational exercise at comparatively low intensities can increase tendon stiffness. Front Physiol. 2022; 12:777403.
17. Misir A, Kizkapan TB, Arikan Y, Akbulut D, Onder M, Yildiz KI, Ozkocer SE. Repair within the first 48 h in the treatment of acute Achilles tendon ruptures achieves the best biomechanical and histological outcomes. Knee Surg Sports Traumatol Arthrosc. 2020 Sep;28(9):2788-97.

18. Yeh CH, Calder JD, Antflick J, Bull AMJ, Kedgley AE. Maximum dorsiflexion increases Achilles tendon force during exercise for midportion Achilles tendinopathy. Scand J Med Sci Sports. 2021 Aug;31(8):1674-1682.
19. Jandacka D, Jandackova VK, Juras V, Vilimek D, Skypala J, Elavsky S, Uchytil J, Monte A, Hamill J. Achilles tendon structure is associated with regular running volume and biomechanics. J Sports Sci. 2023 Mar;41(4):381-390.
20. Pimentel RE, Sawicki GS, Franz JR. Simulations suggest walking with reduced propulsive force would not mitigate the energetic consequences of lower tendon stiffness. PLoS One. 2023 Oct 26;18(10): e0293331.
21. Laurent D, Walsh L, Muaremi A, Beckmann N, Weber E, Chaperon F, Haber H, Goldhahn J, Klauser AS, Blauth M, Schieker M. Relationship between tendon structure, stiffness, gait patterns and patient reported outcomes during the early stages of recovery after an Achilles tendon rupture. Sci Rep. 2020;10(1):20757.
22. Breda SJ, de Vos RJ, Krestin GP, Oei EHG. Decreasing patellar tendon stiffness during exercise therapy for patellar tendinopathy is associated with better outcome. J Sci Med Sport. 2022 May;25(5):372-378.
23. Waugh CM, Scott A. Substantial Achilles adaptation following strength training has no impact on tendon function during walking. PLoS One. 2021;16(7): e0255221.
24. Delabastita T, Bogaerts S, Vanwanseele B. Age-related changes in Achilles tendon stiffness and impact on functional activities: a systematic review and meta-analysis. J. Aging Phys. Act. 2018;27(1):116–27.
25. Stenroth L. et al., Plantarflexor muscle–tendon properties are associated with mobility in healthy older adults. J Gerontol. 2015;70(8): 996–1002.
26. Mehrlatifan S, Fatahi A, Khezri D. Biomechanics of gait in the elderly: a literature review. Asian J Sports Med. 2023;14(2): e135663.
27. Galloway MT, Lalley AL, Shearn JT. The role of mechanical loading in tendon development, maintenance, injury, and repair. J Bone Jt Surg Am. 2013;95(17):1620–8.

پژوهشگاه علوم انسانی و مطالعات فرهنگی
پرتال جامع علوم انسانی