Journal of North Khorasan University of Medical Sciences
No 57, Volume 15, Issue 1

Research Article

Effect of Eight Weeks of Interval Training on Amyloid Precursor Protein (APP) Gene Expression in Hippocampal Tissue in Methamphetamine-dependent Rats (Crystal)

Ahad Shafiei Bafti[1], Amir Hossein Haghighi[2*], Majid Asadi-Shekaari[3], Roya Askari[4], Hamid Marefati[4]

[1] Ph.D Student, Department of Exercise Physiology, Faculty of Sport Sciences, Hakim Sabzevari University, Sabzevar, Iran
[2] Professor, Department of Exercise Physiology, Faculty of Sport Sciences, Hakim Sabzevari University, Sabzevar, Iran.
[3] Professor, Neuroscience Research Center, Neuropharmacology Research Institute, Kerman University of Medical Sciences, Kerman, Iran
[4] Associate Professor, Department of Exercise Physiology, Faculty of Sport Sciences, Hakim Sabzevari University, Sabzevar, Iran

*Corresponding author: Amir Hossein Haghighi, Department of Exercise Physiology, Faculty of Sport Sciences, Hakim Sabzevari University, Sabzevar, Iran. E-mail: ah.haghighi@hsu.ac.ir

DOI: 10.32592/nkums.15.1.79

How to Cite this Article:
Shafiei Bafti A, Haghighi A H, Asadi-Shekaari M, Askari R, Marefati H. Effect of Eight Weeks of Interval Training on Amyloid Precursor Protein (APP) Gene Expression in Hippocampal Tissue in Methamphetamine-dependent Rats (Crystal). J North Khorasan Univ Med Sci. 2023;15(1):79-88. DOI: 10.32592/nkums.15.1.79

Received: 08 November 2022
Accepted: 06 February 2023

Keywords:
Amyloid precursor protein
Cognitive function
METH
Moderate interval training

Abstract

Introduction: Methamphetamine (METH) is a stimulant drug that causes memory and learning disorders. The present study aimed to investigate the effect of eight weeks of interval training on APP gene expression in hippocampal tissue and open field test in methamphetamine-dependent rats.

Method: In this experimental research, 32 rats were assigned to four equal groups of saline, primary methamphetamine (METH-1), methamphetamine+training (METH+MIT), and secondary methamphetamine (METH-2). The METH was injected at the dose of 5 mg/kg body weight for 21 days. The exercise program (5 sessions per week) included interval training (4 sets of 4 minutes with moderate intensity and 2 minutes of active rest between sets) on a treadmill. At the end of the injection and training period, the hippocampus tissue of the rats was extracted to evaluate gene expression changes. An open-field behavioral test was also conducted. The data were analyzed using the one-way ANOVA at the significance level of $P \leq 0.05$.

Results: Methamphetamine significantly increased APP gene expression in METH-1,2 groups compared to saline (respectively; $P \leq 0.007$ and $P \leq 0.005$). The total distance and movement speed of rats in METH-1 and 2 groups had a significant decrease compared to saline (respectively, $P \leq 0.004$ and $P \leq 0.026$). The MIT led to a significant reduction of APP compared to METH-1,2 groups (respectively, $P \leq 0.041$ and $P \leq 0.028$). Movement speed in the MIT group increased significantly compared to the METH-1 group ($P \leq 0.008$).

Conclusion: Methamphetamine reduced cognitive performance (learning and memory), and according to the results, MIT probably improved cognitive performance. Nonetheless, further studies are necessary to reach definitive conclusions.

[Downloaded from journal.nkums.ac.ir on 2026-11-15]

Copyright © *2023 The Author(s); Published by Journal of North Khorasan University of Medical Sciences. This is an open access article, distributed under the terms of the Creative Commons Attribution-NonCommercial 4.0 International License (http://creativecommons.org/licenses /by-nc/4.0/) which permits others to copy and redistribute material just in noncommercial usages, provided the original work is properly cited.*

مجله دانشگاه علوم پزشکی خراسان شمالی
دوره ۱۵، شماره ۱، بهار ۱۴۰۲

مقاله پژوهشی

بررسی اثر ۸ هفته تمرین تناوبی بر بیان ژن پروتئین پیش‌ساز آمیلوئید (APP) بافت هیپوکامپ درموش‌های صحرایی وابسته به متامفتامین (شیشه)

احد شفیعی بافتی[۱]، امیرحسین حقیقی[۲*]، مجید اسدی شکاری[۳]، رویا عسکری[۴]، حمید معرفتی[۴]

[۱] دانشجوی دکتری، گروه فیزیولوژی ورزشی، دانشکده علوم ورزشی، دانشگاه حکیم سبزواری، سبزوار، ایران
[۲] استاد، گروه فیزیولوژی ورزشی، دانشکده علوم ورزشی، دانشگاه حکیم سبزواری، سبزوار، ایران
[۳] استاد، مرکز تحقیقات علوم اعصاب، پژوهشکده نورو فارماکولوژی، دانشگاه علوم پزشکی کرمان، کرمان، ایران
[۴] دانشیار، گروه فیزیولوژی ورزشی، دانشکده علوم ورزشی، دانشگاه حکیم سبزواری، سبزوار، ایران
*نویسنده مسئول: امیرحسین حقیقی، گروه فیزیولوژی ورزشی، دانشکده علوم ورزشی، دانشگاه حکیم سبزواری، سبزوار، ایران. ایمیل: ah.haghighi@hsu.ac.ir

DOI: 10.32592/nkums.15.1.79

تاریخ دریافت: ۱۴۰۱/۰۸/۱۷
تاریخ پذیرش: ۱۴۰۱/۱۱/۱۷

واژگان کلیدی:
پروتئین پیش‌ساز آمیلوئید
تمرین تناوبی
عملکرد شناختی
متامفتامین

چکیده

مقدمه: متامفتامین، نوعی داروی محرک است که مصرف آن سبب اختلال حافظه و یادگیری می‌شود. هدف تحقیق حاضر، بررسی اثر ۸ هفته تمرین تناوبی بر بیان ژن پروتئین پیش‌ساز آمیلوئید (APP) بافت هیپوکامپ و آزمون میدان باز موش‌های صحرایی وابسته به متامفتامین بود.

روش کار: در این پژوهش تجربی-آزمایشگاهی، ۳۲ موش صحرایی به ۴ گروه مساوی، سالین، متامفتامین اولیه (METH-1)، متامفتامین+تمرین (METH+MIT) و متامفتامین ثانویه (METH-2) تقسیم شدند. متامفتامین به‌مقدار ۵ میلی‌گرم بر کیلوگرم وزن بدن، به‌مدت ۲۱ روز تزریق شد. برنامه تمرین (۵ جلسه در هفته) شامل دویدن تناوبی (۴ ست ۴ دقیقه‌ای با شدت متوسط و ۲ دقیقه استراحت فعال بین ست‌ها) روی تردمیل بود. در پایان دوره تزریق و تمرین، برای ارزیابی تغییرات بیان ژنی، بافت هیپوکامپ رت‌ها استخراج شد. همچنین، آزمون رفتاری میدان باز انجام شد. داده‌ها با استفاده از آزمون آنووای یک‌طرفه در سطح معناداری $P\leq ۰/۰۵$، تحلیل شدند.

یافته‌ها: متامفتامین باعث افزایش معنادار بیان ژن APP در گروه‌های متامفتامین اولیه و ثانویه، نسبت به گروه سالین شد ($P\leq ۰/۰۰۷$) ($P\leq ۰/۰۰۵$). مسافت کل و سرعت حرکت موش‌ها در گروه‌های متامفتامین اولیه و ثانویه، نسبت به سالین کاهش معناداری داشت (به‌ترتیب، $P\leq ۰/۰۰۴$ و $P\leq ۰/۰۲۶$). MIT منجر به کاهش معنادار APP نسبت به گروه‌های متامفتامین اولیه و ثانویه شد (به‌ترتیب، $P\leq ۰/۰۴۱$ و $P\leq ۰/۰۲۸$). سرعت حرکت در گروه متامفتامین+تمرین، نسبت به گروه متامفتامین اولیه افزایش معناداری داشت ($P\leq ۰/۰۰۸$).

نتیجه‌گیری: متامفتامین باعث کاهش عملکرد شناختی (یادگیری و حافظه) شده است. با توجه به نتایج، انجام تمرینات تناوبی با شدت متوسط، احتمالاً عملکرد شناختی را بهبود داده است. اگرچه، تحقیقات بیشتری برای دست‌یافتن به نتایج قطعی ضروری است.

مقدمه

متامفتامین (Methamphetamine: METH) دارویی محرک و اعتیادآور است که بلافاصله پس از مصرف، باعث فعال‌سازی سیستم‌های خاصی در مغز می‌شود. در سال‌های اخیر، متامفتامین به‌دلیل داشتن خواص تحریکی، توهم‌زا، احساس لذت و سرخوشی، مورد توجه مردم، به‌ویژه جوانان و نوجوانان قرار گرفته است. ترکیب اصلی متامفتامین، $C_9H_{13}N$ است که سیستم دوپامینی مغز را به‌شدت تحریک می‌کند [۱]. هرچند مکانیسم‌های تخریب سلول‌های عصبی، درنتیجه مصرف متامفتامین، در سیستم عصبی مرکزی به‌طور دقیق مشخص نشده است، تحقیقات نشان داده‌اند که استرس اکسیداتیو، القای آپوپتوز، فعال‌سازی میکروگلیا، هیپرترمی و غیره در آن دخیل هستند [۲، ۳]. یکی از مسیرهایی که اخیراً مورد توجه پژوهشگران قرار گرفته، نقش متامفتامین و تأثیر آن بر کاهش فعالیت مسیر پیام‌رسانی انسولین در سیستم عصبی مرکزی و به‌دنبال آن، کاهش عملکرد شناختی و حافظه است [۴].

گیرنده‌های انسولین (Insulin receptor: IR) به‌شدت در نواحی پیاز بویایی، هیپوکامپ و هیپوتالاموس پخش می‌شوند و فسفوریلاسیون خودکار فعالیت‌های پایین‌دستی، یعنی پروتئین سوبسترای گیرنده انسولین (*Insulin receptor substrate: IRS*) را آغاز می‌کنند که متعاقباً، اینوزیتول تری فسفاتید-کیناز (Phosphoinositide 3-kinase: PI3K) و پروتئین کیناز

Copyright © 2023 The Author(s); Published by Journal of North Khorasan University of Medical Sciences. This is an open access article, distributed under the terms of the Creative Commons Attribution-NonCommercial 4.0 International License (http://creativecommons.org/licenses/by-nc/4.0/) which permits others to copy and redistribute material just in noncommercial usages, provided the original work is properly cited.

[Downloaded from journal.nkums.ac.ir on 2026-11-15]

(Protein kinase B: Akt) B را فعال می‌کنند. بنابراین، مسیر PI3K/Akt در مغز، یک سیگنالینگ مهم انسولین است که مسئول محافظت از سلول‌های عصبی، یادگیری و عملکردهای حافظه است [۵]. فعال‌سازی Akt، یکی از مولکول‌های کلیدی را در پایین‌دست مسیر سیگنالینگ PI3K/Akt غیرفعال می‌کند و در شرایط پاتولوژیک جدی، ازجمله نقص شناختی مربوط به بیماری آلزایمر (Alzheimer Disease: AD) نقش دارد [۶]. علاوه بر این، سیگنالینگ مهم داخلی دیگر، مسیر MAPK/ERK است که نقشی اساسی در شکل‌گیری بیماری آلزایمر ایفا می‌کند، که نشان‌دهنده پیچیدگی مسیر انسولین در تنظیم تغییرات پاتولوژیک مانند بیماری آلزایمر است.

گزارش‌های اخیر عنوان کرده‌اند که با قرار گرفتن مکرر موش‌ها در معرض متامفتامین، نقایص شناختی آشکار در آزمون رفتاری ماز Yشکل، همراه با اختلال سیگنالینگ انسولین (IR/IRS2/PI3K/Akt/GSK-3β) به‌وجود می‌آید [۴]. با این‌حال، اثرات متامفتامین در مسیر سیگنالینگ انسولین و بیان پروتئین‌های پاتولوژیک مرتبط با بیماری آلزایمر، ازجمله پروتئین پیش‌ساز آمیلوئید (*APP*) و p-tau، به‌خوبی شناخته نشده است [۴]. با اتصال انسولین به گیرنده خود، فعالیت تیروزین کینازی زیر واحد بتا آغاز می‌شود و به‌دنبال آن، مسیرهای پایین‌دستی Akt و PI3K فعال می‌شوند. فعال شدن این مسیر، باعث افزایش پروتئین پیش‌ساز آمیلوئید (*APP*) و کاهش عملکرد شناختی می‌شود [۳، ۷].

اگرچه، مطالعات متعددی نشان داده‌اند که آمیلوئید بتا و پروتئین پیش‌ساز (*APP*) آن در مغز، نقش‌های فیزیولوژیکی دارند، تجمع آن‌ها در مغز عامل مهمی در ایجاد بیماری آلزایمر است. تصور می‌شود که تجمع آمیلوئید بتا در مغز، درنتیجه نبود تعادل در تولید و پاک‌سازی (Clearance) آن از مغز ایجاد می‌شود، ولی مولکول *APP* در نورون‌ها، به‌مقدار زیادی تولید و به‌سرعت نیز متابولیزه می‌شود [۳، ۸]. در چندین مطالعه، عملکردهایی برای *APP*، همچون نقش در اتصالات سلولی، رشد سلول، تحرک رشد رو به جلوی زوائد عصبی، مهاجرت نورونی، تولید سیناپس، پلاستیسیتی سیناپسی و بقای سلول گزارش شده است. با این وجود، نقش *APP* در سیستم عصبی مرکزی، به‌طور کامل شناخته نشده و نیازمند مطالعات بیشتری است [۸-۱۰].

بنابراین، می‌توان نتیجه گرفت که تشکیل آمیلوئید بتا، مقدمه‌ای برای اثرات بیماری‌زایی تائو است و جلوگیری از تشکیل آمیلوئید بتا، به کاهش تشکیل تائو منجر می‌شود. اگرچه، پروتئین تائو در مسیر ایجاد بیماری آلزایمر، در پایین‌دست آمیلوئید بتا قرار گرفته است، شواهدی وجود دارد که نشان می‌دهد مولکول تائو در القای آبشار پیام‌رسانی ناشی از آمیلوئید بتا نقش دارد و احتمالاً به‌وسیله *APP* میانجیگری می‌شود [۱۱]. در واقع، زمانی که متامفتامین مصرف شود، مسیر پیام‌رسانی انسولین را در بافت‌های مختلف مغز، به‌خصوص هیپوکامپ مختل می‌کند و درنتیجه، میزان تولید *APP* به‌میزان زیادی افزایش می‌یابد و درنهایت، آمیلوئید بتا و تائو افزایش می‌یابند. درنتیجه، تخریب نورونی در هیپوکامپ ایجاد می‌شود که مرکز شناخت و حافظه است و احتمال افزایش ابتلای این افراد به بیماری آلزایمر بیشتر می‌شود. لذا، راهکارهای پیشگیری و بهبوددهنده متعددی برای اثرات نوروتوکسیک متامفتامین مطرح شده است.

یکی از این راهکارها، ورزش (فعالیت بدنی منظم) است. فعالیت جسمانی به‌عنوان یک مداخله، برای کاهش اثرات مخرب متامفتامین مطرح است [۱۲]. متامفتامین عملکرد طبیعی مغز را مختل می‌کند و ورزش از این اختلال جلوگیری می‌کند یا آن را کاهش می‌دهد. Kang و Cho (۲۰۱۴) نشان دادند که ۶ هفته تمرین روی نوار گردان، باعث بهبود پیام‌دهی و کاهش معنادار Aβ1-42 در مغز موش‌های آلزایمری‌شده با استروپتوزوتوسین می‌شود [۱۳]. Liu و همکاران (۲۰۱۳) نیز نشان دادند که تعداد و اندازه پلاک‌های آمیلوئیدی و همچنین، سطح Aβ1-42 در هیپوکامپ موش‌های آلزایمری، پس از ۵ ماه تمرین روی نوار گردان کاهش معناداری یافت [۱۴]. Baker و همکاران (۲۰۱۰) نشان دادند که فعالیت‌های ورزشی در افراد مسن باعث افزایش تجزیه *APP* می‌شود. در واقع، تمرینات ورزشی از طریق افزایش پروتئولیز *APP* از مسیرهای غیرآمیلوئیدساز منجر به این تجزیه می‌شود [۱۵]. احتمالاً، ورزش به‌طور مستقیم، متابولیسم *APP* را با استفاده از افزایش فعالیت نورونی تعدیل می‌کند. در واقع، پردازش *APP* توسط پروتئین کیناز فعال‌شده با میتوژن (MAPK) و فسفولیپاز *C*، افزایش می‌یابد و این مسیرها از طریق ورزش فعال می‌شوند [۱۶].

با این‌حال، نقش مداخله‌گر تمرینات تناوبی با شدت متوسط بر شاخص آسیب هیپوکامپ ناشی از متامفتامین هنوز مشخص نیست؛ زیرا تاکنون پژوهشی در این زمینه انجام نشده است. سنجش اثر مصرف متامفتامین بر یکی از شاخص‌های مهم در ایجاد بیماری آلزایمر (*APP*) همراه با اثر تمرینات ورزشی ضروری است. بنابراین، با توجه به اثرات مضر متامفتامین بر مغز، همچون ایجاد نوروتوکسیسیتی و مرگ نورونی، این سؤال مطرح می‌شود که آیا تمرینات ورزشی با تأثیر بر متابولیسم *APP* در هیپوکامپ که شاخص مهمی در عملکرد شناختی (یادگیری و حافظه) است، مؤثر است یا خیر. بنابراین، هدف تحقیق حاضر، بررسی اثر ۸ هفته تمرین MIT بر بیان ژنی *APP* بافت هیپوکامپ و آزمون میدان باز در موش‌های صحرایی وابسته به متامفتامین (شیشه) بود.

روش کار

حیوانات

در این پژوهش تجربی-آزمایشگاهی، ۳۲ سر موش صحرایی نر ویستار، با میانگین وزنی ۲۰±۱۸۰ گرم از مرکز آزمایشگاه حیوانات دانشگاه علوم پزشکی کرمان خریداری شد. موش‌ها تحت چرخه خواب و بیداری (۱۲ ساعت روشنایی و ۱۲ ساعت تاریکی)، رطوبت ۴۰ تا ۶۰ درصد و درجه حرارت ۲±۲۱ درجه سانتی‌گراد نگهداری شدند. حیوانات با روش تصادفی ساده، به ۴ گروه ۸تایی شامل گروه سالین (Saline)، گروه متامفتامین اولیه (METH-1)، گروه متامفتامین+تمرین تناوبی با شدت متوسط (METH+MIT) و گروه متامفتامین ثانویه (METH-2) تقسیم

[Downloaded from journal.nkums.ac.ir on 2026-11-15]

شدند.

سپس، رت‌ها به‌مدت ۱ هفته، دوره آشنایی با محیط آزمایشگاه و نوار گردان را انجام دادند. تزریق درون صفاقی محلول سالین (۰/۹ درصد تزریقی) و متامفتامین هیدروکلراید (خلوص<۹۶ درصد مرکز ملی مواد مخدر کرمان، ایران) به‌ترتیب در گروه‌های سالین، متامفتامین اولیه و ثانویه و متامفتامین+تمرین انجام شد. متامفتامین با دُز ۵ میلی‌گرم بر کیلوگرم وزن بدن، روزانه یک‌بار به‌مدت ۲۱ روز (دُز کلی تزریق ۱۰۵ میلی‌گرم بر کیلوگرم) القا شد [۱۷]. همچنین، این ۴ گروه براساس برنامه و طرح شکل ۱، تحت مطالعه قرار گرفتند.

پروتکل تمرین

قبل از اجرای برنامه تمرینی، موش‌های صحرایی، آزمون ورزشی فزاینده را تا مرز خستگی انجام دادند. ابتدا، ۵ دقیقه گرم کردن به‌صورت خیلی آهسته انجام شد که تقریباً معادل با ۸ متر در دقیقه روی تردمیل بود. بعد از گرم کردن، آزمون ورزشی فزاینده تا مرز خستگی با سرعت ۱۰ متر در دقیقه شروع شد و به‌ازای هر ۳ دقیقه، ۳ متر بر سرعت تردمیل افزوده شد تا حیوانات دیگر قادر به دویدن نباشند [۱۸]. سپس، میانگین سرعت بیشینه موش‌های صحرایی در گروه متامفتامین+تمرین، برای طراحی برنامه تمرین محاسبه شد. تمرینات گروه متامفتامین+تمرین به‌مدت ۸ هفته و ۵ روز در هفته، روی نوار گردان مخصوص جوندگان در ساعت مشخصی در طول روز انجام شد [۱۸]. تمرینات تناوبی با شدت متوسط (۶۰ تا ۶۵ درصد سرعت بیشینه) با شیب صفر انجام شد. مدت تمرین در هر جلسه ۳۶ دقیقه بود که شامل ۶ دقیقه گرم کردن و سرد کردن با شدت ۲۰ درصد سرعت بیشینه بود. برنامه اصلی از دو بخش تناوب متوسط با شدت ۶۰ تا ۶۵ درصد سرعت بیشینه (۴ تناوب، ۴ دقیقه‌ای) و تناوب سبک با شدت ۳۰ درصد سرعت بیشینه (۴ تناوب، ۲ دقیقه‌ای) اجرا شد (جدول ۱).

آزمون رفتاری میدان باز

آزمون میدان باز در انتهای دوره‌های ۲۱ روز تزریق و ۸ هفته تمرینات ورزشی، از موش‌های صحرایی گرفته شد. این آزمون برای ارزیابی عملکرد شناختی (یادگیری و حافظه) موش‌های صحرایی انجام شد. برای انجام این آزمون، از یک جعبه رو باز استفاده شد که کف آن با خطوطی، به چندین مربع مساوی تقسیم‌بندی شده بود. پهنه این جعبه، به دو ناحیه محیط و مرکز تقسیم شد. حرکت و محل موش با دوربین دیجیتالی تعبیه‌شده در بالای جعبه، ردگیری و ثبت شد و در نرم‌افزار مربوطه محاسبه و تحلیل شد. برای انجام آزمون، حیوان به‌آرامی و به‌صورت تصادفی، در یکی از چهار گوشه دستگاه قرار داده و به او اجازه داده شد تا محیط دستگاه را آزادانه به‌مدت ۵ دقیقه کاوش کند. بعد از انجام آزمون، موش‌ها به قفس‌هایشان منتقل شدند. کف و دیواره‌های



شکل ۱. نمایش شماتیک اجرای مداخلات مطالعه

جدول۱. پروتکل تمرین تناوبی با شدت متوسط (MIT)

روش تمرین، هفته	اول	دوم	سوم	چهارم	پنجم	ششم	هفتم	هشتم
تناوب متوسط								
تعداد تناوب	۴	۴	۴	۴	۴	۴	۴	۴
زمان هر تناوب (دقیقه)	۴	۴	۴	۴	۴	۴	۴	۴
سرعت هر تناوب (متر بر دقیقه)	۱۶	۱۸	۲۰	۲۲	۲۴	۲۶	۲۸	۳۰
استراحت فعال								
تعداد تناوب	۴	۴	۴	۴	۴	۴	۴	۴
زمان هر تناوب (دقیقه)	۲	۲	۲	۲	۲	۲	۲	۲
سرعت هر تناوب (متر بر دقیقه)	۱۰	۱۰	۱۱	۱۱	۱۲	۱۲	۱۳	۱۳

[Downloaded from journal.nkums.ac.ir on 2026-11-15]

جدول ۲. پرایمرهای استفاده‌شده در پژوهش

ژن هدف	پرایمر رفت	پرایمر برگشت	دما(C°)
APP	5'-GCGGCAACAGGAACAACTTT-3'	5'-TGCCGTCGTGGGAAACAC-3'	۵۷/۳۰
GAPDH	5'-CAACTCCCTCAAGATTGTCAGCAA-3'	5'-GGCATGGACTGTGGTCATGA-3'	۵۹/۴۰

دستگاه، برای جلوگیری از اثرات بوی برجای‌مانده از حیوان قبلی، هر بار با پنبه آغشته به الکل ۷۰ درصد تمیز شد. کل مسافت طی‌شده و میانگین سرعت حرکت به‌عنوان شاخصی از فعالیت حرکتی در نظر گرفته شد [۱۹].

بعد از آخرین جلسه تمرین و آزمون میدان باز، رت‌ها با گاز CO_2 بیهوش شدند و سر حیوانات جدا شد. سپس، بافت هیپوکامپ موش‌های صحرایی برداشته و داخل میکروتیوب مخصوص، درون نیتروژن مایع منجمد و در فریزر با دمای ۸۰- سانتی‌گراد نگهداری شد.

سنجش بیان ژن *APP*

سنجش *APP* برای بررسی عملکرد شناختی در هیپوکامپ موش‌های صحرایی انجام شد. برای این منظور، ۵۰ میلی‌گرم بافت هیپوکامپ برای استخراج RNA با استفاده از محلول ترایزول (یکتا تجهیز آزما، ایران) لیز شد و با دستگاه همگن‌کننده بافت کاملاً هموژن شد. براساس دستورالعمل کیت، برای جداسازی RNA از کلروفرم و ایزوپروپانول و برای شست‌وشوی آن از اتانول ۷۵ درصد استفاده شد. کل نمونه‌ها با دستگاه پیکودراپ (picodrop limited, Hinxton, United Kingdom) برای اندازه‌گیری غلظت RNA با طول موج‌های ۲۶۰/۲۸۰ و ۲۳۰/۲۸۰ سنجیده شدند. سنتز cDNA با استفاده از کیت (یکتا تجهیز) و براساس پروتکل سنتز cDNA موجود در کیت انجام شد. با اضافه کردن RNase inhibitor برای از بین بردن آلودگی، سنتز cDNA در دستگاه PCR ساخت شرکت Analitik Jena آلمان انجام شد.

به‌منظور اندازه‌گیری سطح بیان ژن‌های مربوطه، از روش Real Time-PCR (qRT-PCR) با کمک آنزیم Real Q Plus 2x Master Mix Green محصول شرکت Ampliqon SYBR green Master Mix High ROX، ساخت کشور دانمارک و دستگاه Real Time PCR مدل Rotor Gene Q ساخت کمپانی QIAGEN آلمان استفاده شد. پروتکل دمایی به‌صورت دناتوراسیون اولیه در دمای ۹۵ درجه سانتی‌گراد به‌مدت ۱۵ دقیقه، به‌دنبال آن، ۴۰ چرخه متوالی به‌صورت دناتوراسیون در دمای ۹۵ درجه سانتی‌گراد به‌مدت ۱۰ ثانیه، ۶۰ درجه سانتی‌گراد به‌مدت ۲۰ ثانیه و ۷۲ درجه سانتی‌گراد به‌مدت ۲۰ ثانیه انجام شد.

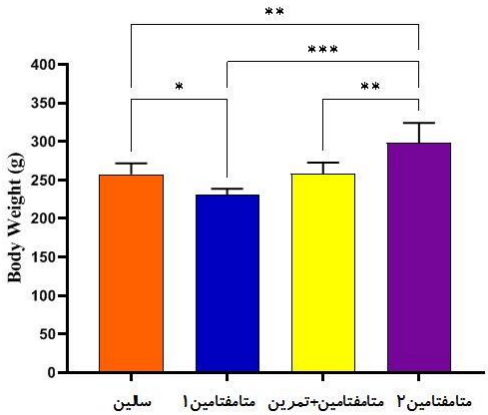
توالی پرایمرهای استفاده‌شده در این پژوهش با استفاده از نرم‌افزار آنلاین Primer-BLAST(NCBI) طراحی شد. همچنین، از ژن *GAPDH* به‌عنوان ژن کنترل داخلی استفاده شد (جدول ۲). تجزیه‌وتحلیل داده‌ها براساس مقایسه چرخه آستانه (CT) انجام شد. منحنی تکثیر هر واکنش PCR با منحنی تکثیر ژن مرجع *GAPDH* مربوطه نرمالیزه شد. در این مطالعه، اختلاف CT به‌دست‌آمده از نمونه‌های آزمایش و نمونه‌های کنترل، محاسبه و با استفاده از فرمول $2^{-\Delta\Delta CT}$، نسبت ژن هدف به ژن مرجع به‌دست آمد.

روش آماری

تمام نتایج به‌صورت میانگین±انحراف استاندارد بیان شد. برای بررسی توزیع نرمال بودن داده‌ها، از آزمون شاپیروویلک و برای مقایسه تفاوت بین گروه‌ها، از آزمون آماری تحلیل واریانس یک‌طرفه و آزمون تعقیبی توکی در سطح معنی‌داری $P\leq ۰/۰۵$ استفاده شد. تمام محاسبات آماری با استفاده از نرم‌افزار آماری GraphPad Prism نسخه ۹ انجام شد.

یافته‌ها

تغییرات وزن موش‌ها در پایان دوره ۲۱ روز تزریق متامفتامین و ۸ هفته تمرین در گروه‌ها تجزیه‌وتحلیل آماری شد. مصرف متامفتامین در گروه متامفتامین اولیه ($P\leq ۰/۰۴۸$)، باعث کاهش معنادار میانگین وزنی موش‌های صحرایی نسبت به گروه سالین شد. البته بین وزن گروه سالین و متامفتامین+تمرین ($P\leq ۰/۹۹۹$) اختلاف معناداری مشاهده نشد. وزن نهایی گروه متامفتامین ثانویه در پایان ۸ هفته تمرینات تناوبی، در مقایسه با گروه سالین ($P\leq ۰/۰۰۲$)، متامفتامین اولیه ($P\leq ۰/۰۰۱$) و متامفتامین+تمرین ($P\leq ۰/۰۰۴$) افزایش معناداری داشت (شکل۲).

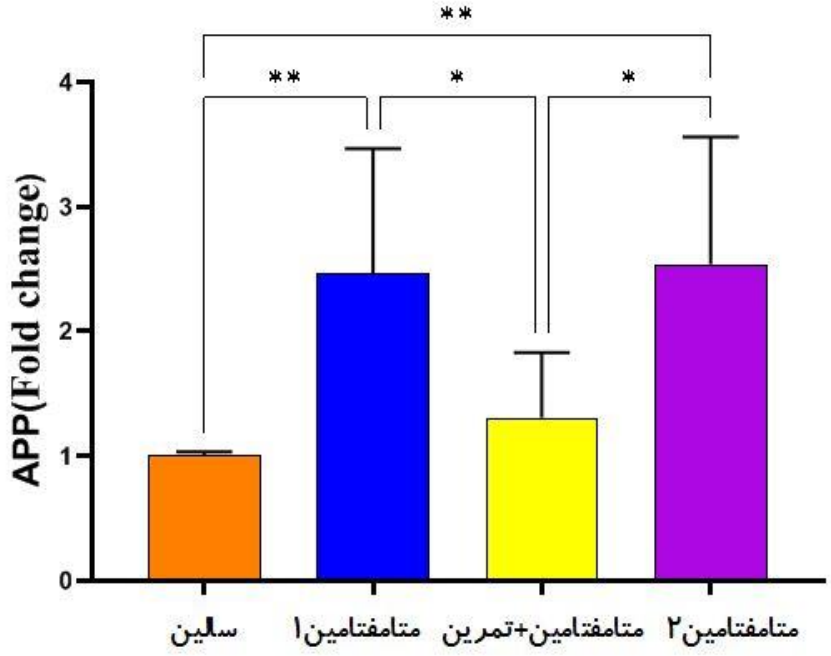


شکل ۲. تغییرات وزن موش‌های صحرایی در گروه‌های سالین، متامفتامین اولیه، متامفتامین+تمرین و متامفتامین ثانویه
* اختلاف معنادار گروه سالین را با گروه متامفتامین اولیه نشان می‌دهد؛ ** اختلاف معنادار گروه متامفتامین ثانویه را با گروه‌های متامفتامین+تمرین و سالین نشان می‌دهد؛ *** اختلاف معنادار گروه متامفتامین ثانویه را با گروه متامفتامین اولیه نشان می‌دهد.

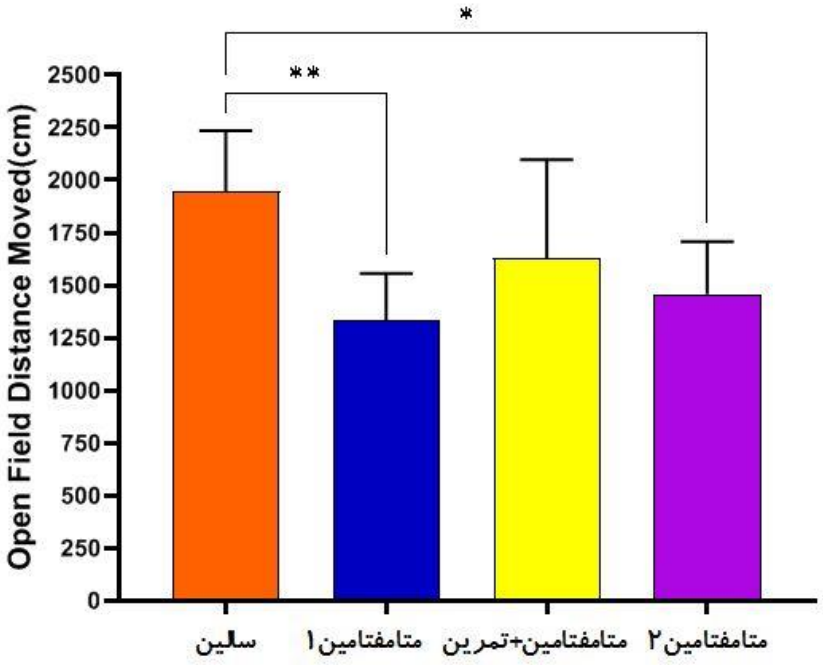
[Downloaded from journal.nkums.ac.ir on 2026-11-15]

همچنین، افزایش بیان ژن شاخص *APP* به‌ترتیب در گروه متامفتامین اولیه و ثانویه (P≤۰/۰۰۷) (P≤۰/۰۰۵)، در مقایسه با گروه سالین معنادار بود. تمرینات تناوبی با شدت متوسط، به‌ترتیب باعث کاهش معنادار بیان ژنی *APP* نسبت به گروه‌های متامفتامین اولیه و ثانویه (P≤۰/۰۴۱)(P≤۰/۰۲۸) شد. اختلاف معناداری بین گروه متامفتامین+ تمرین و سالین مشاهده نشد (P≤۰/۸۷۵) (شکل ۳).

نتایج آزمون رفتاری میدان باز نشان داد که تزریق متامفتامین باعث کاهش معنادار شاخص مسافت پیموده‌شده کل، به‌ترتیب در گروه‌های متامفتامین اولیه و ثانویه (P≤۰/۰۰۴) (P≤۰/۰۲۶) در مقایسه با گروه سالین شده است (شکل ۴).

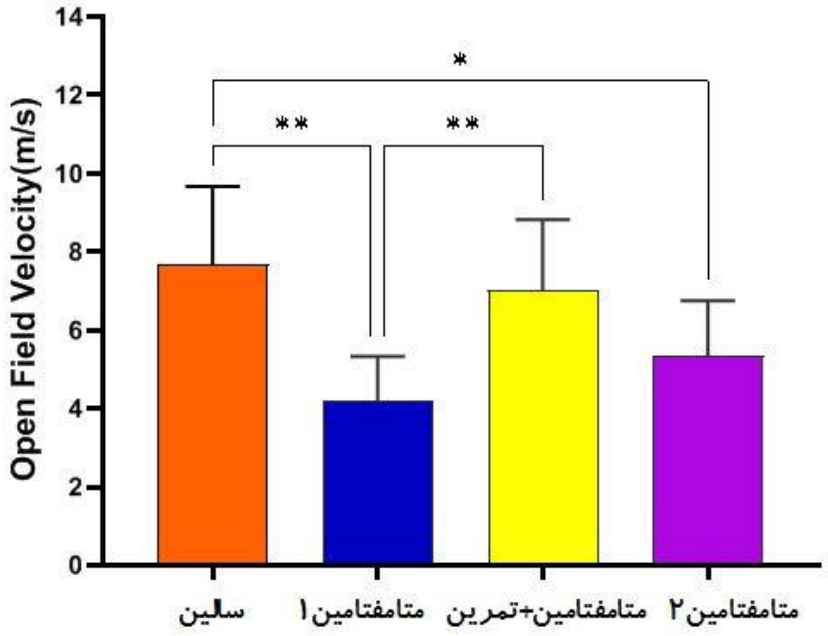


شکل ۳. تغییرات بیان ژنی شاخص *APP* در گروه‌های سالین، متامفتامین اولیه، متامفتامین+تمرین و متامفتامین ثانویه
* اختلاف معنادار گروه متامفتامین+تمرین را با گروه‌های متامفتامین اولیه و ثانویه نشان می‌دهد؛ ** اختلاف معنادار گروه سالین را با گروه‌های متامفتامین اولیه و ثانویه نشان می‌دهد.



شکل ۴. تغییرات شاخص مسافت پیموده‌شده کل در آزمون میدان باز در گروه‌های سالین، متامفتامین اولیه، متامفتامین+تمرین و متامفتامین ثانویه
* اختلاف معنادار گروه سالین را با متامفتامین ثانویه نشان می‌دهد؛** اختلاف معنادار گروه سالین را با گروه متامفتامین اولیه نشان می‌دهد.

[Downloaded from journal.nkums.ac.ir on 2026-11-15]



شکل ۵: تغییرات شاخص سرعت حرکت در آزمون میدان باز در گروه‌های سالین، متامفتامین اولیه، متامفتامین+تمرین و متامفتامین ثانویه
* اختلاف معنادار گروه سالین را با گروه متامفتامین ثانویه نشان می‌دهد؛ ** اختلاف معنادار گروه متامفتامین اولیه را با گروه‌های سالین و متامفتامین+تمرین نشان می‌دهد.

همچنین، تزریق متامفتامین به‌ترتیب باعث کاهش معنادار شاخص سرعت حرکت در گروه‌های متامفتامین اولیه و ثانویه ($P\leq ۰/۰۰۱$) ($P\leq ۰/۰۳۶$)، در مقایسه با گروه سالین شد. تمرینات تناوبی با شدت متوسط باعث افزایش معنادار سرعت حرکت موش‌های صحرایی در مقایسه با گروه متامفتامین اولیه شد ($P\leq ۰/۰۰۸$) (شکل ۵).

بحث

نتایج پژوهش حاضر نشان داد که القای متامفتامین در هیپوکامپ موش‌های صحرایی اثرات متعددی دارد. به‌طوری‌که، در آزمون رفتاری، نشان داده شد که آزمون حافظه فضایی میدان باز موش‌های صحرایی با تزریق متامفتامین دچار اختلال شده و در شاخص‌هایی همچون مسافت پیموده‌شده کل و سرعت حرکت، در گروه متامفتامین به‌طور معناداری کاهش داشته‌اند. اما اثر مثبت تمرین MIT منجر به بهبود شاخص‌های مدنظر شد. همچنین، نتایج شاخص بیان ژنی نشان داد که میزان *APP* همراه با تزریق متامفتامین در بافت هیپوکامپ، افزایش بیان داشته است. تمرین MIT منجر به کاهش بیان آن شد که این موضوع نشان‌دهنده اثر مثبت تمرین بر شاخص مدنظر است.

مطالعات نشان داده‌اند که متامفتامین سبب القای بیماری‌های تحلیل‌برنده عصبی در سلول‌های بدن، نظیر سلول‌های عصبی می‌شود [۲۰]. Izawa و همکاران (۲۰۰۶) نشان دادند که متامفتامین در موش‌های صحرایی اسپراگ داولی، سبب کاهش حافظه، گیجی و فراموشی می‌شود. همچنین، مصرف بلندمدت متامفتامین، سبب تخریب پایانه‌های عصبی دوپامینرژیک و سروتونرژیک در مغز می‌شود [۲۱]. شفاهی و همکاران (۲۰۱۹)، کاهش حافظه فضایی و غیرفضایی را به‌واسطه کوچک شدن هیپوکامپ مغز و مرگ سلولی نورون‌ها را با متامفتامین گزارش کردند [۲۲]. با اتصال انسولین به گیرنده مربوطه، دو مسیر اصلی PI3K/AKT و MAPK فعال می‌شود. به‌نظر می‌رسد در پژوهش حاضر، تزریق متامفتامین، مسیر پیام‌رسانی انسولین را مختل کرده و منجر به افزایش بیان ژن *GSK-3β* شده است و درنهایت، افزایش *APP* را به‌دنبال داشته است که با مطالعه Chen و همکاران همسو بوده است [۴].

مطالعات نشان داده است که کاهش انرژی در دسترس موجب اختلال در تولید پروتئین‌های پیش‌ساز آمیلوئید و تجمع پلاک‌های بتا-آمیلوئید می‌شود [۴، ۲۳]. در بیماری آلزایمر، کاهش نورون‌ها در چندین منطقه مهم یادگیری و حافظه، به‌خصوص در هیپوکامپ اتفاق می‌افتد. بنابراین، مسیر PI3K/Akt در مغز، یک سیگنالینگ مهم انسولین است که مسئول محافظت از سلول‌های عصبی، یادگیری و عملکردهای حافظه است [۲۴]. متامفتامین، فعال‌سازی Akt را غیرفعال می‌کند که یکی از مولکول‌های کلیدی در پایین‌دست مسیر سیگنالینگ PI3K/Akt است [۶].

پژوهشگران اظهار داشتند که فعالیت ورزشی احتمالاً از طریق تنظیم فرایند عملکردی پروتئین پیش‌ساز آمیلوئید و افزایش تخریب و پاک‌سازی Aβ، به کاهش سطوح بتا آمیلوئید در مغز منجر می‌شود [۱۵]. از این‌رو، نتایج ما بیان می‌کند که فعالیت بدنی برای جلوگیری از تجمع پروتئین پیش‌ساز آمیلوئید انجام می‌شود. Adlard و همکاران (۲۰۰۵) نیز بیان کردند که تمرین ورزشی، بیان *APP* و آبشار Aβ را در راستای کاهش تولید Aβ میانجیگری می‌کند. درنتیجه، این موضوع

[Downloaded from journal.nkums.ac.ir on 2026-11-15]

یادگیری و حافظه را در حیوانات تمرین‌کرده تحت تأثیر قرار می‌دهد [۲۵]. در این راستا، Baker و همکاران (۲۰۱۰) اظهار کردند که ورزش ممکن است افزایش‌دهنده تجزیه *APP* باشد. ازآنجاکه، فعالیت ورزشی بسیاری از فرآورده‌های ژنی را هم در سطح mRNA و هم در سطح پروتئین، تعدیل می‌کند، این احتمال وجود دارد که چندین مسیر برای تنظیم سطح آمیلوئید به‌طور مستقیم یا غیرمستقیم فعال شود [۱۵]. یک احتمال این است که ورزش فعالیت پروتئازوم را به‌طور مثبت تنظیم می‌کند و درنتیجه، تخریب قطعات پروتئولیتیکی *APP* را در پی خواهد داشت. احتمال دوم این است که ورزش به‌طور مستقیم، متابولیسم *APP* را با استفاده از افزایش فعالیت نورونی تعدیل می‌کند [۱۶].

از طرف دیگر، اشاره شده است که فعالیت بدنی احتمالاً اختلالات رفتاری را با کاهش مقادیر پپتید Aβ-۴۲، از طریق افزایش ساخت عامل‌های نوروتروفیک BDNF،NGF و IGF-1 که برای بقای نورونی، تکثیر نورونی و شکل‌پذیری سیناپسی اهمیت دارند، بهبود می‌بخشد [۲۶]. همچنین، فعالیت ورزشی پلاک‌های Aβ را کاهش می‌دهد و در افزایش شناخت، یادگیری فضایی (سه‌بعدی)، حافظه، شکل‌پذیری سیناپسی و ایجاد بافت عصبی موش‌های آلزایمری نقش دارد [۲۷]. پژوهشی یافت نشد که به‌طور مستقیم، ارتباط تمرینات ورزشی، متامفتامین و شاخص *APP* را بررسی کرده باشد. بنابراین، نیاز به تحقیقات بیشتری در ارتباط با نوع، شدت و زمان اثرگذاری تمرینات ورزشی احساس می‌شود.

گزارش‌های اخیر عنوان کرده‌اند که با قرار گرفتن مکرر موش‌ها در معرض متامفتامین، نقایص شناختی آشکاری در آزمون رفتاری ماز Yشکل، همراه با اختلال سیگنالینگ انسولین (IR/IRS2/PI3K/Akt/GSK-3β) پدیدار شده است که افزایش میزان *APP* را به‌دنبال دارد [۴، ۲۸]. در پژوهش حاضر، تزریق متامفتامین، احتمالاً مسیر پیام‌سانی انسولین را در هیپوکامپ مختل کرده و منجر به مرگ نورونی شده است. Choi و همکاران (۲۰۰۱) عنوان کردند که زمان و مسافت طی‌شده برای پیدا کردن سکوی مخفی درون ماز آبی موریس، از پارامترهای مهمی هستند که در موش‌های آلزایمری کاهش می‌یابد [۲۹]. در واقع، یکی از محدودیت‌های پژوهش حاضر، نسنجیدن ماز آبی موریس بود. همچنین، مطالعات، بیشتر آثار سودمند تمرین ورزشی را بر حافظه فضایی موش‌ها گزارش کرده‌اند [۳۰، ۳۱]. به‌نظر می‌رسد تمرین MIT تا حدودی بر بهبود حافظه فضایی و همچنین، شناخت محیطی موش‌هایی که متامفتامین استفاده کرده‌اند، تأثیر مفید گذاشته است. البته، برای سنجش حافظه فضایی موش‌های صحرایی از آزمون‌های رفتاری متعددی استفاده می‌شود که یکی از آن‌ها، آزمون میدان باز است.

Somkuwar و همکاران (۲۰۱۵) نشان دادند که استفاده از متامفتامین در مدل‌های حیوانی، به‌دلیل تولید گونه‌های فعال اکسیژن، سبب ایجاد استرس اکسیداتیو و نوروتوکسیسیتی می‌شود؛ زیرا رادیکال‌های آزاد به‌طور طبیعی، به‌وسیله آنزیم‌های آنتی‌اکسیدان داخل سلولی همچون سوپراکسید دیسموتاز، گلوتاتیون پراکسیداز و کاتالاز برداشته و حذف می‌شوند [۳۲]. احتمالاً، متامفتامین در هیپوکامپ موش‌های تحقیق حاضر منجر به استرس اکسیداتیو شده و به‌دنبال آن، باعث تخریب نورونی شده است. به‌نظر می‌رسد نوروتوکسیسیتی در هیپوکامپ موش‌های صحرایی گروه متامفتامین اتفاق افتاده است؛ زیرا نتایج آزمون‌های رفتاری نشان‌دهنده کاهش فعالیت حرکتی موش‌ها است. Hamakawa و همکاران (۲۰۱۳) نشان دادند که ۳ هفته فعالیت ورزشی، موجب کاهش سطح رادیکال‌های آزاد می‌شود که با کاهش اختلالات حرکتی ناشی از آن همراه خواهد بود [۳۳].

Ogonovszky و همکاران (۲۰۰۵) نشان دادندکه ورزش با شدت متوسط (۱ ساعت شنا در روز، به‌مدت ۸ هفته) هم ظرفیت آنتی‌اکسیدانی و هم مقاومت در برابر استرس اکسیداتیو را در بدن افزایش می‌دهد و عملکرد حافظه موش‌های صحرایی را بهبود می‌بخشد [۳۴]. Somkuwar و همکاران (۲۰۱۵) عنوان کردند که فعالیت ورزشی هوازی، با افزایش آنتی‌اکسیدان‌های سلول‌های عصبی، موجب کاهش استرس اکسیداتیو و افزایش مقاومت نورون‌های ناحیه هیپوکامپ در برابر آسیب‌های ناشی از متامفتامین می‌شود [۳۲]. مکانیسم‌های حفاظت‌کننده نورونی فعالیت ورزشی، دیدگاه درمانی نوین و نقطه‌نظر مهم پیشگیرانه‌ای را فراهم می‌کند و به‌عنوان روشی مؤثر و راهبردی مفید، در کاهش عوارض مغزی ناشی از متامفتامین است. Camiletti و همکاران (۲۰۱۳) عنوان کردند که تمرین ورزشی، فعالیت پایه برخی از آنزیم‌های آنتی‌اکسیدانی را افزایش می‌دهد و به‌عنوان آنتی‌اکسیدان‌های مستقیم و غیرمستقیم، انواع گونه‌های اکسیدکننده را خنثی و از سلول‌ها در برابر آسیب استرس اکسیداتیو محافظت می‌کند [۳۵]. احتمالاً، ۸ هفته تمرین MIT توانسته است میزان آنزیم‌های آنتی‌اکسیدانی را افزایش دهد و اثرات مخرب استرس اکسیداتیو ناشی از متامفتامین را تعدیل کند [۱۷].

نتیجه‌گیری

عدم سنجش شاخص پروتئینی *APP* و آزمون‌های رفتاری ماز آبی موریس، از محدودیت‌های پژوهش حاضر بود. تزریق متامفتامین با افزایش *APP*، احتمالاً باعث ایجاد اختلال در حافظه و یادگیری موش‌های صحرایی می‌شود. ممکن است انجام تمرینات MIT تا حدودی توانسته باشد این شرایط را بهبود بخشد، اگرچه تحقیقات بیشتری برای دست یافتن به نتایج قطعی ضروری است.

سپاسگزاری

محققان از مسئولان مرکز تحقیقات علوم اعصاب دانشگاه علوم پزشکی کرمان و تمامی کسانی که در اجرای تحقیق حاضر همکاری داشتند، تشکر و قدردانی می‌کنند. طرح تحقیق در کمیته اخلاق دانشگاه حکیم

[Downloaded from journal.nkums.ac.ir on 2026-11-15]

سبزواری، با شماره IR.HSU.AEC.1401.008 ثبت شد.

تعارض منافع

بدینوسیله نویسندگان اعلام می دارند هیچ گونه تضاد منافعی با سازمان ها و اشخاص دیگر وجود ندارد.

References

1. Uhlmann S, DeBeck K, Simo A, Kerr T, Montaner JS, Wood E. Crystal methamphetamine initiation among street-involved youth. *Am J Drug Alcohol Abuse.* 2014;**40**(1):31-36. **DOI:** 10.3109/00952990.2013.836531 **PMID:** 24191637
2. Panenka WJ, Procyshyn RM, Lecomte T, MacEwan GW, Flynn SW, Honer WG, et al. Methamphetamine use: a comprehensive review of molecular, preclinical and clinical findings. *Drug Alcohol Depend.* 2013;**129**(3):167-179. **DOI:** 10.1016/j.drugalcdep.2012.11.016 **PMID:** 23273775
3. Gabbouj S, Ryhänen S, Marttinen M, Wittrahm R, Takalo M, Kemppainen S, et al. Altered insulin signaling in Alzheimer's disease brain–special emphasis on PI3K-Akt pathway. *Front Neurosci.* 2019;**13**:629. **DOI:** 10.3389/fnins.2019.00629 **PMID:** 31275108
4. Chen L, Zhou L, Yu P, Fang F, Jiang L, Fei J, et al. Methamphetamine exposure upregulates the amyloid precursor protein and hyperphosphorylated tau expression: The roles of insulin signaling in SH-SY5Y cell line. *J Toxicol Sci.* 2019;**44**(7):493-503. **DOI:** 10.2131/jts.44.493 **PMID: 31270305**
5. Zhao W-Q, Chen H, Quon MJ, Alkon DL. Insulin and the insulin receptor in experimental models of learning and memory. *Eur J Pharmacol.* 2004;**490**(1-3):71-81. **DOI:** 10.1016/j.ejphar.2004.02.045 **PMID:** 15094074
6. Wang X, Zheng W, Xie JW, Wang T, Wang SL, Teng WP, et al. Insulin deficiency exacerbates cerebral amyloidosis and behavioral deficits in an Alzheimer transgenic mouse model. *Mol Neurodegener.* 2010;**5**(1):1-13. **DOI:** 10.1186/1750-1326-5-46 **PMID:** 21044348
7. Shieh JC, Huang PT, Lin YF. Alzheimer's disease and diabetes: insulin signaling as the bridge linking two pathologies. *Mol Neurobiol.* 2020;**57**(4):1966-1977. **DOI:** 10.1007/s12035-019-01858-5 **PMID:** 31900863
8. Dorostkar MM, Zou C, Blazquez-Llorca L, Herms J. Analyzing dendritic spine pathology in Alzheimer's disease: problems and opportunities. *Acta Neuropathol.* 2015;130(1):1-19. **DOI:** 10.1007/s00401-015-1449-5 **PMID:** 26063233
9. Jacobsen KT, Iverfeldt K. Amyloid precursor protein and its homologues: a family of proteolysis-dependent receptors. *Cell Mol Life Sci.* 2009;**66**(14):2299-2318. **DOI:** 10.1007/s00018-009-0020-8 **PMID:** 19333550
10. O'brien RJ, Wong PC. Amyloid precursor protein processing and Alzheimer's disease. *Annu Rev Neurosci.* 2011;**34**:185-204. **DOI:** 10.1146/annurev-neuro-061010-113613 **PMID**: 21456963
11. Nisbet RM, Polanco JC, Ittner LM, Götz J. Tau aggregation and its interplay with amyloid-β. *Acta Neuropathol.* 2015;**129**(2):207-220. **DOI:** 10.1007/s00401-014-1371-2 **PMID:** 25492702
12. Jung S, Kim Y, Kim M, Seo M, Kim S, Kim S, et al. Exercise pills for drug addiction: forced moderate endurance exercise inhibits methamphetamine-induced hyperactivity through the striatal glutamatergic signaling pathway in male Sprague Dawley rats. *Int J Mol Sci.* 2021;**22**(15):8203. **DOI:** 10.3390/ijms22158203 **PMID:** 34360969
13. Kang EB, Cho JY. Effects of treadmill exercise on brain insulin signaling and β-amyloid in intracerebroventricular streptozotocin induced-memory impairment in rats. *J Exerc Nutrition Biochem.* 2014;**18**(1):89-96. **DOI:** 10.5717/jenb.2014.18.1.89 **PMID:** 25566443
14. Liu HI, Zhao G, Zhang H. Long-term treadmill exercise inhibits the progression of Alzheimer's disease-like neuropathology in the hippocampus of APP/PS1 transgenic mice. *Behav Brain Res.* 2013;**256**:261-272. **DOI**: 10.1016/j.bbr.2013.08.008 **PMID:** 23968591
15. Baker LD, Frank LL, Foster-Schubert K, Green PS, Wilkinson CW, McTiernan A, et al. Aerobic exercise improves cognition for older adults with glucose intolerance, a risk factor for Alzheimer's disease. *J Alzheimers Dis.* 2010;**22**(2):569-579. **DOI:** 10.3233/JAD-2010-100768 **PMID:** 20847403
16. Cotman CW, Berchtold NC. Exercise: a behavioral intervention to enhance brain health and plasticity. *Trends Neurosci.* 2002;**25**(6):295-301. **DOI:** 10.1016/s0166-2236(02)02143-4 **PMID:** 12086747
17. Shafiei A, Haghighi AH, Askari R, Keyhani A, Nabavizadeh MS, Asadi-Shekaari M. Effects of moderate-intensity interval training on gene expression and antioxidant status in the hippocampus of methamphetamine-dependent rats. *Neurotox Res.* 2022;**40**(5):1455-1463. **DOI:** 10.1007/s12640-022-00532-4 **PMID:** 35781220
18. Khalafi M, Shabkhiz F, Azali Alamdari K, Bakhtiyari A. Irisin response to two types of exercise training in type 2 diabetic male rats. *J Arak Uni Med Sci.* 2016;**19**(6):37-45.
19. Habr SF, Bernardi MM, Conceição IM, Freitas TA, Felicio LF. Open field behavior and intra-nucleus accumbens dopamine release in vivo in virgin and lactating rats. *Psychol Neurosci.* 2011;**4**:115-121. **DOI:** 10.3922/j.psns.2011.1.013
20. Shukla M, Vincent B. The multi-faceted impact of methamphetamine on Alzheimer's disease: From a triggering role to a possible therapeutic use. *Ageing Res Rev.* 2020;**60**:101062. **DOI:** 10.1016/j.arr.2020.101062 **PMID:** 32304732
21. Izawa JI, Yamanashi K, Asakura T, Misu Y, Goshima Y. Differential effects of methamphetamine and cocaine on behavior and extracellular levels of dopamine and 3, 4-dihydroxy-phenylalanine in the nucleus accumbens of conscious rats. *Eur J Pharmacol.* 2006;**549**(1-3):84-90. **DOI:** 10.1016/j.ejphar.2006.08.031 **PMID:** 16979160
22. Shafahi M, Vaezi G, Shajiee H, Sharafi S, Khaksari M. Effects of crocin on learning, spatial memory impairment and necrosis cells death in rats hippocampus area in methamphetamine induced neurotoxicity. *JKH.* 2019;**14**(1).
23. Abramov E, Dolev I, Fogel H, Ciccotosto GD, Ruff E, Slutsky I. Amyloid-β as a positive endogenous regulator of release probability at hippocampal synapses. *Nat Neurosci.* 2009;**12**(12):1567-1576. **DOI:** 10.1038/nn.2433 **PMID:** 19935655
24. Hayati M, Zarghoshi J, Dabirifar G, Yousefi M, Omidi M. The effect of different training periods on beta-amyloid 42 index in hippocampus of streptozotocin-induced diabetic male rats. *SPMI.* 2021;**13**(3):127-137.
25. Adlard PA, Perreau VM, Pop V, Cotman CW. Voluntary exercise decreases amyloid load in a transgenic model of Alzheimer's disease. *J Neurosci.* 2005;**25**(17):4217-4221. **DOI:** 10.1523/JNEUROSCI.0496-05.2005 PMID: 15858047
26. Trejo JL, Carro E, Torres-Aleman I. Circulating insulin-like growth factor I mediates exercise-induced increases in the number of new neurons in the adult hippocampus. *J Neurosci.* 2001;**21**(5):1628-1634. **DOI:** 10.1523/JNEUROSCI.21-05-01628.2001 **PMID:** 11222653
27. Nichol KE, Parachikova AI, Cotman CW. Three weeks of running wheel exposure improves cognitive performance in the aged Tg2576 mouse. *Behav Brain Res.* 2007;**184**(2):124-132. **DOI:** 10.1016/j.bbr.2007.06.027 **PMID:** 17698211
28. Valian N, Ahmadiani A, Dargahi L. Increasing methamphetamine doses inhibit glycogen synthase kinase 3β activity by stimulating the insulin signaling pathway in substantia nigra. *J Cell Biochem.* 2018;**119**(10):8522-8530. **DOI:** 10.1002/jcb.27082 **PMID:** 30011098
29. Choi SH, Park CH, Koo JW, Seo JH, Kim HS, Jeong SJ, et al. Memory impairment and cholinergic dysfunction by centrally administered Aβ and carboxyl-terminal fragment of

[Downloaded from journal.nkums.ac.ir on 2026-11-15]

Alzheimer's APP in mice. *FASEB J.* 2001;**15**(10):1816-1818. **DOI:** 10.1096/fj.00-0859fje **PMID:** 11481240

30. Eskandarnejad M, Rezaei F. The effect of aerobic exercise on neural networks of attention and working memory. *J Shefaye Khatam.* 2018;**6**(2):31-40. **DOI:** 10.29252/shefa.6.2.31
31. He Xf, Liu DX, Zhang Q, Liang Fy, Dai Gy, Zeng JS, et al. Voluntary exercise promotes glymphatic clearance of amyloid beta and reduces the activation of astrocytes and microglia in aged mice. *Front Mol Neurosci.* 2017;**10**:144. **DOI:** 10.3389/fnmol.2017.00144 **PMID:** 28579942
32. Somkuwar SS, Staples MC, Fannon MJ, Ghofranian A, Mandyam CD. Evaluating exercise as a therapeutic intervention for methamphetamine addiction-like behavior. *Brain Plast.* 2015;**1**(1):63-81. **DOI:** 10.3233/BPL-150007 **PMID:** 29765835
33. Hamakawa M, Ishida A, Tamakoshi K, Shimada H, Nakashima H, Noguchi T, et al. Repeated short-term daily exercise ameliorates oxidative cerebral damage and the resultant motor dysfunction after transient ischemia in rats. *J Clin Biochem Nutr.* 2013;**53**(1):8-14. **DOI:** 10.3164/jcbn.12-72 **PMID:** 23874064
34. Ogonovszky H, Berkes I, Kumagai S, Kaneko T, Tahara S, Goto S, et al. The effects of moderate-, strenuous-and over-training on oxidative stress markers, DNA repair, and memory, in rat brain. *Neurochem Int.* 2005;**46**(8):635-640. **DOI:** 10.1016/j.neuint.2005.02.009 **PMID:** 15863241
35. Camiletti-Moirón D, Aparicio V, Aranda P, Radak Z. Does exercise reduce brain oxidative stress? A systematic review. *Scand J Med Sci Sports.* 2013;23(4):202-212. **DOI:** 10.1111/sms.12065 **PMID:** 23495801

[Downloaded from journal.nkums.ac.ir on 2026-11-15]