

The effect of three weeks of voluntary, forced exercise, and play in an enriched environment during the pre-pubertal period on locomotor performance in adult male rats: A longitudinal study

Mohammad Yousfzadeh¹, Elham Azimzadeh^{*1}, Rana Fayazmilani²

1.Department of Cognitive and Behavioral science and Technology in Sport, Faculty of Sport Sciences and Health, Shahid Beheshti University, Tehran, Iran

2.Department of Biological Sciences in Sport, Faculty of Sport Sciences and Health, Shahid Beheshti University, Tehran, Iran

Abstract

Background and Purpose: The pre-pubertal period is one of the critical stages of brain development and motor pattern formation. However, the long-lasting effects of different types of exercise training during this period on locomotor performance in adulthood have been less investigated. This study aimed to determine the effect of three weeks of voluntary, forced, and environmental enrichment exercise during the pre-pubertal period on locomotor performance in the open field test in adult male rats.

Materials and Methods: 24 male Wistar rats (28 days old) were randomly divided into four equal groups: control, voluntary exercise, forced exercise, and environmental enrichment. The voluntary group had free 24-hour access to a running wheel for three weeks (6 days/week). The forced group trained based on the mean distance and speed of the voluntary group. The enrichment group had access to an enriched cage for 4 hours/day, 6 days/week. Locomotor performance was assessed using the open field test on days 50, 65, 80, and 95. Body weight and food consumption were recorded. Data were analyzed using one-way ANOVA and Tukey's post hoc test ($P < 0.05$).

Results: In all four measurement sessions of motor performance, there were significant differences between the groups. On day 50, the enriched environment group (5883 ± 440 cm) and the voluntary group (5269 ± 342 cm) covered the greatest distances, while the control group (2751 ± 904 cm) covered the least. The enriched environment group performed significantly better than both the forced group ($P = 0.01$) and the voluntary group ($P = 0.042$). On day 95, the enriched environment group (5726 ± 275 cm) still maintained the highest performance. No significant differences were observed between the voluntary and forced groups at any time point. Regarding food consumption, the control group consumed significantly more food during the no-exercise period (days 50–95) than all three experimental groups ($P = 0.009$). During the exercise period (days 28–50), however, the only significant difference was between the control and forced groups ($P = 0.036$). In terms of body weight, the control

group weighed significantly more than all three experimental groups on days 80 and 95 ($P = 0.012$). Furthermore, on day 95, the enriched environment group weighed significantly more than the forced group ($P = 0.015$).

Conclusion: Three weeks of training during the pre-pubertal period, especially environmental enrichment, has long-lasting effects on improving locomotor performance until early adulthood. With equalization of training volume and intensity, no significant difference was observed between voluntary and forced exercise on locomotor performance. Environmental enrichment is the most effective intervention for long-term improvement of locomotor performance. Exercise interventions were associated with reduced body weight and food consumption during follow-up.

Keywords: Environmental enrichment, Forced exercise, Locomotor performance, Open field

How to cite this article: Yousefzadeh M, Azimzadeh E, Fayazmilani R, The effect of three weeks of voluntary exercise, forced exercise, and play in an enriched environment during the pre-pubertal period on locomotor performance in adult male rats; A longitudinal study

*Corresponding Author's E-mail: e_azimzadeh@sbu.ac.ir

[10.48308/joeppa.2026.244492.1459](https://doi.org/10.48308/joeppa.2026.244492.1459)

Received: 00/00/2025

Revised: 00/00/2025

Accepted: 00/00/2025

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/>).

تأثیر سه هفته تمرین اختیاری، اجباری و بازی در محیط غنی در دوره پیش از بلوغ بر عملکرد حرکتی رت‌های نر بالغ: یک مطالعه طولی

محمد یوسف زاده^۱ , الهام عظیم زاده^{۱*} , رعنا فیاض میلانی^۲ 

۱. گروه علوم رفتاری، شناختی و فناوری ورزشی، دانشکده علوم ورزشی و تندرستی، دانشگاه شهید بهشتی، تهران، ایران

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

چکیده

زمینه و هدف: دوره پیش از بلوغ یکی از دوره‌های حساس رشد مغز و شکل‌گیری الگوهای حرکتی است. با این حال، تأثیر ماندگار انواع مختلف تمرینات ورزشی در این دوره بر عملکرد حرکتی در بزرگسالی کمتر بررسی شده است. هدف این تحقیق تعیین تأثیر سه هفته تمرین اختیاری، اجباری و بازی در محیط غنی در دوره پیش از بلوغ بر عملکرد حرکتی در آزمون میدان باز در رت‌های نر بالغ بود.

مواد و روش‌ها: ۲۴ سر رت نر نژاد ویستار (سن ۲۸ روزگی) به طور تصادفی به چهار گروه مساوی کنترل، تمرین اختیاری، تمرین اجباری و بازی در محیط غنی تقسیم شدند. گروه اختیاری به مدت سه هفته (۶ روز در هفته) دسترسی آزادانه ۲۴ ساعته به چرخ گردان داشت. گروه اجباری بر اساس میانگین مسافت روزانه و سرعت ثبت شده در گروه اختیاری با سرعت‌های متناظر و در سه وعده روزانه به مدت ۱۸ جلسه روی چرخ گردان‌های اجباری به تمرین پرداختند. گروه محیط غنی به مدت ۴ ساعت در روز، ۶ روز در هفته، به قفس غنی شده دسترسی داشت. عملکرد حرکتی با آزمون میدان باز در روزهای ۵۰، ۶۵، ۸۰ و ۹۵ اندازه‌گیری شد. وزن بدن و مصرف غذا نیز در طول مطالعه ثبت گردید. داده‌ها با آنوای یک‌طرفه و آزمون تعقیبی توکی در سطح (۰/۰۵) تحلیل شدند.

نتایج: در هر چهار نوبت اندازه‌گیری عملکرد حرکتی، بین گروه‌ها تفاوت معنی‌داری وجود داشت. در روز ۵۰، گروه محیط غنی (5883 ± 440 سانتی‌متر) و اختیاری (5269 ± 342 سانتی‌متر) بیشترین و کنترل (2751 ± 904 سانتی‌متر) کمترین مسافت را طی کردند. محیط غنی عملکرد بهتری نسبت به هر دو گروه اجباری ($P=0/01$) و اختیاری ($P=0/042$) داشت. در روز ۹۵، محیط غنی (5726 ± 275 سانتی‌متر) همچنان بالاترین عملکرد را حفظ کرد. بین گروه اختیاری و اجباری در هیچ زمانی تفاوت معنی‌داری دیده نشد. در مصرف غذا، گروه کنترل در دوره بدون تمرین (۵۰-۹۵ روزگی) به طور معنی‌داری بیشتر از هر سه گروه آزمایشی غذا مصرف کرد ($P=0/009$). در حالی که در دوره تمرین (۵۰-۲۸ روزگی) فقط تفاوت بین کنترل و اجباری معنی‌دار بود ($P=0/036$). در وزن بدن، گروه کنترل در روزهای ۸۰ و ۹۵

به طور معنی داری وزن بیشتری نسبت به هر سه گروه آزمایشی داشت ($P=0/012$). همچنین در روز ۹۵، گروه محیط غنی وزن بیشتری نسبت به گروه اجباری داشت ($P=0/015$).

نتیجه گیری: سه هفته تمرین در دوره پیش از بلوغ، به ویژه بازی در محیط غنی، اثرات ماندگاری بر بهبود عملکرد حرکتی تا اوایل بزرگسالی دارد. با همسان سازی حجم و شدت تمرین، تفاوت معنی داری بین اثرات تمرین اختیاری و اجباری بر عملکرد حرکتی مشاهده نشد. غنی سازی محیطی یک راهبرد مؤثر برای بهبود طولانی مدت عملکرد حرکتی است. مداخلات تمرینی با کاهش وزن بدن و مصرف غذا در دوره پیگیری همراه بودند.

واژه های کلیدی: محیط غنی، تمرین اجباری، عملکرد حرکتی، میدان باز

نحوه استناد به این مقاله: یوسف زاده م، عظیم زاده الف، فیاض میلانی ر. تأثیر سه هفته تمرین اختیاری، اجباری و بازی در محیط غنی در دوره پیش از بلوغ بر عملکرد حرکتی رت های نر بالغ: یک مطالعه طولی. نشریه فیزیولوژی ورزش و فعالیت بدنی. ۱۴۰۵؛ ۱۹(۳): ۴-۹.

* رایانامه نویسنده مسئول: e_azimzadeh@sbu.ac.ir

تاریخ پذیرش: ۱۴۰۴/۰۰/۰۰

تاریخ ویرایش: ۱۴۰۴/۰۰/۰۰

تاریخ دریافت: ۱۴۰۴/۰۰/۰۰

مقدمه

دوره پیش از بلوغ یکی از حساس ترین مراحل رشد و تکامل سیستم عصبی مرکزی به شمار می رود. فرایندهایی همچون نورون زایی، سیناپتوژنز و میلین سازی در این دوره از حداکثر انعطاف پذیری برخوردارند و تأثیرپذیری آنها از محرک های محیطی به مراتب بیشتر از سایر دوره های رشدی است (۱). مطالعات انسانی و حیوانی نشان داده اند که تجربیات اولیه زندگی، به ویژه فعالیت بدنی منظم، می تواند تغییرات ماندگاری در ساختار و عملکرد سیستم حرکتی ایجاد کند که تا بزرگسالی ادامه می یابد (۲). در رت های نژاد ویستار، دوره پیش از بلوغ تا حدود ۴۵ روزگی و بلوغ جنسی بین ۴۵ تا ۶۰ روزگی آغاز می شود (۳). در این دوره حساس، انعطاف پذیری عصبی در اوج بوده و فعالیت بدنی می تواند تأثیرات ماندگاری بر سیستم حرکتی ایجاد کند (۴). از این رو، بررسی اثرات تمرینات در این دوره و پیگیری آن تا اوایل بزرگسالی (۹۰ روزگی) امکان ارزیابی دقیق تری از ماندگاری سازگاری های ناشی از ورزش را فراهم می آورد. در میان مداخلات رفتاری مؤثر بر رشد حرکتی، ورزش و فعالیت بدنی جایگاه ویژه ای دارند. شواهد گسترده نشان می دهد که فعالیت ورزشی منظم نه تنها بر سلامت جسمانی، بلکه بر عملکردهای حرکتی نیز تأثیر مثبت دارد (۵). عملکرد حرکتی که در آزمون میدان باز با شاخص هایی همچون مسافت پیموده شده، سرعت حرکت و زمان فعالیت سنجیده می شود، بیانگر توانایی جانور در کنترل و هماهنگی حرکت در یک محیط جدید است (۶). مطالعات پیشین نشان داده اند مسافت طی شده در آزمون میدان باز همبستگی مثبتی با میزان فعالیت بدنی روزانه دارد و می تواند به عنوان شاخص معتبر از عملکرد حرکتی در نظر گرفته شود (۷). تمرین اختیاری معمولاً از طریق قرار دادن حیوان در قفس مجهز به چرخ گردان با دسترسی آزادانه انجام می شود. در این مدل، حیوان بر اساس انگیزه درونی خود، زمان، شدت و مدت فعالیت را تعیین می کند. مطالعات نشان داده اند که دویدن اختیاری در چرخ گردان با افزایش فعالیت حرکتی در محیط باز همراه است (۸). در مقابل، تمرین اجباری معمولاً با استفاده از تردمیل و با سرعت و مدت زمان تعیین شده توسط پژوهشگر اجرا می شود. تحقیقات نشان داده اند که تمرین اجباری با شدت مناسب می تواند عملکرد حرکتی را در مدل های مختلف بهبود بخشد (۹). یکی از چالش های اساسی در مقایسه این دو مدل تمرینی، تفاوت ذاتی در حجم و شدت فعالیت است، چرا که حیوانات در گروه اختیاری معمولاً مسافت بیشتری نسبت به گروه اجباری طی می کنند. این تفاوت می تواند به تنهایی عامل اصلی تفاوت در پیامدهای حرکتی باشد، نه نوع تمرین به خودی

خود (۱۰). از این رو، پژوهش حاضر با هدف همسان‌سازی حجم و شدت تمرین بین دو گروه، به مقایسه مستقیم اثرات این دو مدل تمرینی بر عملکرد حرکتی پرداخته است. در این راستا، شواهد نشان می‌دهد که سطح دوپامین و گیرنده‌های آن در ناحیه استریاتوم نقش مهمی در تعدیل عملکرد حرکتی در دوره نوجوانی ایفا می‌کند (۱۱). همچنین، پاسخ‌های حرکتی به تمرینات اجباری و اختیاری می‌تواند از نظر مکانیسم‌های عصبی در نواحی مختلف مغز متفاوت باشد (۸). تمرین اجباری معمولاً با فعال‌سازی محور هیپوتالاموس-هیپوفیز-آدرنال و افزایش ترشح کورتیکواسترون همراه است که در صورت شدت بالا می‌تواند اثرات منفی بر عملکرد حرکتی داشته باشد (۱۲). در مقابل، تمرین اختیاری به دلیل لذت‌بخش بودن و فعال‌سازی سیستم پاداش مغزی، با پاسخ استرسی کمتری همراه است و می‌تواند از طریق افزایش فاکتورهای نوروتروفیک، عملکرد حرکتی را بهبود بخشد. (۱۳) با این حال، در صورت همسان‌سازی مناسب حجم و شدت تمرین و در نظر گرفتن دوره سازگاری، می‌توان اثرات منفی ناشی از استرس تمرین اجباری را به حداقل رساند و مقایسه مستقیم‌تری از اثرات این دو نوع تمرین بر عملکرد حرکتی انجام داد (۱۲).

غنی‌سازی محیطی رویکردی متفاوت از تمرینات ساختاریافته است. در این روش، حیوانات در قفس‌های بزرگ با انواع وسایل بازی، نردبان، چرخ‌های گردان و اشیاء متحرک قرار می‌گیرند و شرایط برای فعالیت بدنی خودبه‌خودی، کنجکاوی و اکتشاف فراهم می‌شود (۱۴). مطالعات نشان داده‌اند که غنی‌سازی محیطی از طریق تحریک چندحسی و افزایش فعالیت بدنی خودبه‌خودی، می‌تواند اثرات مفید و ماندگاری بر عملکرد حرکتی داشته باشد (۱۵). قرار گرفتن در معرض محیط غنی با افزایش مصرف گلوکز در نواحی مرتبط با حرکت و پاداش مغز همراه است که نشان‌دهنده فعال‌سازی سیستم حرکتی در این شرایط است (۱۶). یکی از پرسش‌های اساسی در حوزه فیزیولوژی ورزش، میزان ماندگاری اثرات مداخلات تمرینی پس از قطع دوره تمرین و به خصوص انتقال سازگاری‌های به دست آمده از دوران کودکی به دوران بعد از بلوغ است. شواهد نشان می‌دهد که فعالیت ورزشی در دوره کودکی و نوجوانی ممکن است اثرات طولانی‌مدتی بر عملکرد حرکتی داشته باشد (۱۷). در همین راستا، تحقیقات نشان داده‌اند که تمرینات تکنیکی و مهارت‌های حرکتی در دوره پیش از بلوغ اثرات ماندگاری ایجاد می‌کنند، هرچند که مزایای حاصل از تمرینات آمادگی جسمانی و قدرتی در صورت عدم تداوم به سرعت از بین می‌رود (۱۸). با وجود پیشرفت‌های قابل توجه در فهم اثرات فعالیت ورزشی بر سیستم حرکتی، کاستی‌های متعددی در ادبیات پژوهشی وجود دارد. اغلب مطالعات اثرات تمرین اختیاری و اجباری را بدون همسان‌سازی حجم و شدت تمرین مقایسه کرده‌اند، به طوری که گروه اختیاری به طور طبیعی مسافت بیشتری را طی می‌کرده است و این امر تفسیر نتایج را با ابهام مواجه می‌کند که آیا تفاوت مشاهده شده ناشی از نوع تمرین است یا صرفاً تفاوت در دوز تمرین. از سوی دیگر، مطالعات طولی که به بررسی ماندگاری اثرات تمرینات پیش از بلوغ تا اوایل بزرگسالی پرداخته باشند، بسیار محدود است و مقایسه مستقیم سه مدل تمرینی (اختیاری، اجباری و غنی‌سازی محیطی) با کنترل همزمان حجم تمرین در یک مطالعه واحد، کمتر انجام شده است. با وجود این مزایا، هنوز مشخص نیست که آیا مزایای حرکتی ناشی از این سه نوع مداخله در دوره پیش از بلوغ، تا اوایل بزرگسالی تداوم می‌یابد و کدام یک از این مدل‌های تمرینی تأثیر ماندگارتری بر عملکرد حرکتی دارد. از این رو، پژوهش حاضر با هدف تعیین تأثیر سه هفته تمرین اختیاری، اجباری و بازی در محیط غنی در دوره پیش از بلوغ بر عملکرد حرکتی در آزمون میدان باز در رت‌های نر بالغ طراحی شد.

روش پژوهش

نمونه‌های پژوهش: پژوهش حاضر از نوع تجربی و با طرح پیش‌آزمون-پس‌آزمون همراه با گروه کنترل بود. جامعه آماری این مطالعه را رت‌های نر نژاد ویستار تشکیل دادند. تعداد ۲۴ سر رت نر نژاد ویستار با سن ۲۰ روزگی (وزن 26 ± 3 گرم) از مؤسسه تحقیقاتی رازی خریداری و به آزمایشگاه حیوانات دانشکده علوم ورزشی دانشگاه شهید بهشتی منتقل شدند. حیوانات تا سن ۲۷ روزگی در کنار مادر خود بودند و دوره سازگاری با محیط آزمایشگاه را سپری کردند. رت‌ها به طور تصادفی به چهار گروه ۶ تایی تقسیم شدند: گروه کنترل (تعداد=۶) (بدون هیچ مداخله تمرینی)، گروه تمرین اختیاری (تعداد=۶)، گروه تمرین اجباری (تعداد=۶) و گروه بازی در محیط غنی (تعداد=۶). گروه کنترل نیز مانند سایر گروه‌ها به مدت سه هفته در قفس استاندارد ($42 \times 17 \times 15$ سانتی‌متر) و به صورت تکی نگهداری شدند. سایر گروه‌ها به مدت ۲۱ روز و ۶ روز در هفته فعالیت داشتند. دمای محیط در تمام طول مطالعه 21 ± 2 درجه سانتی‌گراد، رطوبت 45 ± 5 درصد و چرخه روشنایی-تاریکی ۱۲ ساعت (۸ صبح خاموشی، ۸ شب روشنایی) تنظیم شد. تمامی رت‌ها به طور نامحدود به آب

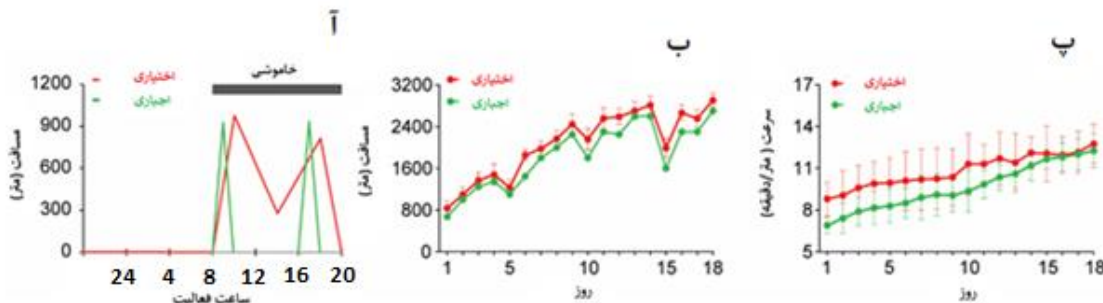
و غذای استاندارد دسترسی داشتند (۱۹). تمامی مراحل این پژوهش مطابق با قوانین نگهداری از حیوانات آزمایشگاهی و با تأیید کمیته اخلاق در پژوهش دانشگاه شهید بهشتی کد اخلاق (IR.SBU.REC.1402.153) انجام شد.

روش اجرای پژوهش: تمرین اختیاری

در این نوع تمرین، هر رت در قفس استاندارد قرار داده شد که به یک چرخ گردان مجهز بود. رت‌ها به مدت ۲۴ ساعت در روز دسترسی آزادانه به چرخ گردان داشتند. هر دور چرخ گردان معادل ۱ متر جابجایی بود و چرخ با فشار ۵ گرم شروع به چرخیدن می‌کرد. تعداد دورها و زمان ثبت دورها توسط یک سنسور ثبت و در مانیتور دستگاه نشان داده می‌شد. مسافت، زمان و سرعت متوسط روزهای تمرین در شکل ۱ نشان داده شده است (۲۰). میانگین مسافت روزانه گروه اختیاری در طول سه هفته تمرین برابر ۲۰۵۵ متر و میانگین سرعت متوسط برابر ۱۰۰۲ متر بر دقیقه بود.

تمرین اجباری

رت‌های گروه تمرین اجباری با فاصله یک روز بعد از گروه اختیاری تمرین خود را آغاز کردند. پروتکل تمرین به گونه‌ای طراحی شد که هر روز به اندازه میانگین مسافت طی شده در دو زمان اوج فعالیت با میانگین سرعت متوسط گروه تمرین اختیاری، روی چرخ گردان‌های اجباری (شرکت تجهیز گستر امید ایرانیان) به فعالیت بپردازند. چرخ گردان‌های اجباری به گونه‌ای تنظیم شده بود که رت می‌توانست با سرعت بالاتر از سرعت تعیین شده نیز تمرین کند اما از سرعت تعیین شده نمی‌توانست پایین‌تر بیاید هر دور چرخ گردان برابر با یک متر جابجایی بود که سرعت آن بر اساس دور بر دقیقه قابل تنظیم بود. برای تحریک و جلوگیری از استراحت رت‌ها در روزهای ابتدایی از پمپ باد استفاده شد. تمرین در سه وعده صبح (۹:۳۰-۸:۳۰)، ظهر (۱۳-۱۲) و بعدازظهر (۱۷:۳۰-۱۶:۳۰) انجام شد. میانگین مسافت روزانه گروه اجباری برابر ۱۸۳۳ متر و میانگین سرعت متوسط برابر ۹۰۹ متر بر دقیقه بود. در (شکل ۱) روند تغییرات مسافت و سرعت دو گروه اختیاری و اجباری را در طول ۱۸ جلسه تمرین نشان می‌دهد. روند تغییرات مسافت و سرعت در گروه تمرین اجباری و اختیاری در شکل ۱ نشان داده شده است.



شکل ۱. روند تغییرات مسافت، سرعت و زمان فعالیت در گروه تمرین اجباری و اختیاری

آ: نمودار زمان فعالیت در ساعات مختلف دو گروه اجباری و اختیاری. ب: نمودار میانگین و انحراف معیار مسافت روزانه دو گروه اجباری و اختیاری. پ: نمودار میانگین و انحراف معیار سرعت دو گروه اختیاری و اجباری

بازی در محیط غنی

رت‌های گروه محیط غنی به مدت ۴ ساعت در روز، ۶ روز در هفته، به صورت دسته‌جمعی به یک قفس غنی شده (ابعاد ۹۰×۶۰×۴۰ سانتی‌متر در سه طبقه) دسترسی داشتند. این قفس شامل انواع وسایل بازی، نردبان، چرخ گردان، طناب، توپ و تونل بود. به منظور

تحریک بیشتر، روزانه جای وسایل و رنگ اشیاء تغییر داده می‌شد. زمان قرارگیری رت‌ها در محیط غنی به صورت چرخشی و در ساعات خاموشی (مطابق با ساعات تمرین گروه‌های اجباری و اختیاری) تنظیم شد (۲۱، ۲۲).

روش‌های آزمایشگاهی:

اندازه‌گیری عملکرد حرکتی (آزمون میدان باز)

برای سنجش عملکرد حرکتی از آزمون میدان باز استفاده شد. دستگاه میدان باز شامل یک جعبه مربعی شکل با ابعاد $90 \times 90 \times 50$ سانتی‌متر بود که به 25 مربع 18×18 سانتی‌متری تقسیم شده بود. هر رت به مدت 5 دقیقه در جعبه قرار داده شد و حرکات آن توسط یک دوربین مجهز به مادون قرمز فیلمبرداری و با نرم‌افزار نوروویژن تحلیل شد. پارامتر اصلی مورد ارزیابی برای عملکرد حرکتی، مسافت کل طی شده (بر حسب سانتی‌متر) بود (۶). آزمون میدان باز در چهار نوبت انجام شد: روز 50 (۴۸ ساعت پس از آخرین جلسه تمرین)، روز 65 (۱۵ روز پس از پایان تمرین)، روز 80 (۳۰ روز پس از پایان تمرین) و روز 95 (۴۵ روز پس از پایان تمرین).

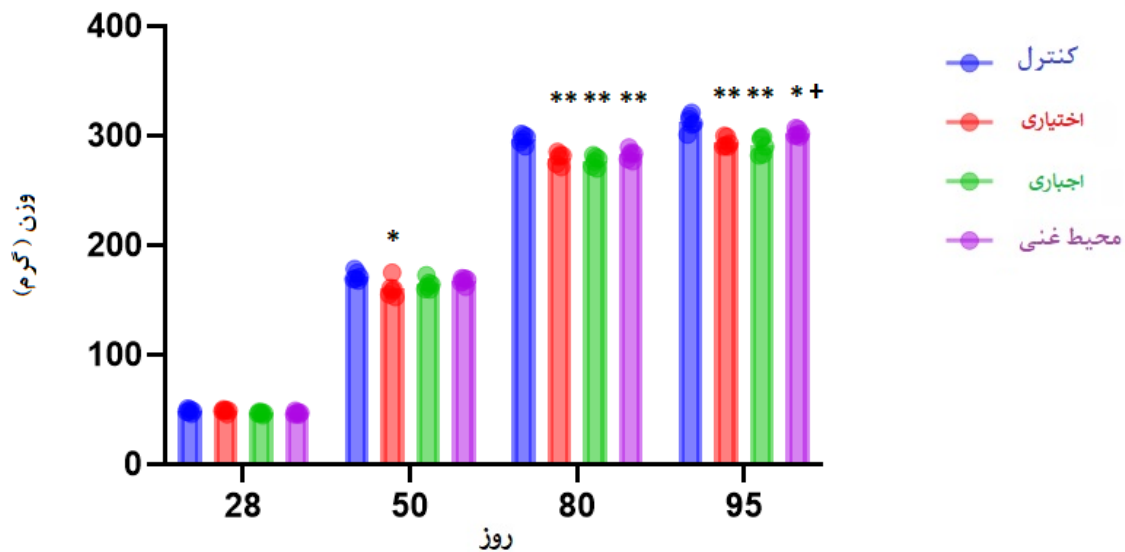
اندازه‌گیری وزن بدن و مصرف غذا

وزن بدن رت‌ها در روزهای 28 ، 50 ، 80 و 95 با استفاده از ترازو دیجیتال با دقت 0.1 اندازه‌گیری شد. مصرف غذا نیز در دو دوره $28-50$ روزگی و $95-80$ روزگی به صورت میانگین گرم در روز به ازای هر رت محاسبه گردید.

تحلیل آماری: داده‌ها با استفاده از نرم‌افزار SPSS نسخه ۲۶ تحلیل شدند. ابتدا نرمال بودن توزیع داده‌ها با استفاده از آزمون شاپیرو-ویلک تأیید گردید. برای مقایسه عملکرد حرکتی، وزن بدن و مصرف غذا بین چهار گروه در هر مقطع زمانی، از آزمون آنالیز واریانس یک‌طرفه (ANOVA) استفاده شد. در صورت معنی‌دار شدن تفاوت بین گروه‌ها، آزمون تعقیبی توکی (Tukey) برای مقایسه‌های دوتایی به کار رفت. سطح معنی‌داری برای همه آزمون‌ها 0.05 در نظر گرفته شد.

نتایج

میانگین و انحراف معیار وزن بدن چهار گروه در روزهای 28 ، 50 ، 80 و 95 در شکل ۱ ارائه شده است. نتایج آنالیز واریانس یک‌طرفه نشان داد که در روز 28 (شروع مطالعه)، تفاوت معنی‌داری بین گروه‌ها وجود نداشت ($P=0.064$). در روز 50 تفاوت معنی‌داری بین گروه‌ها مشاهده شد ($P=0.016$) و آزمون تعقیبی توکی نشان داد که گروه کنترل به طور معنی‌داری وزن بیشتری نسبت به گروه اختیاری داشت ($P=0.022$). در روز 80 تفاوت معنی‌داری بین گروه‌ها وجود داشت ($P=0.001$) و گروه کنترل به طور معنی‌داری وزن بیشتری نسبت به هر سه گروه آزمایشی داشت ($P>0.001$). در روز 95 نیز تفاوت معنی‌داری بین گروه‌ها مشاهده شد ($P=0.001$) و گروه کنترل به طور معنی‌داری وزن بیشتری نسبت به گروه‌های اختیاری ($P=0.001$)، اجباری ($P=0.001$) و محیط غنی ($P=0.024$) داشت. همچنین در روز 95 ، گروه محیط غنی به طور معنی‌داری وزن بیشتری نسبت به گروه اجباری داشت ($P=0.015$). نتایج کامل مقایسه‌های دوتایی در شکل ۲ ارائه شده است.



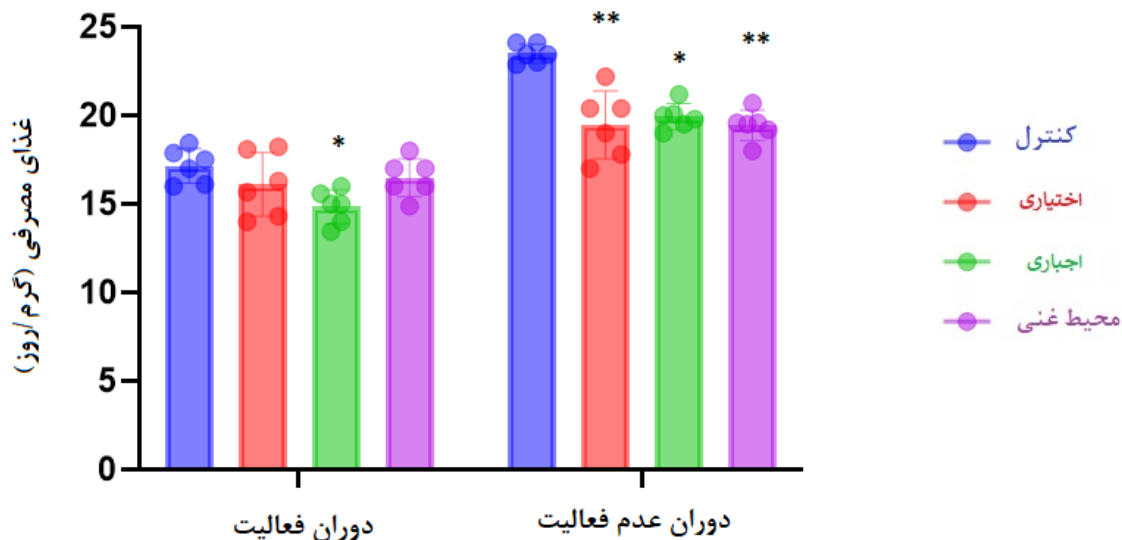
شکل ۲. نمودار میانگین وزن (گرم) در روزهای مختلف

*: معنی داری نسبت به گروه کنترل ($P < 0.05$). **: معنی داری نسبت به گروه کنترل ($P < 0.01$). +: معنی داری نسبت به گروه اجباری ($P < 0.05$)

میانگین و انحراف معیار مصرف غذای روزانه (گرم در روز) به ازای هر رت در دو دوره ۲۸-۵۰ روزگی (دوره فعالیت) و ۵۰-۹۵ روزگی (دوره عدم فعالیت) در شکل ۳ ارائه شده است.

در دوره فعالیت (۲۸-۵۰ روزگی)، نتایج آنالیز واریانس یک طرفه تفاوت معنی داری بین چهار گروه نشان داد ($P = 0.009$). آزمون تعقیبی توکی نشان داد که گروه کنترل (۱۷/۱۶ گرم در روز) به طور معنی داری ($P = 0.036$) بیشتر از گروه تمرین اجباری (۱۴/۸۴ گرم در روز). غذا مصرف کرد. تفاوت معنی داری بین سایر گروهها مشاهده نشد.

در دوره عدم فعالیت (۵۰-۹۵ روزگی)، تفاوت معنی داری بین گروهها وجود داشت ($P < 0.01$) گروه کنترل (۲۳/۵۱ گرم در روز) به طور معنی داری ($P < 0.01$) بیشتر از گروههای تمرین اختیاری (۱۹/۴۷ گرم در روز)، تمرین اجباری (۱۹/۹۳ گرم در روز)، و محیط غنی (۱۹/۴۳ گرم در روز)، ($P < 0.002$) غذا مصرف کرد. بین سه گروه آزمایشی تفاوت معنی داری مشاهده نشد.



شکل ۳. نمودار میانگین و انحراف معیار مصرف غذا در دوره فعالیت و عدم فعالیت

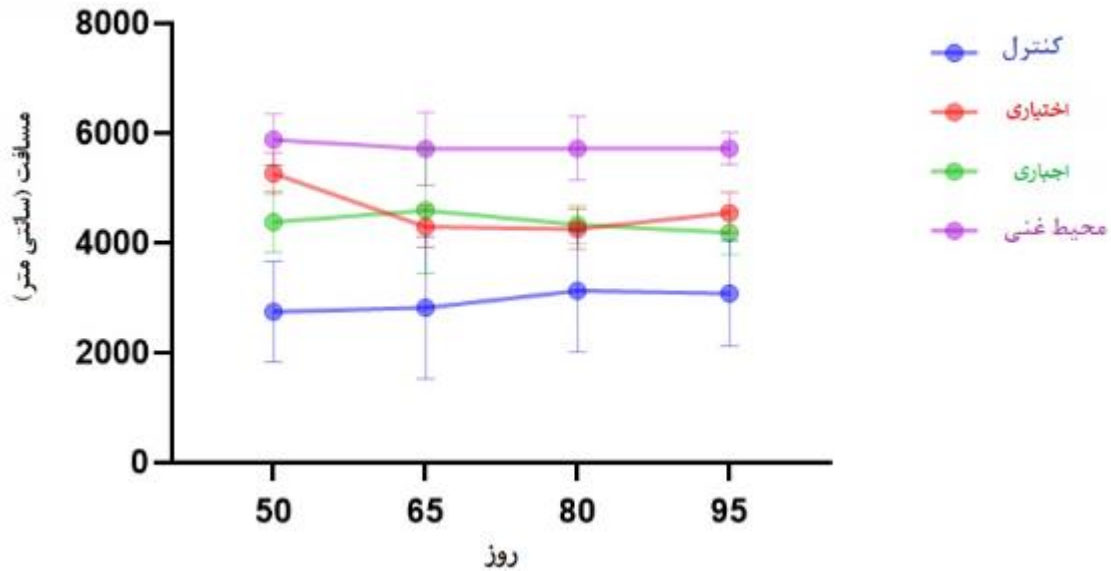
*: معنی داری نسبت به گروه کنترل ($P < 0.05$). **: معنی داری نسبت به گروه کنترل ($P < 0.01$)

میانگین و انحراف معیار مسافت طی شده (سانتی متر) چهار گروه در روزهای ۵۰، ۶۵، ۸۰ و ۹۵ در شکل ۴ ارائه شده است. نتایج آنالیز واریانس یک طرفه نشان داد که در هر چهار نوبت اندازه گیری، تفاوت معنی داری بین گروه ها وجود داشت ($P = 0.001$). در روز ۵۰ (بلافاصله پس از دوره تمرین)، گروه محیط غنی (5883 ± 440 سانتی متر) و تمرین اختیاری (5269 ± 342) به ترتیب بیشترین و گروه کنترل (2751 ± 904) کمترین مسافت را طی کردند. آزمون تعقیبی توکی نشان داد که گروه محیط غنی به طور معنی داری مسافت بیشتری نسبت به هر دو گروه تمرین اجباری (4385 ± 540)، ($P = 0.001$) و اختیاری ($P = 0.042$) طی کرد. همچنین هر سه گروه آزمایشی عملکرد بهتری نسبت به گروه کنترل داشتند ($P < 0.05$) تفاوت معنی داری بین گروه های تمرین اختیاری و اجباری مشاهده نشد ($P = 0.1$).

در روز ۶۵ (۱۵ روز پس از پایان تمرین)، گروه محیط غنی (5714 ± 638) همچنان بالاترین عملکرد را داشت و تفاوت آن با گروه کنترل معنی دار بود ($P = 0.001$). گروه های اختیاری (4296 ± 379) و اجباری (4595 ± 1080) نیز عملکرد بهتری نسبت به گروه کنترل داشتند ($P < 0.05$) تفاوت معنی داری بین سه گروه آزمایشی مشاهده نشد.

در روز ۸۰ (۳۰ روز پس از پایان تمرین)، الگوی مشابهی مشاهده شد. گروه محیط غنی (5726 ± 544) بالاترین عملکرد را داشت و تفاوت آن با گروه کنترل معنی دار بود ($P = 0.001$). گروه های اختیاری (4254 ± 314) و اجباری (4335 ± 338) نیز عملکرد بهتری نسبت به گروه کنترل داشتند ($P < 0.05$).

در روز ۹۵ (۴۵ روز پس از پایان تمرین - اوایل بزرگسالی)، گروه محیط غنی (5726 ± 275) همچنان بالاترین عملکرد را حفظ کرده بود و تفاوت آن با گروه کنترل (3084 ± 934) معنی دار بود ($P = 0.001$). گروه های اختیاری (4547 ± 368) و اجباری (4192 ± 387) نیز عملکرد بهتری نسبت به گروه کنترل داشتند ($P < 0.05$). تفاوت معنی داری بین گروه های اختیاری و اجباری در هیچ یک از زمان ها مشاهده نشد.



شکل ۴. نمودار عملکرد حرکتی (آزمون میدان باز)

روند تغییرات میانگین مسافت طی شده (سانتی‌متر) در تست میدان باز در چهار گروه (کنترل، اختیاری، اجباری و محیط غنی) در روزهای ۵۰، ۶۵، ۸۰ و ۹۵، داده‌ها به صورت میانگین $\pm$ انحراف معیار ارائه شده است. تفاوت معنی‌داری بین گروه‌ها در تمام مقاطع زمانی وجود داشت. ($P=0/001$) گروه محیط غنی بالاترین عملکرد را در تمام زمان‌ها داشت. هر سه گروه آزمایشی عملکرد بهتری نسبت به گروه کنترل نشان داد ($P<0/05$). تفاوت معنی‌داری بین گروه‌های اختیاری و اجباری مشاهده نشد.

به منظور بررسی ارتباط بین متغیرهای پژوهش، از ضریب همبستگی پیرسون استفاده شد. نتایج در جدول ارائه شده است.

بین مصرف غذا در دوره اول (۵۰-۲۸ روزگی) و وزن بدن در روز ۵۰ همبستگی مثبت و معنی‌داری وجود داشت ($P=0/021$). همچنین بین مصرف غذا در دوره دوم (۹۵-۵۰ روزگی) و وزن بدن در روز ۹۵ نیز همبستگی مثبت و معنی‌داری مشاهده شد ($r=0/62$ ، $P=0/008$).

بین وزن بدن و عملکرد حرکتی (مسافت طی شده در میدان باز) در هیچ یک از مقاطع زمانی (روزهای ۵۰، ۸۰ و ۹۵) همبستگی معنی‌داری یافت نشد.

بین مصرف غذا (در هر دو دوره) و عملکرد حرکتی (در روزهای ۵۰ و ۹۵) نیز همبستگی معنی‌داری مشاهده نشد.

جدول ۱. نتایج ضریب همبستگی پیرسون

متغیر Y	متغیر X	ضریب همبستگی پیرسون r	P-value
مصرف غذا (دوران فعالیت)	وزن (۵۰ روزگی)	۰/۵۳	* ۰/۰۲۱
مصرف غذا (دوران عدم فعالیت)	وزن (۹۵ روزگی)	۰/۶۲	** ۰/۰۰۸
وزن (۵۰ روزگی)	عملکرد حرکتی (روز ۵۰)	۰/۱۸	۰/۳۴۲
وزن (۸۰ روزگی)	عملکرد حرکتی (روز ۸۰)	۰/۱۴	۰/۴۲۱
وزن (۹۵ روزگی)	عملکرد حرکتی (روز ۹۵)	۰/۲۰	۰/۲۸۷
مصرف غذا (دوران فعالیت)	عملکرد حرکتی (روز ۵۰)	۰/۱۶	۰/۳۸۵
مصرف غذا (دوران عدم فعالیت)	عملکرد حرکتی (روز ۹۵)	۰/۱۵	۰/۴۱۲

*: ($P < 0.05$). **: ($P < 0.01$). ضرایب همبستگی پیرسون بین مصرف غذا، وزن بدن و عملکرد حرکتی. بین مصرف غذا و وزن بدن در هر دو دوره همبستگی مثبت و معنی داری وجود داشت. بین وزن بدن و عملکرد حرکتی در هیچ مقطعی همبستگی معنی داری مشاهده نشد. همچنین بین مصرف غذا و عملکرد حرکتی نیز همبستگی معنی داری یافت نشد.

نتیجه گیری

هدف از پژوهش حاضر تعیین تأثیر سه هفته تمرین اختیاری، اجباری و بازی در محیط غنی در دوره پیش از بلوغ بر عملکرد حرکتی در آزمون میدان باز در رت‌های نر بالغ بود. یافته‌های اصلی نشان داد که هر سه مداخله تمرینی به ویژه بازی در محیط غنی، عملکرد حرکتی را در دوره پیش از بلوغ بهبود می‌بخشند، این اثرات تا ۴۵ روز پس از پایان تمرین ماندگار است، تفاوت معنی داری بین اثرات تمرین اختیاری و اجباری مشاهده نشد، و غنی‌سازی محیطی مؤثرتر از هر دو نوع تمرین ساختاریافته بود.

عملکرد بسیار بالای گروه محیط غنی در روز ۵۰ (۵۸۸۳ سانتی‌متر) در مقایسه با گروه‌های اختیاری (۵۲۶۹ سانتی‌متر) و اجباری (۴۳۸۵ سانتی‌متر) یکی از یافته‌های قابل توجه این مطالعه بود. لازم به ذکر است که بخشی از این برتری عملکردی ممکن است ناشی از شرایط اجتماعی محیط غنی باشد، زیرا قرار گرفتن حیوانات به صورت دسته‌جمعی در طول دوره مداخله، امکان تعاملات اجتماعی، بازی و رقابت را فراهم کرده است که خود می‌تواند بر انگیزه حرکتی تأثیر مثبت بگذارد (۲۳). این یافته با نتایج پژوهش‌های جدیدتر که به برتری محیط غنی بر تمرینات ساختاریافته در بهبود عملکرد حرکتی اشاره کرده‌اند، همسو است. پژوهشگران نشان دادند که قرار گرفتن در معرض محیط غنی در رت‌های در حال رشد، با افزایش فعالیت بدنی خودبه‌خودی روزانه همراه است که به هیپرتروفی فیبرهای عضلانی کندانقباض منجر می‌شود (۲۴).

نکته جالب آنکه عملکرد این گروه در روز ۵۰ تقریباً معادل عملکرد نهایی آن در روز ۹۵ (۵۷۲۶ سانتی‌متر) بود، در حالی که گروه‌های اختیاری و اجباری در روز ۵۰ به عملکرد نهایی خود نرسیده بودند. این الگو نشان می‌دهد که محیط غنی توانسته است عملکرد حرکتی را در مدت زمان کوتاه‌تری به اوج برساند و این اوج عملکرد را تا ۴۵ روز پس از پایان تمرین حفظ کند. مطالعات پیشین نیز نشان داده‌اند که قرار گرفتن در معرض محیط غنی می‌تواند عملکرد حرکتی و یادگیری حرکتی را در شرایط چالش‌برانگیز بهبود بخشد (۲۵، ۲۶).

در این مطالعه، گروه محیط غنی به مدت ۴ ساعت در روز، ۶ روز در هفته، به قفس غنی شده دسترسی داشت. دلیل انتخاب دسترسی محدود، هماهنگی با ساعات اوج فعالیت دو گروه دیگر در شبانه روز (۲۰-۱۶ و ۱۲-۸) بود تا شرایط مداخله در سه گروه مشابه باشد. مطالعات نشان داده‌اند که غنی‌سازی محیطی مؤثر لزوماً به معنای دسترسی ۲۴ ساعته نیست و حتی مداخلات محدود نیز می‌توانند اثرات مثبت معناداری بر عملکرد حرکتی داشته باشند (۲۷). تنوع حرکتی بالا در محیط غنی (شامل پریدن، بالا رفتن، عبور از تونل،

حفظ تعادل) برخلاف تمرین اختیاری که محدود به دویدن روی چرخ گردان است و تمرین اجباری که دویدن با سرعت ثابت را شامل می‌شود (۲۸)، باعث درگیری گروه‌های عضلانی گسترده‌تر و ایجاد الگوهای حرکتی متنوع‌تر می‌شود. فعالیت بدنی خودبه‌خودی و بدون اجبار در محیط غنی، بر اساس انگیزه درونی حیوان و با لذت بیشتری همراه است که می‌تواند منجر به یادگیری سریع‌تر الگوهای حرکتی شود (۲۵، ۲۶).

عدم تفاوت معنی‌دار بین گروه‌های تمرین اختیاری و اجباری در هر چهار مقطع زمانی ($P > 0.05$) از دیگر یافته‌های مهم بود. مطالعه دیگری نشان داد که اجرای یک دوره سازگاری ۸ روزه با افزایش تدریجی سرعت و زمان دویدن، عملکرد حرکتی رت‌های نوجوان را بهبود می‌بخشد و سطوح استرس را در طول تمرین اجباری کاهش می‌دهد (۲۳). در بسیاری از مطالعات قبلی، مقایسه این دو مدل تمرینی بدون کنترل تفاوت‌های ذاتی در حجم، شدت و زمان تمرین انجام شده است. در شرایط طبیعی، حیوانات در گروه اختیاری مسافت بسیار بیشتری طی می‌کنند و تفاوت مشاهده شده در پیامدهای حرکتی می‌تواند به جای نوع تمرین، ناشی از تفاوت در دوز تمرین باشد. در پژوهش حاضر، تلاش شد این عامل مخدوش‌گر کنترل شود. میانگین مسافت روزانه گروه اختیاری ۲۰۵۵ متر و گروه اجباری ۱۸۳۳ متر بود که تفاوت قابل توجهی نداشت. همچنین گروه اجباری در سه وعده زمانی مشخص (مطابق با ساعات اوج فعالیت گروه اختیاری) تمرین کرد. با وجود همسان‌سازی مسافت و زمان، سرعت دویدن در دو گروه کاملاً یکسان نبود (۱۰۰۲ در مقابل ۹۰۹ متر بر دقیقه) اما این تفاوت به حدی نبود که بر عملکرد حرکتی تأثیر معنی‌داری بگذارد. این یافته نشان می‌دهد که وقتی حجم و زمان تمرین بین دو گروه همسان شود، تفاوت معنی‌داری در پیامدهای حرکتی مشاهده نمی‌شود و آنچه در بهبود عملکرد حرکتی نقش اساسی دارد، شاید مربوط به دوز تمرین است و نحوه اعمال آن تأثیر چندانی ندارد (۲۷).

ماندگاری اثرات هر سه مداخله تا ۴۵ روز پس از پایان تمرین از دیگر یافته‌های مهم بود. از منظر فیزیولوژیک، ماندگاری اثرات تمرینات پیش‌از بلوغ را می‌توان به تغییرات پایدار در سطح عضلات اسکلتی، دستگاه قلبی-تنفسی و سیستم عصبی مرکزی نسبت داد. پژوهش‌ها نشان داده‌اند که فعالیت بدنی منظم در دوره رشد با افزایش تراکم مویرگ‌ها در عضلات اسکلتی (افزایش رسانایی اکسیژن) و بهبود کارایی سیستم قلبی-تنفسی همراه است که این سازگاری‌ها حتی پس از قطع تمرین نیز تا حدی باقی می‌مانند (۲۷) -در سطح عصبی، پژوهشگران نشان دادند که قرار گرفتن در معرض محیط غنی با افزایش فعالیت بدنی خودبه‌خودی، منجر به هیپرتروفی فیبرهای عضلانی کندانقباض نوع (I و IIa) می‌شود که این تغییرات ساختاری می‌تواند زمینه‌ساز بهبود عملکرد حرکتی در بلندمدت باشد (۲۷). همچنین، تمرینات ورزشی از طریق سازوکارهای مرکزی با فعال‌سازی مسیرهای دوپامینرژیک و افزایش سطح فاکتورهای نوروتروفیک مانند BDNF در نواحی حرکتی مغز، به تثبیت الگوهای حرکتی یادگیری‌شده کمک می‌کنند و این تغییرات عصبی-شیمیایی می‌توانند تا اوایل بزرگسالی ادامه یابند (۲۳). در مجموع، به نظر می‌رسد ترکیب سازگاری‌های محیطی (افزایش ظرفیت هوازی و توزیع مجدد جریان خون) و مرکزی (تقویت مسیرهای پاداش و یادگیری حرکتی)، عامل اصلی ماندگاری اثرات مشاهده‌شده در این مطالعه است (۲۹). گروه کنترل در روز ۵۰ کمترین عملکرد را داشت (۲۷۵۱ سانتی‌متر) و تا روز ۹۵ افزایش جزئی (به ۳۰۸۴ سانتی‌متر) نشان داد که احتمالاً ناشی از بلوغ طبیعی سیستم حرکتی است. در مقابل، هر سه گروه آزمایشی عملکرد خود را در سطح بالاتری حفظ کردند. گروه محیط غنی عملکرد خود را تقریباً بدون کاهش حفظ کرد (از ۵۸۸۳ به ۵۷۲۶)، در حالی که گروه‌های اختیاری و اجباری کاهش جزئی نشان دادند. این الگو نشان می‌دهد که محیط غنی علاوه بر رساندن سریع‌تر عملکرد به اوج، پایداری بیشتری نیز دارد. ماندگاری اثرات را می‌توان به تغییرات تطابقی در سیستم عضلانی، بهبود کارایی سیستم قلبی-تنفسی و ماندگاری الگوهای حرکتی یادگیری‌شده نسبت داد (۳۰، ۳۱).

نتایج تحلیل همبستگی نشان داد که بین وزن بدن و عملکرد حرکتی در هیچ یک از مقاطع زمانی همبستگی معنی‌داری وجود نداشت در مقابل، بین مصرف غذا و وزن بدن همبستگی مثبت و معنی‌داری در هر دو دوره فعالیت و عدم فعالیت مشاهده شد. این یافته تأیید می‌کند که تفاوت‌های مشاهده شده در عملکرد حرکتی بین گروه‌ها نمی‌تواند ناشی از تفاوت در وزن بدن باشد و بهبود عملکرد حرکتی در گروه‌های آزمایشی مستقیماً ناشی از اثرات مفید مداخلات ورزشی بر سیستم حرکتی است. در گروه کنترل که بیشترین مصرف غذا و بیشترین وزن را داشت، عملکرد حرکتی به طور معنی‌داری پایین‌تر از گروه‌های آزمایشی بود که تأیید می‌کند کیفیت و نوع فعالیت از کمیت فیزیکی در تعیین عملکرد حرکتی مهم‌تر است.

پژوهش حاضر با محدودیت‌هایی همراه بود که می‌تواند در تعمیم‌پذیری نتایج مؤثر باشد. از جمله این محدودیت‌ها، عدم اندازه‌گیری حجم دقیق فعالیت بدنی در گروه محیط غنی است که در این مطالعه صرفاً بر اساس زمان قرارگیری در محیط (۴ ساعت در روز) برآورد شد. همچنین، حجم نمونه نسبتاً کوچک (۶=تعداد) در هر گروه قدرت آزمون‌های آماری را برای تشخیص تفاوت‌های ظریف محدود می‌کند. به علاوه، عدم اندازه‌گیری متغیرهای فیزیولوژیک تکمیلی مانند شاخص‌های قلبی-تنفسی و نشانگرهای خونی، امکان تبیین کامل مکانیسم‌های زیربنایی یافته‌ها را با محدودیت مواجه ساخته است. با وجود این محدودیت‌ها، یافته‌های مطالعه می‌تواند مبنایی برای پژوهش‌های آینده در این حوزه قرار گیرد. یافته‌های این مطالعه نشان می‌دهد که سه هفته تمرین در دوره پیش از بلوغ، به ویژه بازی در محیط غنی، می‌تواند اثرات ماندگاری بر بهبود عملکرد حرکتی تا اوایل بزرگسالی داشته باشد. با همسان‌سازی حجم و زمان تمرین، تفاوت معنی‌داری بین اثرات تمرین اختیاری و اجباری مشاهده نشد که نشان می‌دهد دوز تمرین نقش تعیین‌کننده‌تری نسبت به نوع تمرین دارد. عدم همبستگی بین وزن بدن و عملکرد حرکتی نیز تأیید می‌کند که بهبود عملکرد حرکتی مستقیماً ناشی از اثرات مداخلات ورزشی است. فراهم کردن محیط‌های غنی و متنوع حرکتی می‌تواند مؤثرترین راهبرد برای بهبود سریع و ماندگار عملکرد حرکتی در بلندمدت باشد.

تشکر و قدردانی

این مقاله برگرفته از پایان نامه کارشناسی ارشد است. از جناب آقای صابر ابراهیمی و سرکار خانم کیمیا احمدپور و تمامی عزیزانی که ما را در اجرای این پژوهش یاری رساندند، نهایت تشکر و قدردانی را داریم.

حمایت مالی

این پژوهش فاقد هرگونه حمایت مالی از سوی نهادها یا سازمان‌ها بوده و تمامی هزینه‌ها توسط نویسندگان تأمین شده است.

مشارکت نویسندگان

در این پژوهش نویسنده اول به عنوان دانشجوی کارشناسی ارشد، نویسنده دوم به عنوان استاد راهنما و نویسنده سوم به عنوان استاد مشاور مشارکت و همکاری داشته اند.

تعارض منافع

نویسندگان پژوهش هیچ‌گونه تعارض منافع ندارند.

منابع

1. Semple BD, Blomgren K, Gimlin K, Ferriero DM, Noble-Haeusslein LJ. Brain development in rodents and humans: Identifying benchmarks of maturation and vulnerability to injury across species. *Progress in neurobiology*. 2013;106:1-16. [10.1016/j.pneurobio.2013.04.001](https://doi.org/10.1016/j.pneurobio.2013.04.001)

2. Serra F, Carvalho A, Araujo B, Torres L, Cardoso F, Henrique J, et al. Early exercise induces long-lasting morphological changes in cortical and hippocampal neurons throughout of a sedentary period of rats. *Sci. Rep.* 9, 13684. 2019. [10.1038/s41598-019-50155-1](https://doi.org/10.1038/s41598-019-50155-1)
3. Semple BD, Blomgren K, Gimlin K, Ferriero DM, Noble-Haeusslein LJ. Brain development in rodents and humans: Identifying benchmarks of maturation and vulnerability to injury across species. 2013;106:1-16. [10.1016/j.pneurobio.2013.04.001](https://doi.org/10.1016/j.pneurobio.2013.04.001)
4. Serra FT, Carvalho AD, Araujo BHS, Torres LB, Cardoso FdS, Henrique JS, et al. Early exercise induces long-lasting morphological changes in cortical and hippocampal neurons throughout of a sedentary period of rats. 2019;9(1):13684. [10.1038/s41598-019-50155-1](https://doi.org/10.1038/s41598-019-50155-1)
5. Hillman CH, Erickson KI, Kramer AF. Be smart, exercise your heart: exercise effects on brain and cognition. *Nature reviews neuroscience*. 2008;9(1):58-65. [10.1038/nrn2298](https://doi.org/10.1038/nrn2298)
6. Prut L, Belzung CJ. The open field as a paradigm to measure the effects of drugs on anxiety-like behaviors: a review. 2003;463(1-3):3-33. [10.1016/S0014-2999\(03\)01272-X](https://doi.org/10.1016/S0014-2999(03)01272-X)
7. Ferreira JS, Junior JBL, de Mello Bastos JM, Samuels R, Carey RJ, Carrera MP, JoNM. A new method to study learning and memory using spontaneous locomotor activity in an open-field arena. 2022;366:109429. [10.1016/j.jneumeth.2021.109429](https://doi.org/10.1016/j.jneumeth.2021.109429)
8. Dishman RK, Dunn AL, Youngstedt SD, Davis JM, Burgess ML, Wilson SP, et al. Increased open field locomotion and decreased striatal GABAA binding after activity wheel running. 1996;60(3):699-705. [10.1016/0031-9384\(96\)00100-9](https://doi.org/10.1016/0031-9384(96)00100-9)
9. Ridgel AL, Vitek JL, Alberts JL, N. Forced, not voluntary, exercise improves motor function in Parkinson's disease patients. 2009;23(6):600-8. [10.1177/1545968308328733](https://doi.org/10.1177/1545968308328733)
10. Leisure JL, Jones MJN. Forced and voluntary exercise differentially affect brain and behavior. 2008;156(3):456-65. [10.1016/j.neuroscience.2008.07.053](https://doi.org/10.1016/j.neuroscience.2008.07.053)
11. Ayano GJJMDT. Dopamine: receptors, functions, synthesis, pathways, locations and mental disorders: review of literatures. 2016;2(120):2. [10.4172/2471-271X.1000120](https://doi.org/10.4172/2471-271X.1000120)
12. Toval Sanchez JA. Neural mechanisms mediating locomotor performance during forced wheel running in adolescent rats: stress responses and role of the dopaminergic system: Universidad de Murcia; 2021. [10.6018/analesps.497521](https://doi.org/10.6018/analesps.497521)
13. Bastioli G, Arnold JC, Mancini M, Mar AC, Gamallo-Lana B, Saadipour K, et al. Voluntary exercise boosts striatal dopamine release: evidence for the necessary and sufficient role of BDNF. 2022;42(23):4725-36. [10.1523/JNEUROSCI.2112-21.2022](https://doi.org/10.1523/JNEUROSCI.2112-21.2022)
14. Nithianantharajah J, Hannan AJ. Enriched environments, experience-dependent plasticity and disorders of the nervous system. *Nature Reviews Neuroscience*. 2006;7(9):697-709. [10.1038/nrn1975](https://doi.org/10.1038/nrn1975)
15. Gorantla VR, Thomas SE, Millis RM, Joer. Environmental enrichment and brain neuroplasticity in the kainate rat model of temporal lobe epilepsy. 2019;9(1):51. [10.31887/DCNS.2019.21.1/vgorantla](https://doi.org/10.31887/DCNS.2019.21.1/vgorantla)
16. Läck A, Gill K, Porrino LPB, Behavior. Local cerebral glucose utilization in rats exposed to an enriched environment: a comparison to impoverishment. 2010;96(4):521-5. [10.1016/j.pbb.2010.07.001](https://doi.org/10.1016/j.pbb.2010.07.001)
17. Helfer JL, Goodlett CR, Greenough WT, Klintsova AY, Br. The effects of exercise on adolescent hippocampal neurogenesis in a rat model of binge alcohol exposure during the brain growth spurt. 2009;1294:1-11. [10.1016/j.brainres.2009.07.062](https://doi.org/10.1016/j.brainres.2009.07.062)
18. Raudsepp L, Jürimäe T, Bos. Relationships between somatic variables, physical activity, fitness and fundamental motor skills in prepubertal boys. 1996;13:279-90. [10.1002/\(SICI\)1520-6300\(1997\)9:4<513::AID-AJHB11>3.0.CO;2-P](https://doi.org/10.1002/(SICI)1520-6300(1997)9:4<513::AID-AJHB11>3.0.CO;2-P)
19. Garrigos D, Martinez-Morga M, Toval A, Kutsenko Y, Barreda A, Do Couto BR, et al. A Handful of Details to Ensure the Experimental Reproducibility on the FORCED Running Wheel in

- Rodents: A Systematic Review. *Front Endocrinol (Lausanne)*. 2021;12:638261. [10.3389/fendo.2021.638261](https://doi.org/10.3389/fendo.2021.638261)
20. Moradi-Kor N, Ghanbari A, Rashidipour H, Yousefi B, Bandegi AR, Rashidy-Pour AJH, et al. Beneficial effects of *Spirulina platensis*, voluntary exercise and environmental enrichment against adolescent stress induced deficits in cognitive functions, hippocampal BDNF and morphological remodeling in adult female rats. 2019;112:20-31. [10.1016/j.hbmd.2019.01.001](https://doi.org/10.1016/j.hbmd.2019.01.001)
 21. Singhal G, Jaehne EJ, Corrigan F, Baune BTJFicn. Cellular and molecular mechanisms of immunomodulation in the brain through environmental enrichment; 8:97:2014. [10.3389/fncel.2014.00097](https://doi.org/10.3389/fncel.2014.00097)
 22. Rostami S, Haghparast A, Fayazmilani RJBr. The downstream effects of forced exercise training and voluntary physical activity in an enriched environment on hippocampal plasticity in preadolescent rats. 2021;1759:147373. [10.1016/j.brainres.2021.147373](https://doi.org/10.1016/j.brainres.2021.147373)
 23. Toval Sánchez JÁ. Neural mechanisms mediating locomotor performance during forced wheel running in adolescent rats: Stress responses and role of the dopaminergic system. 2021. [10.6018/analesps.497521](https://doi.org/10.6018/analesps.497521)
 24. Sudo M, Kano Y, Ando SJFiP. The effects of environmental enrichment on voluntary physical activity and muscle mass gain in growing rats. 2023;14:1265871. [10.3389/fphys.2023.1265871](https://doi.org/10.3389/fphys.2023.1265871)
 25. Gentile A, Beheshti Z, Held JMJB, biology n. Enrichment versus exercise effects on motor impairments following cortical removals in rats. 1987;47(3):321-32. [10.1016/0091-3057\(87\)90242-9](https://doi.org/10.1016/0091-3057(87)90242-9)
 26. Madronal N, Lopez-Aracil C, Rangel A, del Rio JA, Delgado-Garcia JM, Gruart AJPo. Effects of enriched physical and social environments on motor performance, associative learning, and hippocampal neurogenesis in mice. 2010;5(6):e11130. [10.1371/journal.pone.0011130](https://doi.org/10.1371/journal.pone.0011130)
 27. Rostami S, Haghparast A, Fayazmilani R. The downstream effects of forced exercise training and voluntary physical activity in an enriched environment on hippocampal plasticity in preadolescent rats. *Brain Res*. 2021;1759:147373. [10.1016/j.brainres.2021.147373](https://doi.org/10.1016/j.brainres.2021.147373)
 28. Hassan MA, Liu W, McDonough DJ, Su X, Gao ZIJjoer, health p. Comparative effectiveness of physical activity intervention programs on motor skills in children and adolescents: a systematic review and network meta-analysis. 2022;19(19):11914. [10.3390/ijerph191911914](https://doi.org/10.3390/ijerph191911914)
 29. Dijkhuizen S, Van Ginneken L, Ijpelaar A, Koekkoek S, De Zeeuw C, Boele HJSr. Impact of enriched environment on motor performance and learning in mice. 2024;14(1):5962. [10.1038/s41598-024-56513-y](https://doi.org/10.1038/s41598-024-56513-y)
 30. Birat A, Garnier YM, Dupuy A, Bontemps B, Dodu A, Grossoeuvre C, et al. Neuromuscular Adaptations in Endurance-Trained Male Adolescents Versus Untrained Peers: A 9-Month Longitudinal Study. 2024;34(6):e14681. [10.1111/sms.14681](https://doi.org/10.1111/sms.14681)