Sport Medicine Studies, 2026, 18(49): 33-57. DOI: 10.22089/smj.2026.18530.1830

Sport Medicine Studies

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

Original Article

Effects of 8 Week Balance Training on Sensory-Motor Function, Balance, and Pain in Wistar Rats with Incomplete Spinal Cord Injury

Mahsa Ofoghi [1], Ziya Fallahmohammadi*[1], Mehdi Gheitasi[2]

1. Department of Sports Physiology, Faculty of Sports Sciences, University of Mazandaran, Babolsar, Iran.
2. Department of Health & Sport Rehabilitation, Faculty of Sport Science & Health, University of Shahid Beheshti, Tehran, Iran.

Received : 28-Oct-2025 | **Accepted: 25-Apr-2026** | **Available: 23-Sep-2026**

*Corresponding Author: Ziya Fallahmohammadi, E-mail: zia-falm@umz.ac.ir

How to Cite: Ofoghi M., Fallah Mohammadi Z., gheitasi M. Effects of 8 Week Balance Training on Sensorimotor Function, Balance, and Pain in Wistar Rats with Incomplete Spinal Cord Injury. Studies in Sport Medicine. 2026;18(49): 33-57. (In Persian). https://doi.org/10.22089/smj.2026.18530.1830

Extended Abstract

Background and Purpose

Incomplete spinal cord injury (iSCI) is one of the most common types of spinal cord injuries, leading to impairments in motor, sensory, and autonomic functions. Unlike complete spinal cord injury, some neural pathways remain intact in iSCI, allowing potential for neural recovery and functional restoration. However, recovery is often incomplete, and patients usually experience persistent deficits in balance, postural control, and pain perception. Targeted interventions, particularly balance training, can play a critical role in neurorehabilitation by stimulating sensory and motor pathways and enhancing neural plasticity. The present study aimed to investigate the effects of eight weeks of balance training on motor function, sensory function, balance, and pain index in Wistar rats with iSCI, based on the hypothesis that gradual balance training could improve motor performance and balance and reduce pain by activating spinal-motor pathways and modulating neuromuscular feedback.

Methods

This semi-experimental study employed a pretest–posttest design with a control group. Thirty male Wistar rats, weighing 200–250 g and aged 6–8 weeks, were obtained from the animal laboratory center. Following spinal cord contusion at the T11–L1 level, rats were randomly assigned to the intervention group (n = 15) or control group (n = 15). The

Copyright: © 2026 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/).

contusion model was induced using a stereotaxic device by dropping a 10-g weight from a height of 2–3 mm.

Balance training was conducted on a Rotarod device, three sessions per week for eight weeks. Training intensity was gradually increased from 5 rpm for 2 minutes in the first week to 20 rpm for 6 minutes in the eighth week, with 1–2 minutes of active rest between repetitions. The control group remained in standard housing conditions without intervention.

Motor function and balance were assessed using the Basso–Beattie–Bresnahan (BBB) test, Rotarod test, and Open Field Test. BBB scores were assigned based on direct observation of hindlimb movements along a defined path (0–21), with higher scores indicating better motor function. In the Rotarod test, the duration the animal remained on the rotating rod before falling was recorded as a measure of postural control and balance. In the Open Field Test, motor activity, line crossings, and exploratory behaviors were measured to evaluate motivation and motor recovery.

Sensory function and pain were assessed using thermal (heat) and cold response tests. Behavioral reactions, including paw licking and withdrawal in response to thermal or cold stimuli, were recorded. A reduction in response latency to heat stimuli indicated improved pain threshold or modulation of pain responses. Data were analyzed using paired t-tests for within-group comparisons and analysis of covariance (ANCOVA) for between-group comparisons, with significance set at $p < 0.05$

Results

Table 1 - Results of the Covariance Test to Investigate the Effect of Balance Training on Sensory-Motor Function, Balance, and Pain

P-Value	F	Mean Square	Degrees of Freedom	Source of changes	Factor
.970	.001	.525	1	Pre-test	**foot licking**
.115	2.565	901.356	1	Group	
.688	.168	36.130	1	Pre-test	**foot withdrawal**
.878	.132	28.274	1	Group	
.013	8.202	244.508	1	Pre-test	**open box test**
.002	10.042	299.334	1	Group	
.335	1.004	1.544	1	Pre-test	**heat test**
.000	30.696	47.185	1	Group	

Eight weeks of balance training significantly improved BBB scores and Rotarod performance compared to controls ($p < 0.05$). Rats in the intervention group remained on the Rotarod for longer durations, and their activity indices in the Open Field Test were increased. These findings indicate enhanced neuromuscular coordination and partial restoration of spinal-motor pathways due to

training. Furthermore, response latency in the heat pain test was significantly reduced ($p < 0.001$), suggesting modulation of central pain responses. However, changes in sensory function indicators (paw licking or withdrawal) were not statistically significant ($p > 0.05$).

Conclusion

Given that eight weeks of balance training significantly improved motor function and balance and reduced pain in rats with iSCI, the study recommends incorporating such training into rehabilitation programs following spinal cord injury.

Key Words: Spinal Cord Injury, Balance Training, Rotarod, Sensorimotor Function, Pain, Wistar Rat

Article Message

Given that balance training for eight weeks significantly improved motor function and balance, as well as reduced pain index in rats with incomplete spinal cord injury, it is recommended that this type of training be used in rehabilitation programs after spinal cord injury..

Ethical Considerations

This study was conducted in accordance with the ethical principles for animal research and based on the Guide for the Care and Use of Laboratory Animals (NIH). In addition, the research protocol was approved by the Ethics Committee of the University of Mazandaran. https://ethics.research.ac.ir/IR.UMZ.REC.1403.107

Authors' Contributions

In this study, the first author was responsible for study design, literature review, implementation of the research procedures, data collection, analysis and interpretation of the results, and preparation of the initial manuscript draft. The second author, as the corresponding author, was responsible for the scientific supervision and guidance of all stages of the research, as well as the critical revision and final editing of the manuscript. The third author also contributed to scientific consultation, content revision, and manuscript editing.

Conflict of Interest

According to the authors, this article has no conflict of interest.

Acknowledgments

The authors would like to sincerely thank and appreciate the valuable efforts and cooperation of the laboratory staff at Shahid Beheshti University for their assistance in carrying out the various stages of this research.

پژوهش در ورزش زنان، تابستان ۱۴۰۵، دوره 18، شماره 49، صص ۳۳-۵۷ DOI: 10.22089/smj.2026.18530.1830

Sport Medicine Studies

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

مقاله پژوهشی

تأثیر هشت هفته تمرینات تعادلی بر عملکرد حسی–حرکتی، تعادل و درد در رت‌های صحرایی مبتلا به ضایعه نخاعی ناکامل

مهسا افقی[۱]، ضیاء فلاح محمدی*[۱]، مهدی قیطاسی[۲]

۱. گروه فیزیولوژی ورزشی، دانشکده علوم ورزشی، دانشگاه مازندران، بابلسر، ایران.

۲. گروه تندرستی و بازتوانی در ورزش، دانشکده علوم ورزشی و تندرستی، دانشگاه شهید بهشتی، تهران، ایران.

تاریخ دریافت: ۱۴۰۴/۰۸/۰۶ | تاریخ پذیرش: ۱۴۰۵/۰۵/۰۲ | تاریخ انتشار آنلاین: ۱۴۰۵/۰۷/۰۱

*نویسنده مسئول: ضیاء فلاح محمدی، ایمیل: zia-falm@umz.ac.ir

How to Cite: Ofoghi M., Fallah Mohammadi Z., gheitasi M. Effects of 8 Week Balance Training on Sensorimotor Function, Balance, and Pain in Wistar Rats with Incomplete Spinal Cord Injury. Studies in Sport Medicine. 2026;18(49): 33-57. (In Persian). https://doi.org/10.22089/smj.2026.18530.1830

چکیده

هدف: ضایعه نخاعی ناکامل باعث اختلالات حسی، حرکتی و کاهش تعادل می‌شود که بر کیفیت زندگی تأثیر می‌گذارد. تمرینات تعادلی ممکن است با تحریک بازسازی عصبی و بهبود هماهنگی عصبی-عضلانی، عملکرد حسی-حرکتی، تعادل و کنترل درد را بهبود بخشند. هدف این پژوهش بررسی تأثیر هشت هفته تمرینات تعادلی بر عملکرد حسی-حرکتی، تعادل و درد در رت‌های صحرایی مبتلا به ضایعه نخاعی ناکامل بود.

مواد و روش‌ها: این پژوهش نیمه‌تجربی با طرح پیش‌آزمون-پس‌آزمون و گروه کنترل انجام شد. تعداد ۳۰ رت نر ویستار پس از ایجاد ضایعه نخاعی ناکامل به دو گروه تقسیم شدند. گروه مداخله سه جلسه در هفته به مدت هشت هفته تحت پروتکل تمرین روی دستگاه روتارود با افزایش تدریجی سرعت و زمان قرار گرفت. عملکرد حرکتی و تعادل با تست BBB، روتارود و جعبه باز و عملکرد حسی و درد با تست حس سرما و گرما ارزیابی شد. تحلیل آماری با آزمون‌های تی زوجی و آنالیز کوواریانس انجام شد. نتایج نشان داد، تمرینات تعادلی موجب بهبود معنادار عملکرد حرکتی و تعادل ($P<۰/۰۵$) و کاهش زمان واکنش در تست درد گرما ($P<۰/۰۰۱$) شد، اما تغییر معناداری در شاخص‌های عملکرد حسی (لیسیدن پا و عقب‌کشیدن پا) مشاهده نشد ($P>۰/۰۵$).

نتیجه‌گیری: نتیجه‌گیری می‌شود، پروتکل هشت‌هفته‌ای تمرین تعادلی باعث بهبود عملکرد حرکتی، تعادل و کاهش شاخص درد شد، اما تأثیر درخورتوجهی بر عملکرد حسی نداشت. این نتایج نشان‌دهنده ارزش تمرین تعادلی به عنوان مداخله توان‌بخشی در مدل حیوانی ضایعه نخاعی هستند .

واژگان کلیدی: ضایعه نخاعی، تمرین تعادلی، روتارود، عملکرد حسی - حرکتی، درد، رت ویستار

Copyright: © 2026 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

آسیب ضایعه نخاعی[1] آسیب پیچیده و تضعیف‌کننده دستگاه عصبی مرکزی است که با اختلالات گسترده حسی و حرکتی، کاهش توانایی انجام فعالیت‌های روزمره و افت کیفیت زندگی همراه است. (۱). در سال ۲۰۱۹، تخمین زده شد که در سطح جهان ۹۰۰۰۰۰ مورد جدید ضایعه نخاعی وجود دارد که درمجموع شامل ۲۰/۶ میلیون نفر با این بیماری زندگی می‌کنند و ۶/۲ میلیون نفر دچار معلولیت‌های ناشی از آن هستند (۲). میزان بروز آسیب نخاعی در حال افزایش است و به دلیل مشکلات زیاد آن، بار اقتصادی زیادی را بر سیستم‌های بالینی و اجتماعی وارد می‌کند (۴، ۳). پس از آسیب نخاعی، نورون‌ها به طور جدی آسیب می‌بینند و ایجاد ارتباطات ساختاری حسی یا عملکردی مؤثر برای آن‌ها دشوار می‌شود (۵). در این آسیب، آکسون‌ها آسیب می‌بینند و میلین‌زدایی می‌شوند، برخی از نورون‌ها در ناحیه آسیب دیده از بین می‌روند و نوروژنز درون‌زا محدود می‌شود (۶). در همین راستا، پایداری اختلالات عملکردی را می‌توان حداقل تاحدی به توانایی محدود نورون‌های آسیب‌دیده CNS در بازسازی آکسون‌ها و برقراری مجدد ارتباطات عملکردی نسبت داد (۷). این امر به دلیل ترکیبی از عوامل ازجمله فقدان پتانسیل بازسازی ذاتی نورون‌ها و تأثیر عوامل بیرونی است (۸).

پیشرفت‌های جراحی و دارویی زیادی انجام شده است، اما بازگرداندن کامل عملکرد حسی–حرکتی پس از آسیب ضایعه نخاعی همچنان محدود است؛ بنابراین مداخلات توان‌بخشی غیردارویی، به‌ویژه برنامه‌های تمرینی هدفمند به‌عنوان رویکردهایی با پتانسیل زیاد بازیابی عملکرد و کاهش درد نوروپاتیک مدنظر قرار گرفته‌اند. پژوهش‌های پیش‌بالینی و بالینی نشان می‌دهند که انواع تمرین (داوطلبانه یا اجباری، با شدت و دوزهای مختلف) می‌تواند بر بازیابی عملکرد و کاهش علامت‌های درد مؤثر باشد، اگرچه اثرات وابسته به پارامترهای پروتکل (مانند زمان شروع تمرین پس از آسیب، شدت، فراوانی و نوع تمرین) متغیر است (۱۰، ۹).

در میان مداخلات فیزیکی، تمرینات تعادلی به‌دلیل نقشِ مستقیمشان در بهبود کنترل پاسچر، هماهنگی حسی-حرکتی و تقویت بازخوردهای حس عمقی و دهلیزی، به‌عنوان راهبردی مناسب برای بهبود عملکرد حرکتی و پایداری مطرح شده‌اند (۱۱). مطالعات اخیر روی بیماران و مدل‌های حیوانی نشان می‌دهند که مداخلات تمرینی هدفمند می‌توانند توانایی‌های تعادلی و عملکردی را بهبود بخشند، تمرینات تعادلی به‌ویژه به دلیل فعال‌سازی هم‌زمان سیستم‌های حسی عمقی، دهلیزی و حرکتی، بهبود هماهنگی عصبی_عضلانی و افزایش کنترل پاسچر، به‌عنوان یکی از روش‌های مؤثر توان‌بخشی پس از ضایعه نخاعی مطرح شده‌اند؛ هرچند هنوز شواهد نسبتاً پراکنده بوده و نیاز به کارهای کنترل‌شده بیشتر است (۱۳، ۱۱). در همین راستا، لیو[2] و همکاران نشان دادند که تمرینات مهارتی و تعادلی روی نردبان افقی به مدت شش هفته در موش‌های دارای آسیب یک‌طرفه نخاعی، موجب بهبود معنادار عملکرد حرکتی نسبت به گروه کنترل می‌شود (۱۳). در حالی که برخی مطالعات بر نقش مثبت تمرینات هدفمند و مهارتی در تسهیل پلاستیسیته عصبی پس از آسیب نخاعی تأکید دارند، شواهدی نیز وجود دارد که نشان می‌دهد نوع، شدت و زمان‌بندی تمرین می‌تواند نتایج متفاوت و حتی معکوس ایجاد کند. دنگ[3] و همکاران نشان دادند که تمرین روتارود در فاز اولیه پس از آسیب نخاعی (از روز ۷ تا ۳۵، روزانه شش جلسه پنج دقیقه‌ای با افزایش سرعت تا ۴۰ دور در دقیقه) در موش‌های دارای آسیب یک‌طرفه نخاعی، موجب اختلال در بهبود عملکرد حرکتی و ترمیم بافتی می‌شود (۱۴). این اثر

1 Spinal Cord Injury (SCI)
2. Liu
3. Deng

منفی تمرین زودهنگام را به اعمال شدت زیاد تمرین در فاز حاد التهاب پس از آسیب نخاعی و اختلال در ترمیم بافتی نسبت داده‌اند. درمقابل آنگر[1] و همکاران در یک پژوهش کیفی، تجربه افراد مبتلا به ضایعه نخاعی ناکامل از شرکت در یک برنامه تمرین تعادلی فشرده را بررسی کردند. نتایج نشان داد که این تمرین‌ها علاوه‌بر بهبود تعادل و عملکرد حرکتی، موجب افزایش اعتمادبه‌نفس، انگیزه و احساس کنترل بر حرکت در شرکت‌کنندگان شده است (۱۵).

در مطالعات پیش‌بالینی، آزمون روتارود[2] به‌عنوان ابزاری استاندارد برای سنجش تعادل، یادگیری حرکتی و عملکرد حرکتی در مدل‌های رت استفاده می‌شود و مطالعات اخیر روش‌شناسی این آزمون را بازتعریف کرده‌اند تا حساسیت و قابلیت تکرار آن افزایش یابد (۱۲). زمان آغاز تمرین پس از آسیب نیز می‌تواند تعیین‌کننده نتایج باشد. تمرین زودهنگام روتارود ممکن است ترمیم بافتی را تحت‌تأثیر قرار دهد؛ بنابراین طراحی دقیق پروتکل بسیار مهم است (۱۴). با وجود این یافته‌ها، هنوز خلأ علمی مهمی وجود دارد که ضرورت انجام این پژوهش را برجسته می‌کند. نخست، نبود توافق بر پارامترهای بهینه تمرین تعادلی شامل طول دوره، شدت، فراوانی و زمان شروع تمرین در مدل‌های حیوانی ضایعه نخاعی ناکامل است؛ دوم، کمبود مطالعاتی که اثر تمرین تعادلی را هم‌زمان بر عملکرد حسی، عملکرد حرکتی، تعادل و درد بررسی کنند؛ سوم، ناکافی بودن داده‌ها درباره اثرات طولانی‌مدت تمرینات تعادلی و تعامل آن‌ها با پلاستیسیتی عصبی و بازسازی بافت نخاعی (۱۳، ۱۲، ۱۰، ۹). با توجه به این شکاف‌ها، بررسی اثر تمرینات تعادلی به مدت هشت هفته بر عملکرد حسی-حرکتی، تعادل و درد در رت‌های صحرایی مبتلا به ضایعه نخاعی ناکامل اهمیت ویژه‌ای دارد.

این پژوهش با هدف بررسی تأثیر هشت هفته تمرینات تعادلی هدفمند بر عملکرد حسی-حرکتی، تعادل و درد در رت‌های صحرایی مبتلا به ضایعه نخاعی ناکامل طراحی شده است. اهمیت این پژوهش از آنجا ناشی می‌شود که توان‌بخشی پس از ضایعه نخاعی ناکامل هنوز با چالش‌های چندجانبه‌ای ازجمله اختلالات هم‌زمان حرکتی و حسی مواجه است و شواهد پیش‌بالینی کمی وجود دارد که اثر تمرینات تعادلی هدفمند بر بازتوانی چندبعدی و کاهش درد را به طور جامع ارزیابی کرده باشد. نوآوری این پژوهش در ادغام تمرینات تعادلی با ارزیابی دقیق و استاندارد عملکرد حرکتی و حسی (BBB، روتارود، جعبه باز و تست‌های حسی-درد) نهفته است که امکان شناسایی دقیق مکانیسم‌های فعال‌سازی هم‌زمان مسیرهای عصبی حرکتی و حسی و تأثیر آن بر بازتوانی را فراهم می‌کند. نتایج این پژوهش می‌تواند چارچوب علمی و عملی برای طراحی پروتکل‌های توان‌بخشی هدفمند، شواهدمحور و شخصی سازی شده در بیماران انسانی ارائه دهد و نقش کلیدی در ارتقای کیفیت زندگی و کارآمدی مداخلات بازتوانی عصبی ایفا کند. همچنین نتایج قابل‌اتکایی در زمینه بازتوانی پس از ضایعه نخاعی ارائه خواهد کرد و شکاف‌های علمی موجود در مطالعات پیشین را پوشش می‌دهد.

روش پژوهش

این پژوهش نیمه‌تجربی به صورت پیش‌آزمون-پس‌آزمون با گروه کنترل انجام شد. درمجموع، ۳۰ رت نر ویستار با وزن ۲۰۰-۲۵۰ گرم و سن شش تا هشت هفته از مرکز حیوانات آزمایشگاهی رازی تهیه شدند. حیوانات به صورت تصادفی با استفاده از جدول اعداد تصادفی به دو گروه مداخله (۱۵ رت) و کنترل (۱۵ رت) تخصیص یافتند؛ به طوری که وزن و سن میانگین گروه‌ها متوازن بود. ارزیابی‌ها توسط فردی که از گروه‌ها بی‌اطلاع بودند، انجام شد. پس از ایجاد آسیب ضایعه نخاعی، به هشت رت در گروه کنترل و هفت رت در گروه تمرین ضایعه نخاعی کاهش یافتند. کاهش رت‌ها به

1. Unger
2. Rotarod Test

دلیل تغییرات رفتاری ناشی از آسیب، کاهش انگیزش حرکتی و بروز رفتارهای شبه‌افسردگی بود که از پژوهش حذف شدند. این عوامل، محدودیت ذاتی مدل‌های حیوانی ضایعه نخاعی محسوب می‌شوند که در مطالعات مشابه نیز گزارش شده‌اند؛ با این حال، داده‌های باقی‌مانده همچنان توان آماری کافی برای شناسایی تفاوت‌های معنادار بین گروه‌ها را فراهم کرده و روند یافته‌ها با ادبیات موجود هم‌راستا است؛ درنتیجه هشت رت در گروه کنترل و هفت رت در گروه مداخله باقی ماندند. شرایط نگهداری شامل دمای ۲۵-۲۲ درجه سانتی‌گراد، چرخه روشنایی/تاریکی ۱۲/۱۲ ساعت، رطوبت نسبی ۵۰ درصد و دسترسی آزاد به آب و غذای استاندارد بود. همه مراحل پژوهش مطابق دستورالعمل کمیته اخلاق در پژوهش‌های حیوانی دانشگاه و اصول راهنمای مراقبت و استفاده از حیوانات آزمایشگاهی (NIH) انجام شد (۱۸-۱۶).

روش اجرای جراحی

برای القای ضایعه نخاعی ناکامل، از مدل کوفتگی کانتوژن[1] استفاده شد. ابتدا حیوانات با کتامین و زایلازین به‌ترتیب با دوزهای ۷۵ و ۱۴ میلی‌گرم بر کیلوگرم وزن بدن و به صورت داخل صفاقی بی‌هوش شدند که با نبود رفلکس نیشگون گرفتن از دم و پنجه تأیید شد. پس از انجام تریکوتومی و اقدامات آسپتیک، حیوانات تحت عمل جراحی قرار گرفتند. ستون فقرات موش‌ها ثابت شد و پس از شیو محل جراحی، یک برش طولی در خط وسط و پشت بدن حیوان و در طول مهره‌های L1-T11 ایجاد و پوست و فاشیای سطحی کنار زده شد تا فاشیای عمقی و عضلات مجاور مهره‌ای نمایان شود. این مرحله با دقت زیادی انجام می‌شود تا احتمال خون‌ریزی و آسیب به بافت‌های زیرین به حداقل برسد و فرایند بهبودی پس از جراحی سریع‌تر حاصل شود. زائده خاری مهره L1-T11 با استفاده از Rongeur کوچکی برداشته شد و به کمک دریل با دور چرخش زیاد، لامینای مهره نازک می‌شود. سر دریل با فشار ملایم رو به بالا و پایین حرکت داده شد، تا زمانی که طناب نخاعی و عروق اطراف آن از زیر لامینای نازک شده مشاهده شود. سپس موش‌ها در موقعیت مناسب ضربه‌گیر قرار خواهند گرفت تا میله ۱۰ گرمی آزادانه از ارتفاع سه سانتی‌متری رها شده و به مرکز سطح T۱۱ نخاع برخورد کند. نشانه‌های تأیید موفقیت‌آمیز مدل، ظهور اکستنشن اندام عقبی و رفلکس تکان دادن دم در موش‌ها است. سپس عضلات و پوست به صورت لایه‌ای بخیه می‌شوند. درمان پس از عمل شامل درمان آنتی‌بیوتیکی (Pencivet) به صورت عضلانی برای حیوانات است. حیوانات در یک جعبه مناسب قرار داده می‌شوند و در اتاقی با تهویه مطبوع برای بهبودی پس از جراحی قرار می‌گیرند. سلامت عمومی همه حیوانات برر سی می شود و مثانه و روده به صورت دستی دو بار در روز تا زمان بازگشت به حالت طبیعی ادرار، تخلیه می شود. درخصوص مراقبت‌های پس از عمل جراحی پس از حصول هوشیاری، حیوان به قفس حیوانات منتقل شده و در دمای ۲۵ درجه سانتی‌گراد نگهداری می شود. آب و غذا به مقدار کافی در دسترس حیوان قرار داده می شود و داروی مسکن استامینوفن به میزان mg/ml ۲-۱ به صورت خوراکی و سرم نرمال سالین به میزان ml ۵ به صورت داخل صفاقی برای پیشگیری از دهیدراته شدن پس از جراحی، استفاده می‌شود. یک روز پیش از عمل و تا دو روز بعد از عمل تزریق زیرجلدی آنتی‌بیوتیک جنتامایسن به میزان mg/kg ۱۵ انجام می‌شود تا عفونت‌های ناشی از عمل محل جراحی سیستم عصبی مرکزی و دستگاه اداری به حداقل برسد. پس از طی کردن دوره نقاهت با استفاده از تست‌های مدنظر (BBB) از اختلال در حس و حرکت و وجود درد باید اطمینان پیدا کرد و میزان شدت آن‌ها لازم است به صورت مجزا یادداشت شود (۱۹).

پروتکل تمرین تعادلی

1. Contusion

تمرین تعادلی با استفاده از دستگاه روتارود انجام شد. حیوانات گروه مداخله سه جلسه در هفته و به مدت هشت هفته تحت تمرین قرار گرفتند. پروتکل تمرین شامل قرار گرفتن روی میله چرخنده بود که به‌تدریج شدت آن افزایش می‌یافت: هفته اول در هر جلسه سه مرتبه با سرعت اولیه پنج دور در دقیقه به مدت دو دقیقه قرار گرفتند؛ در هفته دوم در هر جلسه سه مرتبه با سرعت پنج دور در دقیقه به مدت سه دقیقه؛ در هفته‌های سوم و چهارم در هر جلسه چهار مرتبه و با سرعت ده دور در دقیقه به مدت چهار دقیقه؛ در هفته‌های پنجم و ششم در هر جلسه پنج مرتبه و هر مرتبه ده دور در دقیقه به مدت پنج دقیقه؛ در هفته‌های هفتم و هشتم (پایانی) در هر جلسه پنج مرتبه و هر مرتبه پانزده دور در دقیقه به مدت شش دقیقه روی نوار گردان قرار گرفتند (جدول ۱).

جدول ۱- پروتکل تمرین تعادلی

Table 1- Balance training protocol

نوع استراحت Type of rest	مدت استراحت Rest period (دقیقه)	سرعت Speed (دور در دقیقه)	تعداد دفعات Number of times	مدت‌زمان Time (دقیقه)	هفته Week
فعال Active	2	5	3	2	اول First
فعال Active	2	5	3	3	دوم Second
فعال Active	2	10	4	4	سوم Third
فعال Active	1.30	10	4	4	چهارم Fourth
فعال Active	1.30	10	5	5	پنجم Fifth
فعال Active	1.30	10	5	5	ششم Sixth
فعال Active	1	15	5	6	هفتم Seventh
فعال Active	1	15	5	6	هشتم Eighth

ابزارهای ارزیابی

۱. ارزیابی عملکرد حرکتی و تعادل

الف) تست رفتار حرکتی (بازو- بتی- برسنان)[1]BBB: در سال ۱۹۹۵ این مقیاس به منظور استاندارد کردن سنجش رفتار حرکتی در ابزار جعبه باز، توسط سه محقق به نام‌های بازو، بتی و برسنان طراحی شد که به عنوان تستی معتبر در سراسر دنیا استفاده می‌شود. این آزمون می‌تواند حتی پیشرفت‌های کوچک حرکتی را تعیین کند. تا سال ۱۹۹۶ این تست برای صدمات خفیف و متوسط استفاده می شد، اما اکنون در آسیب‌های شدید هم به کار می‌رود؛ البته بررسی دقیق هماهنگی اندام‌های قدامی و خلفی نسبتاً مشکل است. عمده کاربرد این روش برای ارزیابی انواع حرکات اندام خلفی است. درواقع، تست رفتار حرکت یک تست بهبودیافته (open field) است. بهترین زمان سنجش این تست

1. Basso, Beattie and Bresnahan (BBB)

معمولاً بعد از گذشت دو روز از القای آسیب نخاعی، به‌منظور بررسی وضعیت حرکتی رت‌های آسیب‌دیده است. مقیاس از صفر تا ۲۱ است؛ به طوری که نمره کمتر نشان‌دهنده اختلال و آسیب بیشتر در وضعیت حرکتی حیوان است و ترکیبی از حرکت مفاصل موش، حرکات اندام عقبی، قدم برداشتن، هماهنگی حرکات اندام‌ها، موقعیت و ثبات تنه، قرار دادن پنجه و موقعیت دم را دسته‌بندی می‌کند. سپس هر موش بسته به نمره خود به یکی از سه دسته اختصاص می‌یابد: ۱. مراحل اولیه (نمره صفر تا ۷): شامل حرکات مفصلی جداگانه با حرکت اندام پشتی؛ ۲. مرحله متوسط (نمره ۱۳-۸): فاصله قدم‌های هماهنگ؛ ۳. اواخر مرحله (امتیاز ۱۴-۲۱): هماهنگی عضلات جلو و عقب (۲۰).

ب) تست جعبه باز: تست ارزیابی حرکت یا آزمون جعبه باز در سال ۱۹۵۴ توسط تارلو- کلینگر برای موش صحرایی طراحی شد که بیشتر در آسیب‌های نخاعی کاربرد دارد. این آزمون برای بررسی هماهنگی اندام‌ها و رفتار اضطرابی و همچنین ارزیابی اثر داروهای درمانی بر رفتارهای شبه‌اضطرابی در جوندگان و رفتار کاوشگرانه پس از SCI سینه‌ای و بررسی تحرک اندام خلفی استفاده می‌شود (۲۱). آزمون جعبه‌باز یک جعبه پلکسی گلاس به ابعاد ۶۰*۶۰ سانتی است که برای بررسی تحرک حیوان و همچنین اضطراب بعد از SCI و رفتار کاوشگرانه به کار گرفته می‌شود. کف ظرف شامل تقسیم بندهای ۱۲*۱۲ سانتی‌متر است. موش صحرایی در مرکز این قسمت‌ها قرار می‌گیرد و تعداد بخش‌های پیموده شده محاسبه می‌شود (۲۲).

تست روتارود: علاوه‌بر نقش تمرینی، تست روتارود برای ارزیابی تعادل و هماهنگی حرکتی موش‌ها به کار گرفته شد. حیوانات روی یک میله استوانه‌ای افقی قرار گرفتند که می‌تواند با سرعت قابل‌تنظیم بچرخد. پروتکل آزمون به این صورت بود که سرعت میله از پنج دور در دقیقه آغاز شد و به تدریج تا بیست دور در دقیقه افزایش یافت تا ظرفیت تعادلی و هماهنگی حرکتی حیوانات در مواجهه با چالش‌های حرکتی بررسی شود. زمان باقی ماندن حیوان روی میله قبل از سقوط ثبت شد و این مقدار به‌عنوان شاخص عملکرد تعادلی حیوان استفاده شد. هر حیوان چندین بار آزمون شد و میانگین مقادیر برای تحلیل داده‌ها محاسبه شد. این روش امکان سنجش دقیق تغییرات عملکردی پس از آسیب نخاعی و ارزیابی اثر تمرینات تعادلی را فراهم می‌کند (۲۳).

۲. ارزیابی عملکرد حسی و درد

تست سرما: برای انجام آزمون، ابتدا موهای پوست پای رت تراشیده می‌شود. برای انجام تست آزمون سرما حیوان را در یک محفظه شفاف روی شبکه میله‌ای قرار داده شده و توسط سرنگ، قطره‌ای استون به کف پای او پاشیده می‌شود. در صورت ایجاد پاسخ، مثبت (عقب کشیدن پا و لیسیدن پا) و در صورت نبود پاسخ، منفی در نظر گرفته می شود. این عمل پنج بار تکرار می‌شود و تعداد پاسخ‌های مثبت به صورت درصد بیان می‌شود.(۲۶-۲۴)؛

نحوه اندازه‌گیری درد (تست گرما): در گذشته برای انجام تست گرما از تحریک دم رت استفاده می‌شد؛ بدین ترتیب که زیر دم حیوان شعله تنظیم‌شده حرارت گذاشته می‌شد و حیوان به محض حس درد و سوزش تکان ناگهانی در دم ایجاد می‌کرد، اما امروز از صفحه حرارتی استفاده می‌شود. دستگاه صفحه حرارتی متشکل از یک صفحه آلومینیومی گرم است که دمای آن توسط یک حسگر دما و یک کنترل‌کننده دیجیتال دما در بازه دمای محیط الی ۶۵ درجه سانتی‌گراد قابل‌تعیین است. روش آزمون به این ترتیب است که ابتدا دستگاه را روشن می‌کنیم و ترموستات آن را روی دمای ۲ ±۵۰ قرار می‌دهیم. صفحه حرارتی دستگاه شروع به گرم شدن می‌کند تا اینکه به دمای تنظیم شده می‌رسد. در این

زمان حیوان را روی پلیت دستگاه قرار می‌دهیم و تایمر را استارت می‌کنیم. دیواره شیشه‌ای دستگاه در عین حالی که مانع از فرار حیوان از سطح پلیت می‌شود، به ما کمک می‌کند تا واکنش‌های حیوان را بررسی کنیم. به محض اینکه عکس‌العمل حیوان (مثلاً پریدن یا لیسیدن پنجه) مبنی بر احساس درد و مقاومت نکردن حیوان بر آن درد را مشاهده کردیم، تایمر را استوپ می‌کنیم. عددی را که تایمر به ما نمایش می‌دهد، شاخص میزان مقاومت حیوان بر درد ناشی از دمای تنظیم شده است. میزان تأخیر در این پاسخ به‌عنوان شدت آسیب تلقی می شود. در صورتی که حیوان پاسخی نشان نداد، نتیجه آزمون منفی در نظر گرفته می‌شود. زمان قطع حرارت ۳۰ ثانیه است. این زمان در صورت پاسخ ندادن حیوان هم اعمال می‌شود تا از سوختگی پوست جلوگیری شود (۲۹-۲۷).

تجزیه و تحلیل آماری

تجزیه و تحلیل داده‌ها با استفاده از نرم‌افزار SPSS نسخه ۲۶ انجام شد. نرمال بودن توزیع داده‌ها با آزمون کلموگروف-اسمیرنف بررسی شد. برای مقایسه تغییرات درون‌گروهی از آزمون تی زوجی و برای مقایسه بین گروه‌ها از تحلیل کوواریانس (ANCOVA) با کنترل اثر پیش‌آزمون استفاده شد. سطح معناداری P<۰/۰۵ در نظر گرفته شد.

نتایج

وزن رت‌ها به صورت کلی در قالب میانگین و انحراف معیار در جدول (۲) ارائه شده است.

جدول ۲- ویژگی وزن رت‌های پژوهش به تفکیک گروه‌ها
Table 2- Weight characteristics of research rats by group

متغیر Variable	تعداد Number	وزن پیش‌آزمون (گرم) Pre-test weight (gr)	وزن پس‌آزمون (گرم) Post-test weight (gr)
گروه تمرین تعادلی Balance training group	7	252.00±7.74	264.00±7.79
گروه کنترل Control group	8	253.40±10.38	215.60±19.60

همان طور که در جدول (۲) مشاهده می شود، میانگین وزن بدن موش‌ها در ابتدای پژوهش بین گروه تمرین تعادلی و گروه کنترل تفاوت محسوسی نداشت. میانگین وزن رت‌ها در گروه تمرین تعادلی طی هشت هفته افزایش یافت (۲۵۲ ± ۷۴/۷ گرم در پیش‌آزمون به ۲۶۴ ± ۷۹/۷ گرم در پس‌آزمون)؛ در حالی که در گروه کنترل کاهش وزن مشاهده شد (۴۰/۲۵۳ ± ۳۸/۱۰ گرم به ۶۰/۲۱۵ ± ۶۰/۱۹ گرم). این تغییرات از نظر آماری معنادار نبود (P>۰/۰۵)، اما نشان می‌دهد که تمرینات تعادلی می‌تواند به حفظ وزن رت‌ها پس از ضایعه نخاعی کمک کند. اطلاعات مربوط به تغییرات عملکرد حسی، حرکتی، درد و میزان تعادل در هر دو مرحله پیش‌آزمون و پس‌آزمون در جداول زیر ارائه شده است. نتایج آزمون تی جفتی و آنکوا مربوط به تغییرات عملکرد حسی، حرکتی و درد بین گروه‌های تمرین تعادلی و کنترل در جداول (۳) تا (۸) ارائه شده است.

بررسی تأثیر تمرین تعادلی بر متغیرهای عملکرد حسی

به‌منظور ارزیابی جامع عملکرد حسی پس از ایجاد ضایعه نخاعی ناکامل و بررسی اثر تمرینات تعادلی بر بازیابی مسیرهای حسی، آزمون رفتاری تست سرما با دو واکنش شامل لیسیدن پا و عقب‌کشیدن پا استفاده شد. این آزمون به ترتیب به‌منظور سنجش پاسخ‌های حسی به محرک دردناک در گروه تمرین تعادلی و گروه کنترل، در دو مرحله پیش‌آزمون و پس‌آزمون اجرا شد.

الف) تست سرما و واکنش لیسیدن پا

به‌منظور ارزیابی عملکرد حسی پس از ایجاد ضایعه نخاعی ناکامل و بررسی اثر تمرینات تعادلی بر بازیابی حس درد و پاسخ‌های حسی اندام تحتانی، آزمون لیسیدن پنجه (Foot Licking Test) در دو مرحله پیش‌آزمون و پس‌آزمون انجام شد. این آزمون به‌عنوان یکی از شاخص‌های معتبر سنجش عملکرد حسی در مدل‌های حیوانی ضایعه نخاعی، در گروه تمرین تعادلی و گروه کنترل استفاده شد. نتایج توصیفی و تحلیلی حاصل از مقایسه تغییرات درون‌گروهی و تفاوت‌های بین‌گروهی این آزمون در جدول (۳) ارائه شده است.

جدول ۳- نتایج آزمون تی جفتی و کواریانس متغیر عملکرد حسی (لیسیدن پا)

Table 3 - Paired t-test and covariance results for the sensory function variable (foot licking)(seconds)

متغیر Variable	گروه Group	پیش‌آزمون Pre test انحراف معیار± میانگین Mean±SD	پس‌آزمون Post-test انحراف معیار± میانگین Mean ±SD	نتایج آنالیز تحلیل کواریانس Results of the analysis of covariance آماره F	درجه آزادی Degrees of Freedom	سطح معناداری P-Value
لیسیدن پا foot licking	گروه تمرین تعادلی Balance training group	15.67±25.24	5.00±7.53	2.565	1	0.115
	گروه کنترل Control group	19.60±21.52	18.00±24.900			

نتایج آزمون تی زوجی نشان داد که میانگین زمان لیسیدن پنجه در گروه تمرین تعادلی پس از هشت هفته مداخله نسبت به پیش‌آزمون تغییر معناداری نداشت ($P>۰/۰۵$). جدول (۳) بیانگر آن است که تمرینات تعادلی اعمال‌شده در دوره زمانی پژوهش، تأثیر درخورتوجهی بر بهبود عملکرد حسی حیوانات نداشت.

همچنین مقایسه بین‌گروهی در مرحله پس‌آزمون نشان داد که میانگین نمرات لیسیدن پا (ثانیه) در گروه تمرین تعادلی تفاوت معناداری با گروه کنترل نداشت ($P=۰/۱۱۵$). در جدول (۳) مشاهده نشدن اختلاف معنادار می‌تواند نشان‌دهنده

پاسخ کندتر سیستم‌های حسی به مداخلات تمرینی یا نیاز به شدت و مدت‌زمان بیشتر تمرین برای ایجاد تغییرات قابل‌اندازه‌گیری در مسیرهای حسی پس از ضایعه نخاعی باشد.

ب- تست سرما و واکنش عقب کشیدن پا

به‌منظور ارزیابی پاسخ‌های انعکاسی حسی و یکپارچگی مسیرهای آوران نخاعی، آزمون تست سرما با عقب‌کشیدن پا (foot withdrawal) در دو مرحله پیش‌آزمون و پس‌آزمون در گروه تمرین تعادلی و گروه کنترل انجام شد. این آزمون به‌عنوان شاخصی از آستانه پاسخ به محرک دردناک استفاده شد کخ نتایج توصیفی و تحلیلی حاصل از آن در جدول (۴) ارائه شده است.

جدول ۴- نتایج آزمون تی جفتی و کواریانس متغیر عملکرد حسی (عقب کشیدن پا) (ثانیه)

Table 4 - Paired t-test and covariance results for the sensory function variable (foot withdrawal)(seconds)

متغیر Variable	گروه Group	پیش‌آزمون Pre test انحراف معیار± میانگین Mean±SD	پس‌آزمون Post-test انحراف معیار± میانگین Mean ±SD	نتایج آنالیز تحلیل کواریانس Results of the analysis of covariance آماره F	درجه آزادی Degrees of Freedom	سطح معناداری P-Value
عقب کشیدن پا foot withdrawal	گروه تمرین تعادلی Balance training group	22.17±22.23	13.33±11.91	.132	1	0.878
	گروه کنترل Control group	2.80±6.26	6.80±9.73			

نتایج آزمون تی زوجی نشان داد که میانگین زمان عقب‌کشیدن پا در گروه تمرین تعادلی پس از هشت هفته مداخله نسبت به مرحله پیش‌آزمون تغییر معناداری نداشت (P>۰/۰۵). جدول (۴) نشان می‌دهد که تمرینات تعادلی اعمال‌شده در بازه زمانی پژوهش، تأثیر درخورتوجهی بر بهبود پاسخ‌های انعکاسی حسی در این گروه نداشت.

در ادامه، نتایج مقایسه بین‌گروهی در مرحله پس‌آزمون نشان داد که میانگین زمان عقب‌کشیدن پا در گروه تمرین تعادلی تفاوت معناداری با گروه کنترل نداشت (P=۰/۸). در جدول (۴) مشاهده نشدن اختلاف آماری معنادار می‌تواند بیانگر پاسخ کندتر سیستم‌های حسی-انعکاسی به مداخلات تمرینی و یا نیاز به شدت و مدت‌زمان بیشتر تمرین برای ایجاد تغییرات قابل‌اندازه‌گیری در عملکرد حسی پس از ضایعه نخاعی ناکامل باشد.

بررسی تأثیر تمرین تعادلی بر متغیر عملکرد حرکتی

الف) تست رفتار حرکتی BBB

به‌منظور ارزیابی بازیابی عملکرد حرکتی اندام‌های تحتانی پس از ایجاد آسیب نخاعی، از آزمون رفتاری (BBB) استفاده شد. این آزمون به‌عنوان یکی از معتبرترین شاخص‌های عملکرد حرکتی در مدل حیوانی آسیب نخاعی، امکان بررسی تغییرات هماهنگی حرکتی و ثبات پاسچرال در طول زمان و مقایسه بین گروه‌های تمرین و کنترل را فراهم می‌کند. جدول (۵) میانگین و انحراف معیار نمرات BBB گروه‌های پژوهش را در بازه‌های زمانی تعیین‌شده پس از آسیب نخاعی نشان می‌دهد.

جدول ۵- میانگین و انحراف استاندارد تست BBB

Table 5- Mean ±SD of the test BBB

زمان Time	گروه Group	میانگین ± انحراف معیار Mean ±SD	سطح معناداری P-Value
هفته اول Week 1	تمرین تعادلی Balance training group	4.65±0.70	0.452
	کنترل Control group	4.42±0.51	
هفته هشتم Week 8	تمرین تعادلی Balance training group	14.53±1.18	0.002
	کنترل Control group	4.14±1.05	

نتایج آزمون تی زوجی نشان داد که میانگین نمرات آزمون BBB در گروه تمرین تعادلی پس از هشت هفته مداخله نسبت به هفته اول پس از ایجاد ضایعه نخاعی به طور معناداری افزایش یافت ($P<0/05$). در جدول (۵) این یافته بیانگر بهبود معنادار عملکرد حرکتی اندام‌های تحتانی در پاسخ به اجرای تمرینات تعادلی است.

ب) تست جعبه باز

به‌منظور ارزیابی عملکرد حرکتی پس از ایجاد ضایعه نخاعی ناکامل و بررسی اثر تمرینات تعادلی بر بهبود این شاخص، آزمون جعبه باز (Open Field Test) در دو مرحله پیش‌آزمون و پس‌آزمون انجام شد. این آزمون به‌عنوان یکی از ابزارهای معتبر سنجش توانایی حرکتی، میزان تحرک و الگوی حرکتی حیوانات در مدل‌های حیوانی ضایعه نخاعی استفاده می شود. آزمون مذکور در گروه تمرین تعادلی و گروه کنترل اجرا شد که نتایج توصیفی و تحلیلی حاصل از تغییرات درون‌گروهی و مقایسه بین‌گروهی در جدول (۶) ارائه شده است.

جدول ۶- نتایج آزمون تی جفتی و کواریانس برای متغیر عملکرد حرکتی (تست جعبه باز)

Table 6 - Paired t-test and covariance results for motor performance variable (open box test)

متغیر Variable	گروه Group	پیش‌آزمون Pre test انحراف معیار± میانگین Mean±SD	پس‌آزمون Post-test انحراف معیار± میانگین Mean ±SD	نتایج آنالیز تحلیل کواریانس Results of the analysis of covariance آماره F	درجه آزادی Degrees of Freedom	سطح معناداری P-Value
جعبه باز open box test	گروه تمرین تعادلی Balance training group	5.00±4.00	11.83±2.92	10.042	1	0.002
	گروه کنترل Control group	8.80±2.77	4.40±5.59			

نتایج آزمون تی زوجی نشان داد که میانگین نمرات آزمون جعبه باز در گروه تمرین تعادلی پس از هشت هفته مداخله نسبت به مرحله پیش‌آزمون به طور معناداری افزایش یافت (P<۰/۰۵). در جدول (۵) این یافته بیانگر بهبود معنادار عملکرد حرکتی و افزایش میزان تحرک حیوانات در پاسخ به تمرینات تعادلی است.

همچنین نتایج مقایسه بین‌گروهی در مرحله پس‌آزمون نشان داد که میانگین نمرات آزمون جعبه باز در گروه تمرین تعادلی به طور معناداری بیشتر از گروه کنترل بود (P=۰/۰۰۲). نتایج جدول (۶) حاکی از آن است که تمرینات تعادلی اعمال‌شده توانستند اثر مثبت بر بهبود عملکرد حرکتی پس از ضایعه نخاعی ناکامل داشته باشند.

بررسی تأثیر تمرین تعادلی بر میزان درد (تست گرما)

به‌منظور ارزیابی حساسیت درد و بررسی پاسخ به محرک حرارتی پس از ایجاد ضایعه نخاعی ناکامل و تعیین اثر تمرینات تعادلی بر تعدیل درک درد، آزمون گرما (Heat test) در دو مرحله پیش‌آزمون و پس‌آزمون انجام شد. این آزمون به‌عنوان یکی از روش‌های معتبر سنجش آستانه درد و عملکرد مسیرهای حسی و درد در مدل‌های حیوانی ضایعه نخاعی استفاده می‌شود. آزمون مذکور در گروه تمرین تعادلی و گروه کنترل اجرا شد. نتایج توصیفی و تحلیلی حاصل از تغییرات درون‌گروهی و مقایسه بین‌گروهی در جدول (۷) ارائه شده است.

جدول ۷- نتایج آزمون تی جفتی برای متغیر درد (تست گرما) (ثانیه)

Table 7- Paired t-test and covariance results for pain variable (Heat test) (seconds)

متغیر Variable	گروه Group	پیش‌آزمون Pre test انحراف معیار± میانگین	پس‌آزمون Post-test انحراف معیار± میانگین Mean ±SD	نتایج آنالیز تحلیل کواریانس Results of the analysis of covariance آماره F	درجه آزادی	سطح معناداری

متغیر Variable	گروه Group	پیش‌آزمون Pre test انحراف معیار± میانگین Mean±SD	پس‌آزمون Post-test انحراف معیار± میانگین Mean ±SD	Degrees of Freedom	P-Value
تست گرما Heat test	گروه تمرین تعادلی Balance training group	8.46±1.35	2.90±1.51	1	30.696 .001
	گروه کنترل Control group	7.74±1.60	8.56±0.76		

نتایج آزمون تی زوجی نشـان داد که میانگین زمان واکنش رت‌ها در آزمون گرما در گروه تمرین تعادلی پس از هشـت هفته مداخله نسـبت به مرحله پیش‌آزمون به طور معناداری کاهش یافت (P<۰/۰۵). در جدول (۷)، این کاهش نشان‌دهنده بهبود حساسیت به محرک‌های حرارتی و کاهش پاسخ درد پس از تمرینات تعادلی است.

علاوه بر این، مقایسه بین‌گروهی در مرحله پس‌آزمون نشان داد که میانگین زمان واکنش رت‌ها در گروه تمرین تعادلی به طور معناداری کمتر از گروه کنترل بود (P<۰/۰۰۱). یافته‌های جدول (۷) حاکی از آن اسـت که تمرینات تعادلی اعمال‌شده توانسته‌اند به طور مؤثری پاسخ‌های درد حرارتی را کاهش دهند و اثر محافظتی یا تعدیل‌کننده‌ای بر عملکرد مسیرهای حسی و درد پس از ضایعه نخاعی ناکامل ایجاد کنند.

بررسی تأثیر تمرین تعادلی بر میزان تعادل (تست روتارود)

به‌منظور ارزیابی عملکرد تعادلی و هماهنگی حرکتی پس از ایجاد ضـایعه نخاعی ناکامل و بررسـی اثر تمرینات تعادلی، آزمون روتارود (Rotarod Test) در دو مرحله پیش‌آزمون و پس‌آزمون و همچنین به‌عنوان بخشـی از برنامه تمرینی هشـت‌هفته‌ای گروه تمرین تعادلی اجرا شـد. این آزمون، علاوه‌بر سـنجش توانایی حفظ تعادل و اسـتقامت عضـلانی، به‌عنوان تمرین فعال برای بهبود عملکرد تعادلی نیز اسـتفاده شـد. حیوانات در گروه تمرین تعادلی ارزیابی شدند. نتایج توصیفی و تحلیلی حاصل از تغییرات درون‌گروهی در جدول (۸) ارائه شده است.

جدول ۸- نتایج آزمون تی جفتی برای متغیر تعادل (تست روتارود) (ثانیه)

Table 8- Paired t-test results for the balance variable (rotarod test) (seconds)

متغیر Variable	گروه Group	پیش‌آزمون Pre test انحراف معیار± میانگین Mean±SD	پس‌آزمون Post-test انحراف معیار± میانگین Mean ±SD	سطح معناداری P-Value
تست روتارود Rotarod test	گروه تمرین تعادلی Balance training group	25.00±11.33	19.94±75.00	0.001

نتایج آزمون تی زوجی نشان داد که میانگین زمان حفظ تعادل در آزمون روتارود در گروه تمرین تعادلی پس از هشت هفته مداخله نسبت به مرحله پیش‌آزمون به طور معناداری افزایش یافت (P<۰/۰۵). در جدول(۸)، این افزایش نشان‌دهنده بهبود عملکرد تعادلی و هماهنگی حرکتی حیوانات و اثر مثبت تمرینات تعادلی بر توانایی حفظ تعادل پس از ضایعه نخاعی ناکامل است.

نتایج حاصل از آزمون‌های تی زوجی و آنکوا نشان داد که هشت هفته تمرین تعادلی به طور معناداری عملکرد حرکتی، میزان درد و تعادل رت‌های ضایعه نخاعی را بهبود بخشید (P=۰/۰۰۲)، (P<۰/۰۰۱) و (P<۰/۰۰۱) (به‌ترتیب برای عملکرد حرکتی، درد و تعادل). در گروه تمرین تعادلی، این مداخلات موجب افزایش درخورتوجه عملکرد حرکتی، کاهش زمان واکنش در آزمون درد حرارتی و بهبود زمان حفظ تعادل در آزمون روتارود شد؛ در حالی که گروه کنترل که در طول هشت هفته هیچ تمرینی دریافت نکرده بود، تغییر معناداری را در این شاخص‌ها نشان نداد؛ بنابراین می‌توان نتیجه گرفت که هشت هفته تمرین تعادلی تأثیر مثبت و معناداری بر توانایی حرکتی، کاهش حساسیت به درد و بهبود تعادل رت‌های ضایعه نخاعی دارد.

درمقابل، تغییرات حاصل از تمرینات تعادلی در عملکرد حسی شامل آزمون‌های لیسیدن پا و عقب‌کشیدن پا، معنادار نبود (P=۰/۱۱۵) و (P=۰/۸۷). این یافته نشان می‌دهد که تمرینات تعادلی در شرایط پژوهش، اثر قابل‌اندازه‌گیری بر عملکرد حسی و انعکاسی رت‌ها نداشته است و مسیرهای حسی ممکن است نیازمند مداخلات طولانی‌تر، شدیدتر یا اختصاصی‌تر باشند.

بحث و نتیجه‌گیری

نتایج پژوهش حاضر نشان داد که هشت هفته تمرین تعادلی در رت‌های صحرایی مبتلا به ضایعه نخاعی ناکامل (SCI) موجب بهبود معنادار عملکرد حرکتی و تعادل شد؛ در حالی که تغییر معناداری در شاخص‌های عملکرد حسی مشاهده نشد. بهبود عملکرد حرکتی در گروه تمرین تعادلی با افزایش امتیازات آزمون BBB و تست جعبه باز همراه بود. همچنین، این حیوانات توانستند زمان بیشتری را در آزمون روتارود حفظ تعادل کنند. این یافته‌ها بیانگر بهبود هماهنگی عصبی-عضلانی، افزایش کنترل حرکتی و بازآرایی عملکردی مدارهای حرکتی نخاعی است. درمقابل، نبود تغییر درخورتوجه در عملکرد حسی احتمالاً نشان‌دهنده آسیب‌پذیری بیشتر مسیرهای آوران حسی یا ناکافی بودن شدت و ماهیت تمرین تعادلی برای تحریک مؤثر این مسیرها در بازه زمانی پژوهش است.

پس از آسیب نخاعی ناقص که با کاهش نسبی انتقال پیام در مسیرهای حرکتی نزولی همراه است، بازیابی راه رفتن به‌عنوان یکی از اهداف اصلی توان‌بخشی مطرح می‌شود. شواهد نشان می‌دهد که ویژگی‌ها و پارامترهای تمرین از عوامل تعیین‌کننده در بهینه‌سازی بازتوانی حرکتی پس از آسیب‌های عصبی هستند. یافته‌های حاصل از مطالعات حیوانی و انسانی در آسیب نخاعی ناقص حاکی از آن است که حجم زیاد تمرینات گام برداری می‌تواند به بهبود معنادار سرعت راه رفتن، استقامت و سطح استقلال عملکردی منجر شود (۳۳-۳۰).

در همین راستا، بهبود عملکرد در آزمون‌ها و تمرین‌های حرکتی نظیر روتارود با سرعت ثابت یا شتاب‌دار که عمدتاً به مدارهای نخاعی موضعی متکی هستند و همچنین آزمون‌های حرکتی پیچیده‌تر مانند پله‌های نامنظم که به مشارکت ساختارهای فوق‌نخاعی نیاز دارند، گزارش شده است؛ با این حال، مدل آسیب استفاده‌شده در پژوهش حاضر، علاوه‌بر مسیرهای حرکتی، موجب آسیب به آوران‌های حسی نیز می‌شود؛ ازاین‌رو نتایج رفتاری به‌دست‌آمده نه‌تنها بازتابی از بازیابی عملکرد حرکتی، بلکه بیانگر محدودیت در بازیابی یا انطباق بازخوردهای حسی نیز است.

درمجموع، اثرات پایدار مشاهده‌شده بر شاخص‌های مختلف عملکرد حرکتی از این دیدگاه حمایت می‌کند که شروع به‌موقع تمرینات داوطلبانه با الگوهای حرکتی فیزیولوژیک می‌تواند فرایند بازتوانی حرکتی را به طور مؤثری تقویت کند. درمقابل، بهبود معنادار نیافتن عملکرد حسی نشان می‌دهد که تمرینات تعادلی به‌تنهایی ممکن است برای تحریک کافی مسیرهای حسی آسیب‌دیده کافی نباشند و این مسیرها احتمالاً به مداخلات اختصاصی‌تر یا دوره‌های تمرینی طولانی‌تر نیاز دارند (۳۴).

در پژوهش لی[1] و همکاران، تأثیر دو نوع تمرین ورزشی داوطلبانه با دویدن روی چرخ دوار و تمرین اجباری با تردمیل پس از ضایعه نخاعی سینه‌ای بررسی شد. آن‌ها دریافتند که در گروه آموزش‌دیده با ورزش، به‌ویژه زیرگروه تمرین اختیاری روی چرخ، در مقایسه با گروه آموزش‌ندیده، عملکرد حرکتی به طور درخورتوجهی افزایش یافت. همچنین تمرینات ورزشی موجب تقویت پلاستیسیته عصبی، بهبود تنظیم مسیرهای دوپامینی و سروتونرژیک و افزایش عصب‌دهی انتهایی آکسون‌های نزولی شدند (۳۵). این یافته‌ها با نتایج پژوهش حاضر هم‌راستا است و ماهیت تکرارشونده و هدفمند تمرین ازجمله فعال‌سازی مدارهای حرکتی و انعطاف‌پذیری عصبی، نقش اساسی در بازیابی عملکرد حرکتی پس از آسیب نخاعی ناقص دارد.

در پژوهشی دیگر، تانگ[2] و همکاران به بررسی تأثیر هشت هفته تمرین تردمیل بر تنظیم دینامیک میکروتوبول‌ها و عملکرد حرکتی پس از آسیب نخاعی پرداختند. آن‌ها دریافتند که تمرینات تردمیل به طور مؤثر التهاب عصبی را کاهش می‌دهد و از بین رفتن نورون‌ها جلوگیری می‌کند. به‌علاوه آن‌ها دریافتند که تمرینات منظم تردمیل دینامیک میکروتوبول‌های عصبی را تغییر می‌دهد، بازسازی آکسون و انعطاف‌پذیری سیناپسی را تسهیل می‌کند و درنهایت عملکرد حرکتی را بهبود می‌بخشد (۳۶). در پژوهش حاضر نیز هشت هفته تمرین تعادلی منجر به بهبود معنادار عملکرد حرکتی و تعادل شد. این هم‌راستایی نشان می‌دهد که نوع تمرین‌ها متفاوت است، اما ماهیت تکرارشونده، هدفمند و وابسته به کنترل حرکتی در هر دو مداخله می‌تواند از طریق فعال‌سازی مکانیسم‌های مشترک عصبی-سلولی ازجمله افزایش پلاستیسیته عصبی و بازآرایی مدارهای حرکتی نخاعی، در بهبود عملکرد حرکتی رت‌های ضایعه نخاعی نقش اساسی ایفا کند. طبق پژوهش‌ها دلیل تأثیر تمرینات ورزشی بر تعادل می‌تواند ارائه بازخورد زیستی به سیستم عصبی مرکزی فرد توسط نوروفیدبک و بازسازی طول‌موج‌ها تا رسیدن به حد مطلوب (به‌طور ناخودآگاه) باشد. این فرایند می‌تواند سبب کنترل دقیق‌تر سیستم عصبی مرکزی فرد بر نوسانات ناشی از بیماری یا آسیب شود و درنهایت سیستم عصبی مرکزی، کنترل بهتری بر حفظ قامت فرد داشته باشد (۳۸، ۳۷).

1. Lee
2. Tang

درمقابل، تمرینات تعادلی تأثیر معناداری بر عملکرد حسی (لیسیدن پا و عقب‌کشیدن پا) نداشتند. این یافته با برخی گزارش‌ها مانند مطالعه ساچدوا[1] و همکاران همخوانی دارد. آنان تأثیر چهار هفته تحریک حسی ریتمیک در طول ورزش دوچرخه‌سواری را بر میزان بازسازی ذاتی نورون‌ها و تقویت بازسازی آکسون در سیستم اعصاب محیطی بررسی کردند. آن‌ها نشان دادند که چهار هفته دوچرخه‌سواری باعث بهبود بازسازی PNG از نورون‌های کمری می‌شود، اما نه توسط نورون‌های حسی اولیه. اکثر نورون‌هایی که آکسون خود را بازسازی می‌کنند، در پنج میلی‌متری ضایعه قرار دارند و تعداد آن‌ها با ورزش ۷۰ درصد افزایش می‌یابد. ساچدوا و همکاران به این نتیجه رسیدند که تمرینات ریتمیک و تکرارشونده پس از ضایعه نخاعی، بازسازی آکسون نورون‌های حرکتی و پروپری‌اسپاینال را تقویت می‌کند، اما مسیرهای حسی اولیه به این مداخلات پاسخ درخورتوجهی را نشان نمی‌دهند که نشان‌دهنده وابستگی اثر تمرین به نوع نورون فعال شده است (۳۹). همسو با پژوهش ساچدوا و همکاران (۳۹)، نبود تغییر معنادار در عملکرد حسی در پژوهش حاضر، ممکن است به دلیل وابستگی اثر تمرین به نوع نورون و مدار عصبی فعال شده باشد که مسیرهای حسی اولیه تحت تمرین تعادلی تحریک کافی برای ایجاد بازسازی یا تغییر رفتاری دریافت نکرده‌اند. این موضوع نشان می‌دهد که بازسازی مسیرهای حسی ممکن است نیازمند مداخلات طولانی‌تر یا ترکیبی شامل تحریک الکتریکی یا تمرینات اختصاصی حسی-حرکتی باشد. از طرفی نتایج پژوهش حاضر نشان داد که پس از یک دوره هشت‌هفته‌ای از تمرینات تعادلی، میزان درد در رت‌های ضایعه نخاعی ناکامل کاهش معناداری یافت.

در پژوهش‌های اخیر نیز نقش التهاب عصبی و تعامل سلول‌های گلیال در درد نوروپاتیک پس از ضایعه نخاعی به‌خوبی تبیین شده است. مطالعات نشان داده‌اند که فعال‌سازی میکروگلیا و آستروسیت‌ها در شاخ پشتی نخاع و مراکز فوق‌نخاعی باعث آزادسازی واسطه‌های التهابی می‌شود. این عوامل انتقال سیناپسی مسیر درد را تغییر می‌دهند و حساسیت مرکزی را تشدید می‌کنند و درنتیجه به ایجاد و پایداری درد نوروپاتیک پس از آسیب نخاعی کمک می‌کنند (۴۰). میکروگلیاها اولین پاسخ‌دهندگان و سلول‌های ایمنی اصلی ساکن سیستم عصبی مرکزی هستند. پژوهش‌های زیادی نشان داده‌اند که فعال سازی میکروگلیا رویداد اولیه‌ای است که واسطه التهاب عصبی در درد نوروپاتیک است. مطالعات متعددی نشان داده‌اند که ورزش به‌عنوان یک فعالیت بدنی سیستمیک، می‌تواند با تقویت نوروژنز و کاهش پاسخ التهابی، اثرات محافظت عصبی اعمال کند. آزمایشگاه‌ها نشان داده‌اند که کاهش درد پس از فعالیت ورزشی می‌تواند ناشی از کاهش جوانه‌زنی غیرطبیعی نورون‌های درد در شاخ پشتی نخاع باشد؛ بنابراین، این امکان وجود دارد که ورزش پس از آسیب نخاعی ناقص با اثر مستقیم بر گیرنده‌های درد اولیه یا با تعدیل پاسخ ایمنی محیطی در گانگلیون‌های ریشه پشتی، درد را کاهش دهد (۴۴-۴۱).

در پژوهش چنگ[2] و همکاران نشان داده شد که تمرین ورزشی داوطلبانه (دویدن روی چرخ) پس از ایجاد ضایعه نخاعی گردنی، به طور معناداری درد نوروپاتیک را کاهش می‌دهد. این اثر ضددرد با کاهش بیش‌بیان پپتید مرتبط با ژن کلسی‌تونین (CGRP) در نورون‌های حسی و مهار فعال سازی میکروگلیا (Iba-1) در شاخ پشتی کمری نخاع همراه

1. Sachdeva
2. Cheng

بود. نتایج این پژوهش نشـــان می‌دهد که تمرین داوطلبانه با کاهش حســـاســـیت مرکزی و تعدیل التهاب عصـــبی در مسیرهای درد، به طور مؤثری درد نوروپاتیک پس از ضایعه نخاعی را کاهش می‌دهد (۴۵).

از سوی دیگر، نتایج پژوهش حاضر نشان داد که پس از یک دوره هشت‌هفته‌ای تمرینات تعادلی، توانایی حفظ تعادل و پایداری حرکتی در رت‌های ضایعه نخاعی بهبود معناداری یافته است. وان هلدن[1] و همکاران در پژوهشی مشاهده‌ای به بررســـی اثر شـــش هفته تمرین هوازی اندام فوقانی به‌صـــورت خانگی (arm cycling) بر کنترل تنه در افراد مبتلا به آسیب نخاعی ناقص پرداختند. نتایج نشان داد که پس از دوره مداخله، شاخص‌های کنترل تنه، تعادل و ثبات پوسچرال به طور معناداری بهبود یافت. محققان این بهبود را به فعال‌سازی عضلات مرکزی، افزایش هماهنگی عصبی-عضلانی و ارتقای یکپارچگی حسی-حرکتی نسبت دادند. این یافته‌ها مؤید آن است که حتی تمرینات هوازی می‌توانند از طریق بهبود کنترل تنه، نقش مؤثری در ارتقای تعادل عملکردی پس از آسیب نخاعی، به‌ویژه در آسیب ضایعه نخاعی ناقص ایفا کنند و با نتایج پژوهش حاضر در زمینه بهبود تعادل هم‌راستا هستند (۴۶).

اما در پژوهش دنگ[2] و همکاران، پژوهشـــگران اثر تمرین روتارود در فاز اولیه پس از آســـیب نخاعی را بر ترمیم بافت عصبی و بازیابی عملکرد حرکتی در آسیب نخاعی ناقص بررسی کردند. تمرینی شامل شش نوبت تمرین روزانه (هر نوبت پنج دقیقه) با افزایش سـرعت از ۴ تا ۴۰ دور در دقیقه بود که پنج روز در هفته و به مدت چهار هفته ادامه یافت. نتایج نشـــان داد که اجرای تمرین روتارود در فاز اولیه پس از آســـیب نخاعی منجر به بهبود بازیابی عملکرد حرکتی و تعادل نشد. آن‌ها نتیجه گرفتند که زمان‌بندی شروع و شدت تمرینات تعادلی پس از آسیب نخاعی عامل تعیین‌کننده‌ای در مسیر بهبود عملکردی و عصبی است (۱۴). تفاوت نتایج پژوهش حاضر با پژوهش دِنگ و همکاران (۱۴) را می‌توان به زمان‌بندی و بار تمرینی نسـبت داد. در حالی که در پژوهش حاضـر شـدت تمرینات تعادلی به‌صـورت تدریجی و کنترل‌شده افزایش یافت و در هفته هشتم به حداکثر ۱۵ دور در دقیقه رسید، در پژوهش دِنگ تمرین روتارود با شدت بالا و دامنه چهار تا چهل دور در دقیقه از همان هفته‌های ابتدایی اجرا شـد. این بار مکانیکی و عصـبی زیاد در فازهای اولیه پس از آسیب، احتمالاً موجب اضافه‌بار زودهنگام بر سیستم عصبی آسیب‌دیده و اختلال در فرایندهای تطابق عصـبی و بازیابی عملکرد حرکتی و تعادلی شـده اسـت؛ در حالی که رویکرد تدریجی پژوهش حاضـر امکان سـازگاری عصبی و بهبود تعادل را فراهم کرده است.

با وجود تلاش پژوهش‌های فشـــرده، هنوز هیچ درمان مؤثری وجود ندارد که به طور مؤثر بهبود عملکردی را پس از آسیب نخاعی ارتقا دهد. اقدامات بالینی بسیاری از رویکردهای تجربی مبتنی بر مداخلات دارویی یا جایگزینی سلول، تاکنون اغلب به دلیل عوارض جانبی یا نداشتن کارایی شکست خورده است. درمقابل، اقدامات غیرتهاجمی برای ارتقای فعالیت بدنی مانند تمرین روی تردمیل، دوچرخه‌ســـواری یا شـــنا، همگی در بهبود نتیجه بیمار پس از آســـیب نخاعی نویدهایی را نشـــان داده‌اند. چنین اقداماتی نه‌تنها خطر عوارض ثانویه را کاهش می‌دهد، بلکه پتانســـیلی را برای بهبود توانایی راه رفتن به‌ویژه در بیماران با آسیب ناقص نشان داده است؛ با این حال، انجام کارآزمایی‌های بالینی تصادفی‌شده با افراد مبتلا به آسیب نخاعی ناقص دشوار است و نتیجه‌گیری‌های صریح درمورد این موضوع را تضعیف می‌کند.

1. van Helden
2. Deng

به طور کلی، پاسخ به تمرین تعادلی به شدت آسیب، مدت مداخله و ابزارهای سنجش بستگی دارد؛ به گونه‌ای که تمرینات کوتاه‌مدت اثرات محدود بر شاخص‌های حسی دارند، اما می‌توانند تغییرات درخورتوجهی در عملکرد حرکتی ایجاد کنند.

از نقاط قوت پژوهش حاضر می‌توان به طراحی پروتکل تمرین تعادلی تدریجی با افزایش سرعت و زمان در دستگاه روتارود، ارزیابی چندبعدی عملکرد شامل، تست BBB، جعبه باز و روتارود و استفاده از گروه کنترل اشاره کرد که اعتبار نتایج را افزایش داده و امکان تحلیل دقیق اثرات تمرین را فراهم کرده است؛ با این حال، محدودیت‌هایی نیز وجود دارد: نخست، حجم نمونه پس از جراحی کاهش یافت که ممکن است قدرت آزمون‌های آماری را محدود کند؛ دوم، شاخص‌های عملکرد حسی تنها با دو آزمون رفتاری سنجیده شدند و از روش‌های نوروفیزیولوژیک پیشرفته‌تر استفاده نشد؛ سوم، طول دوره تمرین محدود به هشت هفته بود و اثرات بلندمدت‌تر بررسی نشد.

یافته‌های این پژوهش پیامدهای عملی مهمی برای توان‌بخشی و ورزش معلولین دارد. تمرینات تعادلی می‌توانند به بهبود تعادل، افزایش استقلال حرکتی، کاهش خطر سقوط و جلوگیری از آسیب‌های ثانویه کمک کنند؛ به‌ویژه در ورزشکاران جانباز و افراد دارای آسیب نخاعی، اجرای تمرینات تعادلی می‌تواند امنیت در فعالیت‌های ورزشی و توان‌بخشی را افزایش دهد. درنهایت، یافته‌ها نشان می‌دهد که هشت هفته تمرین تعادلی قادر است عملکرد حرکتی و تعادل رت‌های ضایعه نخاعی را بهبود دهد؛ در حالی که اثر آن بر عملکرد حسی نیازمند بررسی‌های طولانی‌تر و پروتکل‌های ترکیبی است؛ بنابراین می‌توان آن را به‌عنوان مداخله‌ای مؤثر و کاربردی در برنامه‌های توان‌بخشی و ورزش معلولین پیشنهاد کرد.

درمجموع، یافته‌های پژوهش حاضر به طور معناداری نشان داد که اجرای هشت هفته تمرینات تعادلی منجر به بهبود درخورتوجه عملکرد حرکتی و کاهش درد می‌شود و از طریق ارتقای قدرت، تعادل و کارایی عضلانی، ظرفیت عملکردی آزمودنی‌های دارای ضایعه نخاعی را افزایش می‌دهد. این نتایج حاکی از آن است که تمرینات تعادلی می‌توانند به‌عنوان مداخله تمرینی ایمن و اثربخش، نقش مهمی در بهبود پیامدهای عملکردی پس از آسیب نخاعی ایفا کنند و احتمالاً از طریق بهبود کنترل عصبی-عضلانی و یکپارچگی بازخوردهای حسی-حرکتی عمل کنند؛ با این حال، با توجه به پیچیدگی پاسخ‌های عصبی و عضلانی به فعالیت بدنی پس از ضایعه نخاعی، تبیین دقیق سازوکارهای زیربنایی این بهبودها، به‌ویژه در ارتباط با تعدیل عوامل حسی و حرکتی، فرایندهای مرتبط با تحلیل عضلانی و مسیرهای جبرانی عصبی، مستلزم انجام مطالعات آینده با رویکردهای مولکولی، فیزیولوژیک و عملکردی بیشتری است.

پیام مقاله

یافته‌های پژوهش حاضر نشان می‌دهد که اجرای هشت هفته تمرینات تعادلی منجر به بهبود معنادار عملکرد حرکتی و تعادل، همراه با کاهش شاخص درد در رت‌های مبتلا به ضایعه نخاعی ناکامل می‌شود؛ بر این اساس، به‌کارگیری تمرینات تعادلی می‌تواند به‌عنوان یک راهبرد توان‌بخشی مؤثر و قابل‌اتکا در برنامه‌های بازتوانی پس از آسیب نخاعی مدنظر قرار گیرد؛ با این حال، با توجه به مشاهده نشدن تغییرات معنادار در شاخص‌های عملکرد حسی، به نظر می‌رسد که تمرینات تعادلی به‌تنهایی برای ارتقای کامل مؤلفه‌های حسی کافی نباشد؛ ازاین‌رو پیشنهاد می‌شود، پژوهش‌های آینده بر طراحی

و ارزیابی پروتکل‌های ترکیبی شامل تمرینات تعادلی همراه با مداخلات هدفمند حسی یا عصبی متمرکز شوند تا امکان بهبود جامع‌تر عملکرد حسی-حرکتی و ارتقای کیفیت زندگی پس از ضایعه نخاعی فراهم شود.

ملاحظات اخلاقی

این پژوهش مطابق با اصول اخلاقی پژوهش روی حیوانات و براساس دستورالعمل Guide for the Care and Use of Laboratory Animals (NIH) انجام شده است. همچنین پروتکل پژوهش توسط کمیته اخلاق در پژوهش دانشگاه مازندران تأیید شده است (کد اخلاق: https://ethics.research.ac.ir/IR.UMZ.REC.۱۴۰۳,۱۰۷).

مشارکت نویسندگان

در این مطالعه، نویسنده اول مسئول طراحی مطالعه، مرور و بررسی متون، اجرای مراحل پژوهش، جمع‌آوری داده‌ها، تحلیل و تفسیر نتایج و نگارش اولیه مقاله بود. نویسنده دوم به‌عنوان نویسنده مسئول، مسئولیت هدایت و نظارت علمی بر تمامی مراحل پژوهش، بازبینی تخصصی و ویرایش نهایی مقاله را بر عهده داشت. نویسنده سوم نیز در مشاوره علمی، بازنگری محتوایی و اصلاح مقاله مشارکت داشت.

تعارض منافع

بنابر اظهار نویسندگان، این مقاله تعارض منافع ندارد.

تشکر و قدردانی

نویسندگان این مقاله بر خود لازم می‌دانند از زحمات و همکاری ارزشمند همکاران آزمایشگاه دانشگاه شهید بهشتی در اجرای مراحل این پژوهش صمیمانه تشکر و قدردانی کنند.

منابع

1. Fouad K, Ng C, Basso DM. Behavioral testing in animal models of spinal cord injury. Experimental Neurology. 2020;333:113410. https://doi.org/10.1016/j.expneurol.2020.113410
2. Ding W, Hu S, Wang P, Kang H, Peng R, Dong Y, Li F. Spinal cord injury: the global incidence, prevalence, and disability from the global burden of disease study 2019. Spine. 2022;47(21):1532-1540. https://doi.org/10.1097/BRS.0000000000004417
3. Lai BQ, Che MT, Feng B, Bai YR, Li G, Ma YH, et al. Tissue-engineered neural network graft relays excitatory signal in the completely transected canine spinal cord. Advanced Science (Weinheim, Baden-Wurttemberg, Germany). 2019;6(22):1901240. https://doi.org/10.1002/advs.201901240
4. Xie C, Shen X, Xu X, Liu H, Li F, Lu S, et al. Astrocytic YAP promotes the formation of glia scars and neural regeneration after spinal cord injury. The Journal of Neuroscience: The Official Journal of the Society for Neuroscience. 2020;40(13):2644-62. https://doi.org/10.1523/JNEUROSCI.2229-19.2020
5. Huang CX, Zhao Y, Mao J, Wang Z, Xu L, Cheng J, Guan NN, et al. An injury-induced serotonergic neuron subpopulation contributes to axon regrowth and function restoration after spinal cord injury in zebrafish. Nature Communications. 2021;12(1):7093. https://doi.org/10.1038/s41467-021-27419

6. Anderson MA, Burda JE, Ren Y, Ao Y, O'Shea TM, Kawaguchi R, et al. Astrocyte scar formation aids central nervous system axon regeneration. Nature. 2016;532(7598):195-200. https://doi.org/10.1038/nature17623
7. Zheng B, Tuszynski MH. Regulation of axonal regeneration after mammalian spinal cord injury. Nature reviews. Molecular Cell Biology. 2023;24(6):396-413. https://doi.org/10.1038/s41580-022-00562-y
8. Gong L, Gu Y, Han X, Luan C, Liu C, Wang X, et al. Spatiotemporal dynamics of the molecular expression pattern and intercellular interactions in the glial scar response to spinal cord injury. Neuroscience Bulletin. 2023;39(2):213-44. https://doi.org/10.1007/s12264-022-00897-8
9. Toloui A, Ramawad HA, Gharin P, Vaccaro AR, Zarei H, Hosseini M, et al. The role of exercise in the alleviation of neuropathic pain following traumatic spinal cord injuries: a systematic review and meta-analysis. Neurospine. 2023;20(3):1073-87. https://doi.org/10.14245/ns.2346588.294
10. Dos Santos ACR, Laurindo RP, Pestana FM, Heringer LDS, Canedo NHS, Martinez AMB, et al. Exercise volume can modulate the regenerative response to spinal cord injury in mice. Neurotrauma Reports. 2024;5(1):721-37. https://doi.org/10.1089/neur.2024.0023
11. Obrero-Gaitán E, López-Nájera L, Piñar-Lara M, Ibancos-Losada MdR, Cortés-Pérez I, García-López H. Improving balance and functional status in spinal cord injury patients: a systematic review comparing virtual reality-based therapy and conventional therapeutic exercises. Electronics. 2024;13(13):2594. https://doi.org/10.3390/electronics13132594
12. Shan HM, Maurer MA, Schwab ME. Four-parameter analysis in modified Rotarod test for detecting minor motor deficits in mice. BMC Biol. 2023;21:177. https://doi.org/10.1186/s12915-023-01679-y
13. Liu J, Yang XY, Xia WW, Dong J, Yang MG, Jiao JH. Fine motor skill training enhances functional plasticity of the corticospinal tract after spinal cord injury. Neural Regeneration Research. 2016;11(12):1990-6. https://doi.org/10.4103/1673-5374.197143
14. Deng J, Meng F, Gao J, Zhang K, Liu Z, Li M, et al. Early-phase rotator training impairs tissue repair and functional recovery after spinal cord injury. Heliyon. 2023;9(7):e18158. https://doi.org/10.1016/j.heliyon.2023.e18158
15. Unger J, Singh H, Mansfield A, Masani K, Musselman KE. The experiences of people with incomplete spinal cord injury or disease during intensive balance training and the impact of the program: a qualitative study. Spinal Cord. 2022;60(12):1062-8. https://doi.org/10.1038/s41393-022-00823-9
16. Waters RL, Adkins RH, Yakura JS, Sie I. Motor and sensory recovery following incomplete tetraplegia. Archives of Physical Medicine and Rehabilitation. 1994;75(3):306-11. https://doi.org/10.1016/0003-9993(94)90034-5
17. Wyndaele M, Wyndaele JJ. Incidence, prevalence and epidemiology of spinal cord injury: what learns a worldwide literature survey? Spinal Cord. 2006;44(9):523-9. https://doi.org/10.1038/sj.sc.3101893
18. Hasanzadeh Pashang S, Zare H, Alipor A. The efficacy of stress inculation training (SIT) on resilience, anxiety, depression and stress among spinal cord injury (SCI) patients. Pars Journal of Medical Sciences. 2022;10(3):15-26. https://doi.org/10.29252/jmj.10.3.15
19. van Gorp S, Leerink M, Nguyen S, Platoshyn O, Marsala M, Joosten EA. Translation of the rat thoracic contusion model; part 2 - forward versus backward locomotion testing. Spinal Cord. 2014;52(7):529-35. https://doi.org/10.1038/sc.2014.73
20. Koopmans GC, Deumens R, Honig WM, Hamers FP, Steinbusch HW, Joosten EA. The assessment of locomotor function in spinal cord injured rats: the importance of objective analysis

of coordination. Journal of neurotrauma. 2005;22(2):214-25. https://doi.org/10.1089/neu.2005.22.214
21. Prut L, Belzung C. The open field as a paradigm to measure the effects of drugs on anxiety-like behaviors: a review. European Journal of Pharmacology. 2003;463(1-3):3-33. https://doi.org/10.1016/s0014-2999(03)01272-x
22. Mills CD, Grady JJ, Hulsebosch CE. Changes in exploratory behavior as a measure of chronic central pain following spinal cord injury. Journal of Neurotrauma. 2001;18(10):1091-105. https://doi.org/10.1089/08977150152693773
23. Shan HM, Maurer MA, Schwab ME. Four-parameter analysis in modified Rotarod test for detecting minor motor deficits in mice. BMC Biol. 2023;21:177. https://doi.org/10.1186/s12915-023-01679-y
24. Allchorne AJ, Broom DC, Woolf CJ. Detection of cold pain, cold allodynia and cold hyperalgesia in freely behaving rats. Molecular Pain. 2005;1:36. https://doi.org/10.1186/1744-8069-1-36
25. Chen J, Joshi SK, DiDomenico S, Perner RJ, Mikusa JP, Gauvin DM, et al. Selective blockade of TRPA1 channel attenuates pathological pain without altering noxious cold sensation or body temperature regulation. Pain. 2011;152(5):1165-1172. https://doi.org/10.1016/j.pain.2011.01.049
26. Deuis JR, Dvorakova LS, Vetter I. Methods Used to Evaluate Pain Behaviors in Rodents. Frontiers in Molecular Neuroscience. 2017;10:284. https://doi.org/10.3389/fnmol.2017.00284
27. Deuis JR, Dvorakova LS, Vetter I. Methods used to evaluate pain behaviors in rodents. Frontiers in Molecular Neuroscience. 2017;10:284. https://doi.org/10.3389/fnmol.2017.00284
28. Scheid T, Moraes MS, Henriques TP, Riffel APK, Belló-Klein A, Poser GLV, et al. Effects of methanol fraction from leaves of schinus terebinthifolius raddi on nociception and spinal-cord oxidative biomarkers in rats with neuropathic pain. Evidence-Based Complementary and Alternative Medicine : eCAM. 2018;2018:5783412. https://doi.org/10.1155/2018/5783412
29 Smith J, Brown A. Guide to research techniques in neuroscience. Academic Press; 2010. https://doi.org/10.1016/C2013-0-06868-5
30. Dobkin B, Barbeau H, Deforge D, Ditunno J, Elashoff R, Apple D, et al. Spinal cord injury locomotor trial group. the evolution of walking-related outcomes over the first 12 weeks of rehabilitation for incomplete traumatic spinal cord injury: the multicenter randomized spinal cord injury locomotor trial. Neurorehabilitation And Neural Repair. 2007;21(1):25-35. https://doi.org/10.1177/1545968306295556
30. Dobkin B, Barbeau H, Deforge D, Ditunno J, Elashoff R, Apple D, et al. Spinal Cord Injury Locomotor Trial Group. The evolution of walking-related outcomes over the first 12 weeks of rehabilitation for incomplete traumatic spinal cord injury: the multicenter randomized Spinal Cord Injury Locomotor Trial. Neurorehabilitation and Neural Repair. 2007;21(1):25-35. https://doi.org/10.1177/1545968306295556

31. Barbeau H, Norman K, Fung J, Visintin M, Ladouceur M. Does neurorehabilitation play a role in the recovery of walking in neurological populations? Annals of the New York Academy of Sciences. 1998;860:377–92. https://doi.org/10.1111/j.1749-6632.1998.tb09063.x
32. Yang JF, Musselman KE, Livingstone D, Brunton K, Hendricks G, Hill D, et al. Repetitive mass practice or focused precise practice for retraining walking after incomplete spinal cord injury? A pilot randomized clinical trial. Neurorehabilitation and Neural Repair. 2014;28(4):314–24. https://doi.org/10.1177/1545968313508473

33. de Leon RD, See PA, Chow CH. Differential effects of low versus high amounts of weight supported treadmill training in spinally transected rats. Journal of Neurotrauma. 2011;28(6):1021–33. https://doi.org/10.1089/neu.2010.1699
34. West SJ, Bannister K, Dickenson AH, Bennett DL. Circuitry and plasticity of the dorsal horn--toward a better understanding of neuropathic pain. Neuroscience. 2015;300:254–75. https://doi.org/10.1016/j.neuroscience.2015.05.020
35. Lee DH, Cao D, Moon Y, Chen C, Liu NK, Xu XM, et al. Enhancement of motor functional recovery in thoracic spinal cord injury: voluntary wheel running versus forced treadmill exercise. Neural Regeneration Research. 2025;20(3):836–44. https://doi.org/10.4103/NRR.NRR-D-23-01585
36. Tang Y, Wang X, Huang M, Li Y, Liu X, Zeng H, et al. Sports training improves motor function after spinal cord injury by regulating microtubule dynamics. Biochimica et Biophysica Acta. Molecular Basis of Disease. 2025;1871(3):167587. https://doi.org/10.1016/j.bbadis.2024.167587
37. Shaw L, Zaichkowsky L, Wilson V. Setting the balance: using biofeedback and neurofeedback with gymnasts. Journal of Clinical Sport Psychology. 2012;6(1):47-66. https://doi.org/10.1123/jcsp.6.1.47
38. Subramanian L, Hindle JV, Johnston S, Roberts MV, Husain M, Goebel R, et al. Real-time functional magnetic resonance imaging neurofeedback for treatment of Parkinson's disease. The Journal of Neuroscience: The Official Journal of the Society for Neuroscience. 2011;31(45):16309–17. https://doi.org/10.1523/JNEUROSCI.3498-11.2011
39. Sachdeva R, Theisen CC, Ninan V, Twiss JL, Houlé JD. Exercise dependent increase in axon regeneration into peripheral nerve grafts by propriospinal but not sensory neurons after spinal cord injury is associated with modulation of regeneration-associated genes. Experimental Neurology. 2016;276:72–82. https://doi.org/10.1016/j.expneurol.2015.09.004
40. Liu Y, Cai X, Shi B, Mo Y, Zhang J, Luo W, et al. Mechanisms and therapeutic prospects of microglia-astrocyte interactions in neuropathic pain following spinal cord injury. Mol Neurobiol. 2025 Apr;62(4):4654-4676. https://doi.org/10.1007/s12035-024-04562-1
41. Wang MJ, Jing XY, Wang YZ, Yang BR, Lu Q, Hu H, et al. Exercise, spinal microglia and neuropathic pain: potential molecular mechanisms. Neurochemical Research. 2024;49(1):29–37. https://doi.org/10.1007/s11064-023-04025-4

42. de Almeida EJR, Ibrahim HJ, Chitolina Schetinger MR, de Andrade CM, Cardoso AM. Modulation of inflammatory mediators and microglial activation through physical exercise in Alzheimer’s and Parkinson’s diseases. Neurochem Res. 2022;47(11):3221–3240. https://doi.org/10.1007/s11064-022-03713-x

43. Liu MX, Luo L, Fu JH, He JY, Chen MY, He ZJ, et al. Exercise-induced neuroprotection against cerebral ischemia/reperfusion injury is mediated via alleviating inflammasome-induced pyroptosis. Exp Neurol. 2022;349:113952. https://doi.org/10.1016/j.expneurol.2021.113952

44. Angulo J, El Assar M, Álvarez-Bustos A, Rodríguez-Mañas L. Physical activity and exercise: strategies to manage frailty. Redox Biol. 2020;35:101513. https://doi.org/10.1016/j.redox.2020.101513

45. Cheng X, Yu Z, Hu W, Chen J, Chen W, Wang L, et al. Voluntary exercise ameliorates neuropathic pain by suppressing calcitonin gene-related peptide and ionized calcium-binding

adapter molecule 1 overexpression in the lumbar dorsal horns in response to injury to the cervical spinal cord. Exp Neurol. 2022;354:114105. https://doi.org/10.1016/j.expneurol.2022.114105

46. van Helden JFL, Alexander E, Cabral HV, Strutton PH, Martinez-Valdes E, Falla D, et al. Home-based arm cycling exercise improves trunk control in persons with incomplete spinal cord injury: an observational study. Sci Rep. 2023;13(1):22120. https://doi.org/10.1038/s41598-023-49053-w

41. Wang MJ, Jing XY, Wang YZ, Yang BR, Lu Q, Hu H, et al. Exercise, spinal microglia and neuropathic pain: potential molecular mechanisms. Neurochemical research. 2024;49(1):29–37. https://doi.org/10.1007/s11064-023-04025-4

42. de Almeida EJR, Ibrahim HJ, Chitolina Schetinger MR, de Andrade CM, Cardoso AM. Modulation of inflammatory mediators and microglial activation through physical exercise in Alzheimer's and Parkinson's diseases. Neurochem Res. 2022;47(11):3221–40. https://doi.org/10.1007/s11064-022-03713-x

43. Liu MX, Luo L, Fu JH, He JY, Chen MY, He ZJ, Jia J. Exercise-induced neuroprotection against cerebral ischemia/reperfusion injury is mediated via alleviating inflammasome-induced pyroptosis. Exp Neurol. 2022;349:113952. https://doi.org/10.1016/j.expneurol.2021.113952

44. Angulo J, El Assar M, Álvarez-Bustos A, Rodríguez-Mañas L. Physical activity and exercise: strategies to manage frailty. Redox Biol. 2020;35:101513. https://doi.org/10.1016/j.redox.2020.101513

45. Cheng X, Yu Z, Hu W, Chen J, Chen W, Wang L, et al. Voluntary exercise ameliorates neuropathic pain by suppressing calcitonin gene-related peptide and ionized calcium-binding adapter molecule 1 overexpression in the lumbar dorsal horns in response to injury to the cervical spinal cord. Exp Neurol. 2022;354:114105. https://doi.org/10.1016/j.expneurol.2022.114105

46. van Helden JFL, Alexander E, Cabral HV, Strutton PH, Martinez-Valdes E, Falla D, et al. Home-based arm cycling exercise improves trunk control in persons with incomplete spinal cord injury: an observational study. Sci Rep. 2023;13(1):22120. https://doi.org/10.1038/s41598-023-49053-w