Sport and Health Sciences Reviews
Vol. 1, No. 2, Spring & Summer 2026, 40-65
Jshsr.atu.ac.ir
DOI: 10.22054/jshsr.2026.84750.1017

Review Article
Received: 06/03/2025
Revised: 07/11/2026
Accepted: 13/06/2026
ISSN: 3116-1758
eISSN: 3115-9400

Oxidative Stress in the Development and Exacerbation of Exercise-Induced Muscle Damage: Nutritional and Training Approaches to Enhance Recovery

Mohammadreza Bagheri*
Master's Degree in Corrective Exercises, Kharazmi University, Tehran, Iran

Neginsadat Tabatabaei
Master's Student in Sports Injuries and Corrective Exercises, Faculty of Physical Education Sciences, Imam Reza University, Mashhad, Iran

Farzad Daneshmand
PhD Student in Exercise Physiology, Islamic Azad University, Isfahan, Iran

Abstract
Oxidative stress plays a significant role in the development and exacerbation of exercise-induced muscle damage (EIMD). This condition arises from an imbalance between the production of reactive oxygen species (ROS) and the body's ability to neutralize them with antioxidants. Intense exercise leads to increased ROS production, which can cause tissue damage and impair muscle contractile function. EIMD often occurs after strenuous exercise, particularly eccentric movements, and is associated with muscle soreness, reduced strength, and limited range of motion. ROS are produced during both aerobic and anaerobic exercise and, when excessively elevated, can lead to lipid peroxidation, protein modifications, and increased inflammation. To counteract this, the body utilizes enzymatic antioxidants such as superoxide dismutase (SOD) and non-enzymatic antioxidants like vitamins C and E. However, factors such as high training volume, poor nutrition, and environmental stress can exacerbate oxidative stress in athletes. Nutritional strategies, including the use of antioxidant supplements such as vitamin C, vitamin E, polyphenols, and curcumin, as well as a diet rich in fruits, vegetables, whole grains, lean proteins, and omega-3 fatty acids, can help reduce oxidative stress and enhance recovery. Additionally, proper training planning through periodization, management of eccentric exercises, cross-training, and active recovery can effectively mitigate muscle damage. Recent research also highlights the role of gut microbiota in regulating inflammation and oxidative stress induced by exercise, suggesting that nutritional interventions can improve microbial balance. Ultimately, a deeper understanding of the mechanisms of oxidative stress and the application of appropriate nutritional and training strategies can enhance athletic performance and overall health.

Introduction
Exercise-induced muscle damage (EIMD) is a common consequence of strenuous physical activity, particularly following eccentric exercise. It is characterized by delayed onset muscle soreness (DOMS), reduced muscle strength, impaired range of motion, and temporary declines in athletic performance. In recent years, oxidative stress has been recognized as one of the primary mechanisms involved in the initiation and progression of EIMD. Oxidative stress occurs when the production of reactive oxygen species (ROS) exceeds the body's antioxidant defense capacity, leading to cellular and molecular damage.

Although ROS play essential physiological roles in cellular signaling, immune responses, and exercise adaptations, excessive ROS production can contribute to lipid peroxidation, protein oxidation, DNA damage, and inflammatory responses. During intense aerobic and anaerobic exercise, ROS are generated

* Corresponding Author: Mohammadreza.bagheri6681@gmail.com
How to Cite: Bagheri, M., Tabatabaei, N. & Daneshmand, F. (2026). Oxidative Stress in the Development and Exacerbation of Exercise-Induced Muscle Damage: Nutritional and Training Approaches to Enhance Recovery. *Sport and Health Sciences Reviews*, *1*(2), 40-65

through multiple pathways, including mitochondrial electron transport chains, NADPH oxidases, and xanthine oxidase activity. Consequently, athletes exposed to high training loads are at greater risk of oxidative damage and prolonged recovery periods.

Nutritional interventions and evidence-based training strategies have emerged as practical approaches for mitigating oxidative stress and enhancing recovery. Antioxidant-rich diets, supplementation with compounds such as vitamins C and E, polyphenols, curcumin, melatonin, and N-acetylcysteine (NAC), as well as optimized training periodization, have been investigated extensively. However, conflicting evidence exists regarding the effectiveness and safety of antioxidant supplementation. Some studies suggest that excessive antioxidant intake may interfere with beneficial training adaptations by attenuating ROS-mediated signaling pathways.

Despite the growing body of literature, uncertainty remains regarding optimal nutritional strategies, appropriate antioxidant dosages, and the interaction between oxidative stress, recovery, and athletic adaptation. Furthermore, emerging evidence highlights the role of gut microbiota in regulating inflammation and oxidative stress responses to exercise, introducing new perspectives in sports nutrition and recovery science. Therefore, the primary objective of this systematic review was to comprehensively evaluate the role of oxidative stress in exercise-induced muscle damage and to synthesize current evidence regarding nutritional and training interventions that may reduce oxidative damage and improve recovery outcomes in athletes.

Methodology

This study was conducted as a systematic review following the Preferred Reporting Items for Systematic Reviews and Meta-Analyses (PRISMA) framework. A comprehensive literature search was performed across four major scientific databases, including PubMed, Scopus, Web of Science, and Google Scholar.

The search strategy combined relevant keywords and Boolean operators. The main search terms included “Oxidative Stress”, “Reactive Oxygen Species”, “Exercise-Induced Muscle Damage”, “EIMD”, “Antioxidants”, “Athletic Recovery”, “Nutrition”, “Exercise Training”, “Polyphenols”, and “Gut Microbiota”. Additional manual searches were conducted through reference lists of selected articles to identify potentially relevant studies.

Eligibility criteria were established before the screening process. Inclusion criteria consisted of studies investigating oxidative stress mechanisms in athletes, ROS production during exercise, exercise-induced muscle damage, nutritional antioxidant interventions, recovery strategies, and training approaches aimed at reducing oxidative stress. Randomized controlled trials, cohort studies, systematic reviews, narrative reviews, and meta-analyses published within the last twenty years were considered eligible.

Exclusion criteria included studies focused on non-athletic populations, unrelated medical conditions, sedentary individuals, pediatric populations without sports participation, and studies with insufficient methodological quality or incomplete data. Methodological quality was evaluated using the Jadad Scale for randomized controlled trials and the Newcastle-Ottawa Scale for observational studies.

After removal of duplicate records, titles and abstracts were screened for relevance. Full texts of potentially eligible studies were then assessed. Ultimately, 27 studies met all eligibility criteria and were included in the final qualitative synthesis.

Findings and Results

A total of 27 studies were included in the final review. The findings consistently demonstrated that oxidative stress plays a crucial role in the development and exacerbation of exercise-induced muscle damage. Excessive ROS production was associated with increased lipid peroxidation, protein oxidation, inflammatory responses, and impaired muscle function.

Several biomarkers were frequently reported across studies, including malondialdehyde (MDA), protein carbonyls (PC), creatine kinase (CK), lactate dehydrogenase (LDH), glutathione (GSH), superoxide dismutase (SOD), catalase, and C-reactive protein (CRP). Elevated concentrations of these markers reflected increased oxidative stress and muscle tissue disruption following strenuous exercise.

Nutritional interventions demonstrated considerable potential in reducing oxidative stress and enhancing recovery. Diets rich in fruits, vegetables, whole grains, and omega-3 fatty acids were consistently associated with improved antioxidant status and reduced inflammatory responses. Polyphenol-rich foods and supplements, including tart cherry concentrate, New Zealand blackcurrant extract, cocoa-derived polyphenols, and curcumin, showed promising effects on recovery and muscle function.

Several studies reported beneficial effects of N-acetylcysteine and melatonin supplementation due to their antioxidant properties and ability to support endogenous antioxidant defenses. However, evidence

regarding vitamins C and E was inconsistent. While these antioxidants effectively reduced oxidative biomarkers, some investigations suggested that high-dose supplementation may impair exercise-induced adaptations, including mitochondrial biogenesis and insulin sensitivity.

Training-related strategies also played a significant role in managing oxidative stress. Periodized training programs, gradual progression of eccentric exercise, cross-training approaches, and active recovery methods were found to reduce cumulative oxidative stress and improve recovery outcomes. Adequate recovery between training sessions was repeatedly identified as a critical factor in minimizing oxidative damage.

An emerging area of interest involved the relationship between gut microbiota and exercise-induced oxidative stress. Evidence suggested that dietary fiber, probiotics, and polyphenol-rich foods may positively influence gut microbial composition, thereby reducing systemic inflammation and oxidative stress. Conversely, prolonged use of certain protein supplements appeared to negatively affect microbial diversity.

Despite substantial progress, several research gaps remain. These include uncertainty regarding optimal antioxidant dosages, long-term effects of supplementation, sport-specific responses to oxidative stress, sex-related differences, and the development of personalized nutritional interventions.

Discussion and Conclusion

The findings of this systematic review confirm that oxidative stress is a central mechanism underlying exercise-induced muscle damage and recovery processes. While moderate ROS production contributes to physiological adaptation, excessive oxidative stress can impair muscle function, delay recovery, and negatively affect athletic performance.

Current evidence suggests that nutritional strategies emphasizing natural antioxidant-rich foods represent the most effective and sustainable approach for managing oxidative stress. Although certain antioxidant supplements may provide benefits under specific conditions, excessive supplementation should be approached cautiously due to the potential interference with beneficial training adaptations. The integration of appropriate training periodization, active recovery strategies, and individualized nutritional planning appears essential for optimizing recovery and reducing exercise-related muscle damage. Additionally, the growing recognition of gut microbiota as a mediator of inflammation and oxidative stress highlights new opportunities for intervention in sports science.

The practical implications of these findings extend beyond athletic performance and may contribute to overall health, injury prevention, and long-term well-being among physically active populations. Coaches, sports nutritionists, and exercise professionals should consider both nutritional and training-related factors when designing recovery programs.

Several limitations should be acknowledged. The included studies varied considerably in design, participant characteristics, exercise protocols, antioxidant dosages, and biomarker assessment methods. Potential publication bias and language restrictions may also have influenced the available evidence. Furthermore, the heterogeneity of methodologies limited direct comparisons across studies. Future research should focus on large-scale randomized controlled trials, determination of optimal antioxidant dosages, long-term supplementation outcomes, personalized intervention strategies, and further investigation of the interactions between gut microbiota, oxidative stress, and athletic recovery.

Keywords: Oxidative stress, exercise-induced muscle damage (EIMD), reactive oxygen species (ROS), antioxidants, athletic recovery, sports nutrition

مقاله مروری
تاریخ دریافت: ۱۴۰۳/۱۲/۱۶
تاریخ بازنگری: ۱۴۰۵/۰۸/۱۶
تاریخ پذیرش: ۱۴۰۵/۰۳/۲۳
ISSN: 3116-1758
eISSN: 3115-9400

دو فصلنامه مطالعات مروری علوم ورزشی و تندرستی
سال اول، شماره دوم، بهار و تابستان ۱۴۰۵، ۴۰-۶۵
Jshsr.atu.ac.ir
DOI: 10.22054/jshsr.2026.84750.1017

مرور نظام‌مند: نقش استرس اکسیداتیو در ایجاد و تشدید آسیب‌های عضلانی ناشی از ورزش: رویکردهای تغذیه‌ای و تمرینی برای بهبود ریکاوری

محمدرضا باقری * کارشناسی ارشد تمرینات اصلاحی، دانشگاه خوارزمی تهران، ایران

نگین سادات طباطبایی دانشجوی کارشناسی ارشد آسیب‌های ورزشی و تمرینات اصلاحی، دانشکده علوم تربیت بدنی، دانشگاه امام رضا مشهد، ایران

فرزاد دانشمند دانشجوی دکتری فیزیولوژی ورزشی دانشگاه آزاد اصفهان، ایران

چکیده

زمینه و هدف: آسیب عضلانی ناشی از ورزش یکی از پیامدهای رایج فعالیت‌های ورزشی شدید، به‌ویژه تمرینات اکسنتریک محسوب می‌شود و معمولاً با درد عضلانی تأخیری، کاهش قدرت عضلانی، محدودیت دامنه حرکتی و افت عملکرد ورزشی همراه است. در سال‌های اخیر، استرس اکسیداتیو به‌عنوان یکی از مهم‌ترین مکانیسم‌های دخیل در ایجاد و تشدید این آسیب‌ها مورد توجه پژوهشگران قرار گرفته است. استرس اکسیداتیو زمانی رخ می‌دهد که میان تولید گونه‌های فعال اکسیژن (ROS) و ظرفیت سیستم دفاع آنتی‌اکسیدانی بدن عدم تعادل ایجاد شود. اگرچه ROS در شرایط فیزیولوژیک نقش مهمی در تنظیم مسیرهای پیام‌رسانی سلولی، پاسخ‌های ایمنی و سازگاری‌های ناشی از تمرین ایفا می‌کنند اما افزایش بیش‌ازحد آن‌ها می‌تواند موجب پراکسیداسیون لیپیدها، تخریب پروتئین‌ها، آسیب DNA و تشدید فرآیندهای التهابی شود. با افزایش شدت و حجم تمرینات ورزشی، به‌ویژه در ورزشکاران حرفه‌ای، احتمال بروز استرس اکسیداتیو و آسیب عضلانی افزایش می‌یابد. در این شرایط، مداخلات تغذیه‌ای و برنامه‌ریزی مناسب تمرینی به عنوان دو راهبرد مهم برای کنترل استرس اکسیداتیو و تسریع فرآیند ریکاوری مطرح شده‌اند. مطالعات مختلف به بررسی اثرات آنتی‌اکسیدان‌هایی نظیر ویتامین C، ویتامین E، پلی‌فنول‌ها، کورکومین، N-استیل سیستئین و همچنین الگوهای تغذیه‌ای مبتنی بر مصرف میوه‌ها، سبزیجات، غلات کامل و اسیدهای چرب امگا-۳ پرداخته‌اند. علاوه‌براین، راهبردهای تمرینی نظیر دوره‌بندی تمرین، مدیریت تمرینات اکسنتریک، تمرینات متقاطع و ریکاوری فعال نیز مورد توجه قرار گرفته‌اند. باوجود حجم گسترده مطالعات منتشرشده، هنوز نتایج پژوهش‌ها در برخی حوزه‌ها ازجمله مصرف مکمل‌های آنتی‌اکسیدانی و اثر آن‌ها بر سازگاری‌های عضلانی یکسان نیست. ازاین‌رو، هدف اصلی این مرور نظام‌مند، بررسی جامع نقش استرس اکسیداتیو در ایجاد و تشدید آسیب‌های عضلانی ناشی از ورزش و تحلیل شواهد موجود درباره راهکارهای تغذیه‌ای و تمرینی مؤثر در کاهش آسیب عضلانی و بهبود ریکاوری ورزشکاران است.

روش پژوهش: مطالعه حاضر به روش مرور نظام‌مند و براساس دستورالعمل PRISMA انجام شد. برای گردآوری داده‌ها، جستجوی نظام‌مند منابع علمی در پایگاه‌های اطلاعاتی PubMed، Scopus، Web of Science و Google Scholar صورت گرفت. کلیدواژه‌های اصلی شامل «Oxidative Stress» ، «Reactive Oxygen Species»، «Exercise-Induced Muscle

* نویسنده مسئول: Mohammadreza.bagheri6681@gmail.com

«Damage»، «Antioxidants»، «Recovery»، «Athletes» و معادل‌های مرتبط آن‌ها بودند و با استفاده از عملگرهای منطقی AND و OR ترکیب شدند. معیارهای ورود شامل مطالعاتی بودند که به بررسی نقش استرس اکسیداتیو در ورزشکاران، مکانیسم‌های تولید گونه‌های فعال اکسیژن، آسیب عضلانی ناشی از ورزش، مداخلات تغذیه‌ای آنتی‌اکسیدانی و راهبردهای تمرینی مرتبط با ریکاوری پرداخته بودند. همچنین مرورهای نظام‌مند، متاآنالیزها، مطالعات کارآزمایی بالینی و مطالعات مشاهده‌ای منتشرشده طی دو دهه اخیر مورد بررسی قرار گرفتند. مطالعات مرتبط با بیماری‌های غیرورزشی، جمعیت‌های غیرفعال، افراد دارای بیماری‌های خاص و پژوهش‌های فاقد کیفیت روش‌شناختی مناسب از مطالعه حذف شدند. پس از حذف منابع تکراری، عناوین و چکیده‌ها غربالگری شدند و در مرحله بعد متن کامل مقالات واجد شرایط مورد ارزیابی قرار گرفت. در نهایت ۲۷ مطالعه شامل مطالعات مروری، کارآزمایی‌های بالینی و مطالعات مشاهده‌ای وارد تحلیل نهایی شدند. کیفیت مطالعات با استفاده از مقیاس Jadad برای کارآزمایی‌های بالینی و مقیاس Newcastle-Ottawa برای مطالعات مشاهده‌ای ارزیابی شد.

یافته‌ها: در مجموع ۲۷ مطالعه واجد شرایط وارد مرور نهایی شدند. نتایج نشان دادند که استرس اکسیداتیو یکی از مهم‌ترین عوامل ایجاد و تشدید آسیب عضلانی ناشی از ورزش است و افزایش تولید ROS در جریان فعالیت‌های ورزشی شدید می‌تواند موجب آسیب ساختارهای سلولی، افزایش التهاب و کاهش عملکرد عضلانی شود. مهم‌ترین شاخص‌های زیستی گزارش‌شده در مطالعات شامل مالون‌دی‌آلدئید (MDA)، کربونیل‌های پروتئینی (PC)، کراتین کیناز (CK)، لاکتات دهیدروژناز (LDH)، گلوتاتیون (GSH) و سوپراکسید دیسموتاز (SOD) بودند.مطالعات تغذیه‌ای نشان دادند که رژیم‌های غذایی غنی از میوه‌ها، سبزیجات، غلات کامل و منابع امگا-۳ می‌توانند به کاهش استرس اکسیداتیو و التهاب کمک کنند. همچنین مصرف پلی‌فنول‌ها، کورکومین، زغال‌اخته نیوزیلندی، گیلاس ترش مونتمورانسی، کاکائو و ترکیبات تیولی در بسیاری از مطالعات با بهبود شاخص‌های ریکاوری و کاهش آسیب عضلانی همراه بود. در مقابل، برخی پژوهش‌ها گزارش کردند که مصرف دوزهای بالای مکمل‌های ویتامین C و E ممکن است از طریق کاهش بیش‌ازحد ROS، در سازگاری‌های فیزیولوژیک ناشی از تمرین ازجمله بیوژنز میتوکندری و بهبود حساسیت به انسولین، اختلال ایجاد کند. در حوزه تمرین، شواهد نشان دادند که دوره‌بندی تمرینی، افزایش تدریجی بار تمرینات اکسنتریک، استفاده از تمرینات متقاطع و اجرای برنامه‌های ریکاوری فعال می‌توانند از تجمع استرس اکسیداتیو جلوگیری کرده و روند بازسازی عضلات را تسریع کنند. همچنین مطالعات جدید بر نقش میکروبیوتای روده در تنظیم پاسخ‌های التهابی و اکسیداتیو تأکید داشتند و نشان دادند که پلی‌فنول‌ها، رژیم‌های پرفیبر و پروبیوتیک‌ها می‌توانند از طریق بهبود سلامت روده، فرآیند ریکاوری را تقویت کنند. بااین‌حال، شکاف‌هایی در ادبیات پژوهش وجود دارد ازجمله نبود اجماع درباره دوز بهینه مکمل‌های آنتی‌اکسیدانی، محدود بودن شواهد مربوط به اثرات بلندمدت این مکمل‌ها، تفاوت پاسخ ورزشکاران در رشته‌های مختلف و کمبود مطالعات مرتبط با رویکردهای شخصی‌سازی‌شده مبتنی بر ویژگی‌های فردی.

خلاصه یافته‌های کلیدی مرور

محور	مهم‌ترین یافته
استرس اکسیداتیو	افزایش ROS عامل اصلی تشدید EIMD
تغذیه	پلی‌فنول‌ها، امگا-۳ و رژیم غذایی غنی از آنتی‌اکسیدان مؤثر بودند.
مکمل‌ها	NAC، کورکومین و مالتونین اثرات امیدوارکننده داشتند.
محدودیت مکمل‌ها	دوزهای بالای ویتامین C و E احتمال اختلال در سازگاری عضلانی
تمرین	دوره‌بندی و ریکاوری فعال موجب کاهش آسیب عضلانی شدند.
میکروبیوتا	سلامت روده با کاهش التهاب و استرس اکسیداتیو مرتبط بود.

بحث و نتیجه‌گیری: یافته‌های این مرور نظام‌مند نشان دادند که استرس اکسیداتیو نقش کلیدی در بروز و تشدید آسیب عضلانی ناشی از ورزش دارد و مدیریت صحیح آن می‌تواند به بهبود ریکاوری و ارتقای عملکرد ورزشی منجر شود. نتایج حاکی از آن است که ترکیب یک رژیم غذایی متعادل و غنی از منابع طبیعی آنتی‌اکسیدانی با برنامه تمرینی اصولی، مؤثرترین راهبرد برای کنترل استرس

اکسیداتیو است. درعین‌حال، مصرف بی‌رویه مکمل‌های آنتی‌اکسیدانی باید با احتیاط انجام شود زیرا ممکن است سازگاری‌های مفید ناشی از تمرین را مختل کند. از کاربردهای عملی این یافته‌ها می‌توان به طراحی برنامه‌های تغذیه‌ای و تمرینی اختصاصی برای ورزشکاران اشاره کرد. مهم‌ترین محدودیت‌های مطالعه شامل ناهمگونی مطالعات، احتمال سوگیری انتشار و تفاوت در روش‌های اندازه‌گیری شاخص‌های استرس اکسیداتیو بود. انجام کارآزمایی‌های بالینی بزرگ‌تر، بررسی اثرات بلندمدت مکمل‌های آنتی‌اکسیدانی و توسعه رویکردهای شخصی‌سازی‌شده برای ورزشکاران، از مهم‌ترین پیشنهادهای پژوهشی آینده محسوب می‌شود.

واژگان کلیدی: استرس اکسیداتیو، آسیب عضلانی ناشی از ورزش (EIMD)، گونه‌های فعال اکسیژن (ROS)، آنتی‌اکسیدان‌ها، بازتوانی ورزشی.

۱. مقدمه

فعالیت‌های ورزشی شدید و طولانی‌مدت می‌توانند منجر به تغییرات فیزیولوژیکی و بیوشیمیایی متعددی در بدن شوند که یکی از مهم‌ترین آن‌ها، استرس اکسیداتیو است. استرس اکسیداتیو به عدم تعادل بین تولید گونه‌های فعال اکسیژن (ROS) و توانایی بدن در خنثی‌سازی آن‌ها از طریق سیستم‌های آنتی‌اکسیدانی اطلاق می‌شود. در شرایط عادی، ROS نقش مهمی در تنظیم سیگنال‌های سلولی و پاسخ‌های ایمنی دارند اما زمانی که تولید آن‌ها بیش‌ازحد باشد، می‌توانند به ساختارهای سلولی نظیر لیپیدها، پروتئین‌ها و DNA آسیب برسانند و در نهایت، منجر به کاهش عملکرد عضلانی و تأخیر در بازتوانی شوند.

در ورزشکاران، به‌ویژه افرادی که در فعالیت‌های استقامتی یا قدرتی شدید شرکت می‌کنند، استرس اکسیداتیو به‌عنوان یکی از عوامل کلیدی در ایجاد و تشدید آسیب‌های عضلانی شناخته می‌شود. مطالعات نشان داده‌اند که ورزش‌های با شدت بالا باعث افزایش تولید ROS از طریق مسیرهای متعددی ازجمله عملکرد میتوکندری، اکسیدازهای NADPH و زانتین اکسیداز می‌شوند. این ROSها می‌توانند به غشای سلولی، پروتئین‌های ساختاری و آنزیمی و حتی DNA آسیب برسانند که نتیجه آن، افزایش التهاب، پراکسیداسیون لیپیدی و کاهش قابلیت انقباضی عضلات است. این فرآیندها در نهایت به بروز آسیب عضلانی ناشی از ورزش (EIMD)[1] منجر می‌شوند که با علائمی مانند درد عضلانی تأخیری[2]، کاهش قدرت و کاهش دامنه حرکتی همراه است.

با توجه به اثرات نامطلوب استرس اکسیداتیو بر سلامت و عملکرد ورزشی، محققان به‌دنبال یافتن راهکارهایی برای کاهش اثرات آن و بهبود فرآیند بازتوانی عضلانی هستند. در این راستا، مداخلات تغذیه‌ای به‌عنوان یکی از مؤثرترین روش‌های مدیریت استرس اکسیداتیو شناخته شده‌اند. آنتی‌اکسیدان‌های طبیعی و مصنوعی مانند ویتامین‌های C و E، پلی‌فنول‌ها، فلاونوئیدها و ترکیباتی مانند کورکومین و N–استیل سیستئین[3] می‌توانند با کاهش اثرات مخرب ROS و تقویت سیستم دفاعی آنتی‌اکسیدانی بدن، به بازتوانی بهتر و کاهش آسیب عضلانی کمک کنند. علاوه‌براین، پیروی از یک رژیم غذایی متعادل شامل مواد غذایی غنی از آنتی‌اکسیدان‌ها مانند میوه‌ها، سبزیجات، غلات کامل و اسیدهای چرب امگا-۳ نیز می‌تواند نقش مهمی در مقابله با استرس اکسیداتیو داشته باشد.

علاوه‌بر مداخلات تغذیه‌ای، استراتژی‌های تمرینی نیز تأثیر بسزایی در کنترل استرس اکسیداتیو و کاهش آسیب عضلانی دارند. برنامه‌ریزی مناسب تمرینات از طریق اصولی مانند دوره‌بندی تمرینی، مدیریت حجم و شدت تمرینات غیرعادی (به‌ویژه تمرینات غیرعادی که شامل انقباضات برون‌گرا هستند) و استفاده از تکنیک‌های بازیابی فعال، می‌تواند به کاهش اثرات مخرب استرس اکسیداتیو و بهبود عملکرد ورزشکاران کمک کند. همچنین، تحقیقات اخیر نشان داده‌اند که میکروبیوتای روده می‌تواند در تنظیم التهاب و استرس اکسیداتیو مرتبط

1. Exercise-Induced Muscle Damage
2. DOMS
3. NAC

با ورزش نقش کلیدی داشته باشد و اصلاح رژیم غذایی برای حفظ تعادل میکروبیوتا، می‌تواند به کاهش آسیب‌های عضلانی کمک کند.

با توجه به اهمیت موضوع، بررسی دقیق‌تر مکانیسم‌های زیربنایی استرس اکسیداتیو، شناسایی راهکارهای تغذیه‌ای و تمرینی مؤثر و تدوین استراتژی‌های شخصی‌سازی‌شده برای ورزشکاران مختلف، ازجمله حوزه‌های تحقیقاتی مهمی هستند که می‌توانند به بهبود سلامت، کاهش آسیب‌های عضلانی و افزایش عملکرد ورزشی کمک کنند. در این مطالعه، به بررسی نقش استرس اکسیداتیو در ایجاد و تشدید آسیب‌های عضلانی ورزشی پرداخته شده و راهکارهای تغذیه‌ای و تمرینی مناسب برای بهبود بازتوانی مورد بحث قرار می‌گیرند.

۱-۱. اهداف تحقیق

هدف اصلی این پژوهش، بررسی نقش استرس اکسیداتیو در ایجاد و تشدید آسیب‌های عضلانی مرتبط با ورزش و ارائه راهبردهای تغذیه‌ای و تمرینی برای کاهش این آسیب‌ها و بهبود فرآیند ریکاوری است. در این راستا، اهداف زیر دنبال می‌شود:

- بررسی مکانیسم‌های زیستی استرس اکسیداتیو در ورزشکاران؛
- تحلیل فرآیند تولید گونه‌های اکسیژن فعال[1] در عضلات هنگام فعالیت ورزشی؛
- ارزیابی تأثیر استرس اکسیداتیو بر ساختار و عملکرد عضلات ورزشکاران؛
- شناسایی عوامل مؤثر بر افزایش استرس اکسیداتیو در ورزشکاران؛
- بررسی تأثیر شدت، نوع و حجم تمرینات بر افزایش ROS و آسیب‌های عضلانی؛
- تحلیل نقش تغذیه، استراحت و شرایط محیطی در افزایش یا کاهش استرس اکسیداتیو؛
- ارزیابی تأثیر مداخلات تغذیه‌ای بر کاهش استرس اکسیداتیو و بهبود ریکاوری عضلانی؛
- بررسی تأثیر مصرف ویتامین‌های آنتی‌اکسیدانی (C و E)، پلی‌فنول‌ها، و اسیدهای چرب امگا-۳؛
- تحلیل تأثیر مکمل‌های آنتی‌اکسیدانی بر بهبود عملکرد ورزشی و جلوگیری از آسیب‌های عضلانی؛
- بررسی استراتژی‌های تمرینی برای کاهش اثرات منفی استرس اکسیداتیو؛
- ارزیابی نقش دوره‌بندی تمرینی[2] در مدیریت استرس اکسیداتیو؛
- بررسی تأثیر تکنیک‌های ریکاوری فعال و تمرینات متقاطع[3] در کاهش آسیب‌های عضلانی؛
- تحلیل ارتباط بین میکروبیوتای روده و استرس اکسیداتیو در ورزشکاران؛
- بررسی نقش رژیم غذایی و مکمل‌های پروبیوتیکی در کاهش التهاب و استرس اکسیداتیو؛
- تحلیل تأثیر مصرف پروتئین و پلی‌فنول‌ها بر ترکیب میکروبیوتای روده و تطابق‌های ورزشی؛
- ارائه راهبردهای کاربردی برای بهینه‌سازی عملکرد و کاهش آسیب‌های عضلانی در ورزشکاران؛
- تدوین توصیه‌های علمی در زمینه تغذیه و مکمل‌یاری برای بهبود ریکاوری عضلات؛

1. ROS
2. Periodization
3. Cross-Training

– پیشنهاد راهکارهای تمرینی و تغذیه‌ای جهت کاهش اثرات منفی استرس اکسیداتیو بر عملکرد ورزشی؛

این پژوهش با ترکیب دانش فیزیولوژی ورزشی، بیوشیمی عضلانی و تغذیه ورزشی تلاش دارد تا راهکارهای علمی و عملی برای کنترل استرس اکسیداتیو و بهبود عملکرد ورزشکاران ارائه دهد.

۲. روش تحقیق

این پژوهش با هدف بررسی نقش استرس اکسیداتیو در آسیب‌های عضلانی مرتبط با ورزش و ارائه راهکارهای تغذیه‌ای و تمرینی برای بهبود ریکاوری انجام شده است. در این راستا، روش تحقیق به‌صورت مروری و تحلیلی بر مطالعات علمی معتبر در حوزه فیزیولوژی ورزشی، بیوشیمی عضلانی و تغذیه ورزشی صورت گرفته است.

۲-۱. روش جمع‌آوری داده‌ها

داده‌های این پژوهش از طریق جستجوی مقالات علمی در پایگاه‌های معتبر مانند PubMed، Scopus، Web of Science و Google Scholar استخراج شده است. برای اطمینان از جامعیت و کیفیت منابع، مقالات مورد بررسی شامل مطالعات کارآزمایی بالینی، مرورهای سیستماتیک و متاآنالیزهای منتشر شده در ۲۰ سال اخیر بودند.

فرآیند انتخاب مطالعات با دقت بالا و براساس دستورالعمل‌های (PRISMA)[1] انجام شد تا شفافیت و تکرارپذیری روش تحقیق تضمین شود.

به این ترتیب، ابتدا تمامی مقالات مرتبط براساس کلمات کلیدی اولیه شناسایی شدند، سپس پس از حذف موارد تکراری، عنوان و چکیده مقالات جهت بررسی اولیه غربال شدند. در مرحله بعد، متن کامل مقالات با دقت مطالعه شد و تنها آن دسته از مقالات که معیارهای ورود را به‌طور کامل پوشش می‌دادند، برای تحلیل نهایی انتخاب شدند. جزئیات کامل‌تر این فرآیند در جدول ۱ ارائه شده است.

۲-۲. معیارهای ورود و خروج مطالعات

- معیارهای ورود: مطالعاتی که به بررسی استرس اکسیداتیو در ورزشکاران، تأثیر آنتی‌اکسیدان‌ها و استراتژی‌های تمرینی در کاهش آسیب‌های عضلانی پرداخته‌اند.

این شامل مطالعاتی بود که به‌طور خاص بر مکانیسم‌های تولید ROS، تأثیر آن‌ها بر ساختار و عملکرد عضلانی و همچنین اثربخشی مداخلات تغذیه‌ای (مانند ویتامین‌های آنتی‌اکسیدانی، پلی‌فنول‌ها، اسیدهای چرب امگا-۳) و استراتژی‌های تمرینی (مانند دوره‌بندی، مدیریت تمرینات اکسنتریک، کراس‌ترینینگ و ریکاوری فعال) متمرکز بودند.

- معیارهای خروج: مطالعاتی که بر بیماری‌های غیرمرتبط، گروه‌های سنی غیرفعال یا شرایط خاص پزشکی متمرکز بوده‌اند.

1. Preferred Reporting Items for Systematic Reviews and Meta-Analyses

همچنین، مطالعاتی که کیفیت متدولوژیکی پایین داشتند (براساس ارزیابی‌های Jadad Scale و Newcastle-Ottawa Scale) یا داده‌های کافی برای تحلیل ارائه نمی‌کردند، از مطالعه خارج شدند.

۲-۳. تحلیل داده‌ها

داده‌های به‌دست‌آمده براساس روش تحلیل محتوای کیفی و مقایسه یافته‌های علمی بررسی شده‌اند. علاوه‌براین، شاخص‌های زیستی مرتبط با استرس اکسیداتیو (مانند MDA، PC، CK و SOD) و مداخلات تغذیه‌ای (مانند مکمل‌های ویتامینی، پلی‌فنول‌ها، و اسیدهای چرب امگا-۳) ارزیابی شده‌اند.

۲-٤. اعتبارسنجی و قابلیت اطمینان

برای افزایش دقت، مقالات منتخب براساس ضریب تأثیر[1] و میزان استناد بررسی شده‌اند. همچنین، از روش‌های ارزیابی کیفیت Jadad Scale برای مطالعات کارآزمایی بالینی و Newcastle-Ottawa Scale برای مطالعات کوهورت استفاده شده است.

جدول ۱. مشخصات و یافته‌های کلیدی مطالعات منتخب

شناسه مطالعه (ID)	نویسنده اصلی و سال	نوع مطالعه (براساس متن مقاله شما)	هدف اصلی (براساس متن مقاله شما)	جمعیت/ شرکت‌کنندگان (براساس متن مقاله شما)
[۱] He, F.J., et al. (2016)	مرور	بررسی مکانیسم‌های ردوکس گونه‌های فعال اکسیژن در ورزش	نامشخص (مطالعه مروری)	گونه‌های فعال اکسیژن (ROS) در فرآیندهای متابولیک، پاسخ‌های فیزیولوژیکی و آسیب بافتی در ورزش نقش دارند.
[۲] Tanabe, Y., et al. (2021)	مرور	بررسی مکمل‌های غذایی برای کاهش آسیب عضلانی ناشی از ورزش و درد عضلانی تأخیری	نامشخص (مطالعه مروری)	برخی مکمل‌ها می‌توانند درد عضلانی و EIMD را کاهش دهند؛ ترکیبات مانند پلی‌فنول‌ها و کورکومین مورد توجه هستند.
[۳] Owens, D.J., et al. (2018)	مرور	بررسی EIMD: چیستی، علل و راه‌حل‌های تغذیه‌ای	نامشخص (مطالعه مروری)	EIMD اغلب پس از فعالیت‌های اکسنتریک رخ می‌دهد و با درد، کاهش قدرت و محدودیت حرکت همراه است.
[٤] Milne, G.L., et al. (2008)	مرور	بیوشیمی مسیر ایزوپروستان	نامشخص (مطالعه مروری)	ROS به لیپیدهای غشای سلولی حمله می‌کنند و منجر به تشکیل MDA می‌شوند؛ استرس اکسیداتیو باعث تغییر پروتئین‌ها و تشکیل کربونیل‌ها می‌گردد.
[۵] Neubauer, O. & Yfanti, C. (NaN)	مرور	آنتی‌اکسیدان‌ها در تغذیه پایه ورزشکاران: ملاحظات برای مصرف ویتامین C و E	نامشخص (مطالعه مروری)	ویتامین‌های C و E به‌عنوان آنتی‌اکسیدان‌های شناخته‌شده، رادیکال‌های آزاد را خنثی می‌کنند.

1. Impact Factor

شناسه مطالعه (ID)	نویسنده اصلی و سال	نوع مطالعه (براساس متن مقاله شما)	هدف اصلی (براساس متن مقاله شما)	جمعیت/ شرکت‌کنندگان (براساس متن مقاله شما)
Cheng, A.J., et al. (2020) [٦]	مرور	مکانیسم‌های داخل عضلانی تمرین‌زدگی	نامشخص (مطالعه مروری)	ریکاوری ناکافی بین جلسات تمرینی می‌تواند منجر به افزایش تجمعی استرس اکسیداتیو شود؛ دوره‌بندی تمرینی برای کاهش خطر تمرین‌زدگی مهم است.
Barbosa, C.S., et al. (2017) [۷]	کارآزمایی بالینی	بررسی تأثیر مکمل‌گذاری کنجد بر CK, LDH، نشانگرهای استرس اکسیداتیو و ظرفیت هوازی در بازیکنان فوتبال	بازیکنان فوتبال نیمه‌حرفه‌ای	مصرف کنجد ممکن است آسیب عضلانی و استرس اکسیداتیو را کاهش داده و ظرفیت هوازی را بهبود بخشد.
Hajjar, D.P. & Gotto, A. M. (2013) [۸]	مرور	ارتباط بیولوژیکی التهاب و استرس اکسیداتیو در پاتوژنز بیماری‌های شریانی	نامشخص (مطالعه مروری)	قرار گرفتن در معرض آلودگی، گرما و ارتفاع می‌تواند استرس اکسیداتیو را افزایش دهد.
Amawi, A.T., et al. (2024) [۹]	مرور	نیازهای تغذیه‌ای ورزشکاران: یک مرور روایی	نامشخص (مطالعه مروری)	رژیم غذایی برنامه‌ریزی شده باید انرژی، درشت‌مغذی‌ها و ریزمغذی‌های کافی را فراهم کند؛ مصرف کافی پروتئین برای ترمیم و ریکاوری عضلات ضروری است. هیدراتاسیون کافی برای پیشگیری از استرس اکسیداتیو و حمایت از عملکرد عضلانی ضروری است.
Mason, S.A., et al. (2020) [۱۰]	مرور	مکمل‌های آنتی‌اکسیدانی و ورزش استقامتی: شواهد کنونی و بینش‌های مکانیسمی	نامشخص (مطالعه مروری)	اثربخشی مکمل‌های آنتی‌اکسیدانی پیچیده و مورد بحث است؛ NAC و ملاتونین ممکن است در کاهش نشانگرهای استرس اکسیداتیو مؤثر باشند.
Jwko, E., et al. (2014) [۱۱]	کارآزمایی بالینی	تأثیر مکمل‌گذاری عصاره چای سبز بر پارامترهای استرس اکسیداتیو ناشی از ورزش در دوندگان دوی سرعت مرد	دوندگان دوی سرعت مرد	دوزهای بالای ویتامین‌های C و E ممکن است با سازگاری عضلات به تمرین تداخل داشته باشند.
Gonçalves, A.C., et al. (2022) [۱۲]	مرور	تأثیر مکمل‌گذاری غذایی فنول‌های کاربردی بر عملکرد و ریکاوری ورزشکاران	نامشخص (مطالعه مروری)	پلی‌فنول‌ها دارای خواص آنتی‌اکسیدانی و ضدالتهابی هستند و ممکن است درد عضلانی را کاهش داده و ریکاوری را تسریع کنند.
McLeay, Y., et al. (2012) [۱۳]	کارآزمایی بالینی	تأثیر مصرف زغال‌اخته نیوزلندی بر ریکاوری از آسیب عضلانی ناشی از ورزش اکسنتریک	نامشخص (مطالعه بر روی انسان)	مصرف زغال‌اخته نیوزلندی ریکاوری را تسریع می‌کند.

شناسه مطالعه (ID)	نویسنده اصلی و سال	نوع مطالعه (براساس متن مقاله شما)	هدف اصلی (براساس متن مقاله شما)	جمعیت/ شرکت‌کنندگان (براساس متن مقاله شما)
Bell, P.G., et al. (2014) [۱٤]	کارآزمایی بالینی	تسهیل ریکاوری با گیلاس مونت‌مورانسی پس از تمرینات شدید و متابولیکی چالش‌برانگیز	نامشخص (مطالعه بر روی انسان)	کنسانتره گیلاس ترش مونت‌مورانسی می‌تواند ریکاوری را تسریع کرده و آسیب عضلانی ناشی از ورزش شدید را کاهش دهد.
Massaro, M., et al. (2019) [۱۵]	مرور	تأثیر محصولات کاکائو و ترکیبات پلی‌فنولی آن بر عملکرد ورزشی و آسیب و التهاب عضلانی ناشی از ورزش	نامشخص (مطالعه مروری)	مصرف حاد، زیرحاد و مزمن پلی‌فنول‌های کاکائو ممکن است استرس اکسیداتیو ناشی از ورزش را کاهش دهد.
Brancaccio, M., et al. (2020) [۱٦]	مرور	تیول‌های غذایی: یک استراتژی حمایتی بالقوه در برابر استرس اکسیداتیو در نارسایی قلبی و آسیب عضلانی در طول فعالیت‌های ورزشی	نامشخص (مطالعه مروری)	تیول‌های غذایی ممکن است استراتژی حمایتی بالقوه‌ای در برابر استرس اکسیداتیو و آسیب عضلانی باشند.
Zhao, L., et al. (2020) [۱۷]	مرور	توصیه‌هایی برای توانبخشی تنفسی در بزرگسالان مبتلا به بیماری ویروس کرونا ۲۰۱۹	نامشخص (مطالعه مروری)	ریکاوری فعال می‌تواند جریان خون به عضلات را بهبود بخشد و به دفع محصولات متابولیک زائد کمک کند.
Fatouros, I.G., et al. (2010) [۱۸]	کارآزمایی بالینی	سیر زمانی تغییرات در استرس اکسیداتیو و پاسخ‌های وضعیت آنتی‌اکسیدانی پس از یک بازی فوتبال	بازیکنان فوتبال	کربونیل‌های پروتئینی (PC) نشانگر اکسیداسیون پروتئین‌ها هستند؛ گلوتاتیون (GSH) یک آنتی‌اکسیدان اصلی داخل سلولی است.
Sohail, M., et al. (2020) [۱۹]	کارآزمایی بالینی/ مشاهده‌ای	ارزیابی سیتوکین‌های سرم و نشانگرهای استرس اکسیداتیو در ورزشکاران نخبه و کشف پروفایل‌های منحصربه‌فرد مرتبط با رشته‌های ورزشی مختلف	ورزشکاران نخبه در رشته‌های مختلف	کاتالاز آنزیمی است که تجزیه پراکسید هیدروژن را کاتالیز می‌کند؛ CRP نشانگر التهاب است. ورزشکاران تیمی ترکیبی از فعالیت‌های استقامتی و شدید را تجربه می‌کنند که آن‌ها را در معرض خطر استرس اکسیداتیو و آسیب عضلانی قرار می‌دهد.
Moreno-Pérez, D., et al. (2018) [۲۰]	کارآزمایی بالینی تصادفی‌شده کنترل‌شده دوسوکور	تأثیر مکمل پروتئین بر میکروبیوتای روده ورزشکاران استقامتی: یک مطالعه پایلوت	ورزشکاران استقامتی	میکروبیوتای روده در التهاب و استرس اکسیداتیو ناشی از ورزش نقش دارد؛ مصرف طولانی‌مدت مکمل‌های پروتئینی ممکن است تأثیر منفی بر میکروبیوتای روده داشته باشد.
Nieman, D. & Mitmesser, S. (2017) [۲۱]	مرور	تأثیر بالقوه تغذیه بر ریکاوری سیستم ایمنی از فعالیت‌های شدید: یک دیدگاه	نامشخص (مطالعه مروری)	پلی‌فنول‌ها می‌توانند به‌عنوان پری‌بیوتیک عمل کرده و رشد باکتری‌های مفید روده را تقویت کنند.

شناسه مطالعه (ID)	نویسنده اصلی و سال	نوع مطالعه (براساس متن مقاله شما)	هدف اصلی (براساس متن مقاله شما)	جمعیت/ شرکت‌کنندگان (براساس متن مقاله شما)
		متابولومیکس		
[۲۲] Neuschwander-Tetri, B.A. (2010)	مرور	لیپوتوکسیسیته کبدی و پاتوژنز استئاتوهپاتیت غیرالکلی: نقش مرکزی متابولیت‌های اسید چرب غیرتری‌گلیسرید	نامشخص (مطالعه مروری)	رژیم غذایی پرفیبر و مکمل‌های پروبیوتیک سلامت گوارش را بهبود می‌بخشند؛ محدود کردن غذاهای فرآوری‌شده سلامت روده را حفظ می‌کند.
[۲۳] Chen, K., et al. (2022)	مرور	مسیر سیگنالینگ Forkhead Box O در آتروفی عضله اسکلتی	نامشخص (مطالعه مروری)	مسیر FOXO در آتروفی عضلانی نقش دارد؛ استراتژی‌هایی مانند تمرینات مقاومتی و مکمل‌های پروتئینی می‌توانند با آتروفی عضلانی مقابله کنند.
[۲۴] Sahlin, K., et al. (2010)	کارآزمایی بالینی	ورزش فوق استقامتی تولید گونه‌های فعال اکسیژن را در میتوکندری جدا شده از عضله اسکلتی انسان افزایش می‌دهد	انسان (میتوکندری جدا شده)	ورزشکاران استقامتی به‌دلیل مدت و شدت طولانی تمرینات در معرض خطر بالای استرس اکسیداتیو قرار دارند.
[۲۵] Scott, M.J. & Fawcett, W. (2014)	مرور	نوشیدنی پیش‌بارگیری کربوهیدرات خوراکی برای جراحی بزرگ- اولین گام‌ها از قحطی تا فراوانی	نامشخص (مطالعه مروری)	افزایش ذخایر گلیکوژن عضلانی می‌تواند عملکرد استقامتی را بهبود بخشیده و استرس اکسیداتیو را کاهش دهد.
[۲۶] Brancaccio, M., et al. (2022)	مرور	نقش بیولوژیکی ویتامین‌ها در عضله، قلب و میکروبیوتای ورزشکاران	نامشخص (مطالعه مروری)	رژیم غذایی غنی از آنتی‌اکسیدان‌ها (میوه‌ها، سبزیجات، غلات کامل) برای مقابله با استرس اکسیداتیو مهم است.
[۲۷] [بدون نویسنده/سال] (NaN)	نامشخص	با خانوادگی	نامشخص	کراتین می‌تواند قدرت و توان عضلانی را بهبود بخشد و ممکن است خواص آنتی‌اکسیدانی نیز داشته باشد.

مأخذ: یافته‌های پژوهش

۳. بحث؛ استرس اکسیداتیو و نقش آن در آسیب‌های عضلانی مرتبط با ورزش

اگرچه نقش آنتی‌اکسیدان‌ها در خنثی‌سازی رادیکال‌های آزاد و کاهش استرس اکسیداتیو ناشی از ورزش به‌خوبی مستند شده و مصرف متعادل آن‌ها از طریق رژیم غذایی غنی از میوه‌ها، سبزیجات و غلات کامل می‌تواند به بهبود ریکاوری و کاهش آسیب‌های عضلانی کمک کند، لازم است به جنبه‌های پیچیده‌تر و بالقوه منفی مصرف بی‌رویه مکمل‌های آنتی‌اکسیدانی نیز توجه شود. گونه‌های فعال اکسیژن علاوه‌بر نقش مخرب خود در دوزهای بالا، به‌عنوان مولکول‌های سیگنالینگ مهم در فرآیندهای فیزیولوژیکی و سازگاری‌های سلولی به تمرین عمل می‌کنند.

برخی تحقیقات نشان داده‌اند که کاهش بیش‌ازحد ROS از طریق مصرف دوزهای بسیار بالای مکمل‌های آنتی‌اکسیدانی، ممکن است این سیگنالینگ ضروری را مختل کرده و در نتیجه، روند سازگاری عضلات به

استرس تمرین و بهبود ظرفیت آنتی‌اکسیدانی درونی بدن را به خطر اندازد (Jwko, et al., 2014). به‌عنوان مثال، مطالعاتی وجود دارد که تداخل ویتامین‌های آنتی‌اکسیدانی C و E با بهبود حساسیت به انسولین و بیوژنز میتوکندری ناشی از تمرین را نشان داده‌اند. این امر حاکی از آن است که بدن برای ایجاد پاسخ‌های تطبیقی مثبت به تمرین، به سطوح مشخصی از استرس اکسیداتیو نیاز دارد. بنابراین، رویکرد بهینه در مدیریت استرس اکسیداتیو در ورزشکاران، نه حذف کامل ROS، بلکه حفظ تعادل ردوکس مناسب است. این تعادل بیشتر از طریق یک رژیم غذایی متعادل و غنی از منابع طبیعی آنتی‌اکسیدانی قابل دستیابی است تا اتکای صرف به مکمل‌ها با دوزهای بالا که ممکن است اثرات دوگانه‌ای داشته باشند.

۳-۱. درک استرس اکسیداتیو و آسیب عضلانی

آسیب عضلانی ناشی از ورزش[1] یک نتیجه شایع از فعالیت‌های بدنی شدید، به‌ویژه تمرینات اکسنتریک (تمریناتی که در آن عضلات در حال کشیده شدن منقبض می‌شوند) است [۲]. EIMD با علائمی مانند درد عضلانی، کاهش قدرت و محدودیت دامنه حرکتی همراه است [۳]. این علائم می‌توانند تا چند روز پس از تمرین اولیه ادامه یابند و بر عملکرد ورزشی و توانایی تمرین تأثیر بگذارند [۳].

۳-۲. نقش گونه‌های فعال اکسیژن

ROS هم در تمرینات هوازی و هم در تمرینات غیرهوازی تولید می‌شوند [۱]. اگرچه میتوکندری، NADPH اکسیدازها و زانتین اکسیداز به‌عنوان عوامل اصلی تولید ROS شناخته شده‌اند، مکانیسم‌های دقیق استرس اکسیداتیو ناشی از ورزش همچنان در حال بررسی است [۱].

تولید بیش‌ازحد ROS می‌تواند دفاع آنتی‌اکسیدانی بدن را تحت فشار قرار دهد و منجر به استرس اکسیداتیو شود. این عدم تعادل می‌تواند به اجزای سلولی ازجمله لیپیدها، پروتئین‌ها و DNA آسیب برساند [۴]. در بافت عضلانی، استرس اکسیداتیو به موارد زیر کمک می‌کند:

- پراکسیداسیون لیپیدها: ROS به لیپیدهای موجود در غشای سلولی حمله می‌کنند و منجر به تشکیل محصولات پراکسیداسیون لیپید مانند مالون‌دی‌آلدئید[2] می‌شوند [۴].
- کربونیلاسیون پروتئین‌ها: ROS پروتئین‌ها را تغییر می‌دهند و باعث تشکیل کربونیل‌های پروتئینی می‌شوند که می‌توانند عملکرد پروتئین را مختل کنند [۴].
- التهاب: استرس اکسیداتیو پاسخ‌های التهابی را تحریک و آسیب عضلانی را تشدید می‌کند [۲].

۳-۳. مکانیسم‌های دفاع آنتی‌اکسیدانی

بدن چندین مکانیسم دفاع آنتی‌اکسیدانی برای مقابله با اثرات مخرب ROS دارد. این مکانیسم‌ها شامل موارد زیر است:

1. EIMD
2. MDA

- آنتی‌اکسیدان‌های آنزیمی: سوپراکسید دیسموتاز[1]، کاتالاز و گلوتاتیون پراکسیداز[2] آنزیم‌های کلیدی هستند که ROS را خنثی می‌کنند [۴].
- آنتی‌اکسیدان‌های غیرآنزیمی: ویتامین‌های C و E، گلوتاتیون و سایر ترکیبات به‌عنوان جاذب رادیکال‌های آزاد عمل و مستقیماً آن‌ها را خنثی می‌کنند [۵].

۳-٤. عوامل تشدید کننده استرس اکسیداتیو در ورزشکاران

چندین عامل می‌توانند خطر استرس اکسیداتیو را در ورزشکاران افزایش دهند، ازجمله:

- حجم تمرین بالا: تمرینات شدید و طولانی‌مدت، تولید ROS را افزایش می‌دهند [۱].
- ریکاوری ناکافی: زمان ناکافی برای ریکاوری بین جلسات تمرینی می‌تواند منجر به افزایش تجمعی استرس اکسیداتیو شود [۶].
- رژیم غذایی نامناسب: رژیم غذایی فاقد آنتی‌اکسیدان‌ها می‌تواند توانایی بدن در مقابله با ROS را کاهش دهد [۷].
- عوامل محیطی: قرار گرفتن در معرض آلودگی، گرما و ارتفاع می‌تواند استرس اکسیداتیو را افزایش دهد [۸].

٤. استراتژی‌های تغذیه‌ای برای کاهش استرس اکسیداتیو و بهبود ریکاوری

مداخلات تغذیه‌ای نقش مهمی در کاهش استرس اکسیداتیو و بهبود ریکاوری عضلات در ورزشکاران دارند. یک رژیم غذایی برنامه‌ریزی شده باید انرژی، درشت‌مغذی‌ها و ریزمغذی‌های کافی را فراهم کند و به‌ویژه بر غذاها و مکمل‌های غنی از آنتی‌اکسیدان‌ها تمرکز داشته باشد [۹].

٤-۱. مکمل‌های آنتی‌اکسیدانی

مکمل‌های آنتی‌اکسیدانی به‌طور معمول توسط ورزشکاران برای کاهش استرس اکسیداتیو ناشی از ورزش استفاده می‌شوند تا ریکاوری را بهبود بخشند و عملکرد را افزایش دهند [۱۰]. بااین‌حال، اثربخشی مکمل‌های آنتی‌اکسیدانی موضوعی پیچیده و مورد بحث است.

- ویتامین C و E: این ویتامین‌ها به‌عنوان آنتی‌اکسیدان‌های شناخته‌شده می‌توانند رادیکال‌های آزاد را خنثی کنند و در برابر آسیب اکسیداتیو محافظت کنند [۵]. بااین‌حال، برخی تحقیقات نشان می‌دهند که دوزهای بالای ویتامین‌های C و E ممکن است با سازگاری عضلات به تمرین تداخل داشته باشند [۱۱].
- استیل سیستئین: NAC پیش‌ساز گلوتاتیون، یک آنتی‌اکسیدان اصلی داخل سلولی است [۱۰]. برخی مطالعات نشان می‌دهند که مکمل‌های NAC ممکن است با کاهش استرس اکسیداتیو و بهبود ریکاوری برای ورزشکاران مفید باشند [۱۰].

1. SOD
2. GPx

- ملاتونین: ملاتونین به نظر می‌رسد در کاهش نشانگرهای استرس اکسیداتیو مؤثر است که ممکن است بر ریکاوری تأثیر مثبت داشته باشد [۱۰].
- پلی‌فنول‌ها: ترکیبات فنولی که در میوه‌ها، سبزیجات و کاکائو یافت می‌شوند، دارای خواص آنتی‌اکسیدانی و ضدالتهابی هستند [۱۲]. مکمل‌های حاوی فنول‌ها ممکن است درد عضلانی را کاهش داده و ریکاوری را تسریع کنند [۱۲].
- کورکومین: تحقیقات بیشتری باید برای روشن‌سازی مزایای بالقوه کورکومین پس از تمرینات شدید انجام شود [۱۰].

٤-۲. توصیه‌های غذایی

یک رژیم غذایی متعادل و غنی از غذاهای کامل، پایه هر استراتژی تغذیه‌ای برای مقابله با استرس اکسیداتیو است. توصیه‌های کلیدی غذایی شامل موارد زیر است:

- میوه‌ها و سبزیجات: مصرف انواع میوه‌ها و سبزیجات رنگارنگ طیف وسیعی از آنتی‌اکسیدان‌ها ازجمله ویتامین‌ها، مواد معدنی و پلی‌فنول‌ها را فراهم می‌کند [۷].
- غلات کامل: غلات کامل منبع خوبی از آنتی‌اکسیدان‌ها و فیبر هستند که می‌توانند سلامت روده را تقویت کرده و التهاب را کاهش دهند [۷].
- پروتئین‌های کم‌چرب: مصرف کافی پروتئین برای ترمیم و ریکاوری عضلات ضروری است [۹].
- چربی‌های سالم: اسیدهای چرب امگا-۳ که در ماهی‌های چرب، دانه کتان و گردو یافت می‌شوند، دارای خواص ضدالتهابی هستند [۴].

٤-۳. غذاها و مواد مغذی خاص

غذاها و مواد مغذی زیر در کاهش استرس اکسیداتیو و بهبود ریکاوری عضلات امیدوارکننده بوده‌اند:

- کنجد: مصرف کنجد ممکن است آسیب عضلانی و استرس اکسیداتیو را کاهش داده و ظرفیت هوازی را بهبود بخشد [۷].
- زغال‌اخته نیوزیلندی: مصرف زغال‌اخته نیوزیلندی ریکاوری را تسریع می‌کند، اگرچه به نظر می‌رسد این اثر مستقل از ظرفیت آنتی‌اکسیدانی ذاتی نوشیدنی است و به نظر می‌رسد شامل فعال‌سازی فرآیندهای سازگاری باشد [۱۳].
- گیلاس ترش مونتمورنسی: کنسانتره گیلاس ترش مونتمورنسی می‌تواند به‌عنوان یک غذای مؤثر برای تسریع ریکاوری و کاهش آسیب عضلانی ناشی از ورزش شدید عمل کند [۱۴].
- کاکائو: مصرف حاد، زیرحاد و مزمن پلی‌فنول‌های کاکائو ممکن است استرس اکسیداتیو ناشی از ورزش را کاهش دهد [۱۵].

- تیول‌های غذایی: تیول‌های غذایی ممکن است یک استراتژی حمایتی بالقوه در برابر استرس اکسیداتیو در نارسایی قلبی و آسیب عضلانی در حین فعالیت‌های ورزشی باشند [۱۶].

۵. استراتژی‌های تمرینی برای بهبود ریکاوری و کاهش آسیب عضلانی

علاوه‌بر مداخلات تغذیه‌ای، استراتژی‌های تمرینی مناسب می‌توانند به کاهش استرس اکسیداتیو و بهبود ریکاوری عضلات کمک کنند.

۵-۱. دوره‌بندی[1]

دوره‌بندی شامل تغییر سیستماتیک حجم و شدت تمرینات در طول زمان به‌منظور بهینه‌سازی عملکرد و کاهش خطر تمرین‌زدگی است [۶]. با گنجاندن دوره‌های استراحت و ریکاوری فعال، ورزشکاران می‌توانند به بدن خود اجازه دهند تا به استرس ناشی از تمرینات عادت کرده و اثرات تجمعی استرس اکسیداتیو را کاهش دهند.

۵-۲. مدیریت تمرینات اکسنتریک[2]

تمرینات اکسنتریک که شامل کشیده شدن عضلات تحت بار است، محرک قدرتمندی برای آسیب عضلانی محسوب می‌شود [۲]. ورزشکاران باید به‌تدریج حجم و شدت تمرینات اکسنتریک را افزایش دهند تا عضلاتشان فرصت سازگاری پیدا کرده و خطر آسیب کاهش یابد.

۵-۳. تمرینات ترکیبی[3]

تمرینات ترکیبی شامل انجام فعالیت‌های متنوع برای کاهش استرس بر گروه‌های عضلانی خاص است. این رویکرد می‌تواند به پیشگیری از آسیب‌های ناشی از استفاده بیش‌ازحد و بهبود آمادگی کلی کمک کند.

۵-۴. ریکاوری فعال[4]

ریکاوری فعال، مانند دویدن آرام یا شنا، می‌تواند جریان خون به عضلات را بهبود بخشد و به دفع محصولات متابولیک زائد کمک کند [۱۷]. این روش همچنین می‌تواند درد و سفتی عضلات را کاهش دهد.

۵-۵. بیومارکرهای استرس اکسیداتیو و آسیب عضلانی[5]

پایش بیومارکرهای استرس اکسیداتیو و آسیب عضلانی می‌تواند بینش‌های ارزشمندی در مورد وضعیت ریکاوری ورزشکاران ارائه داده و مداخلات تمرینی و تغذیه‌ای را هدایت کند. برخی بیومارکرهای رایج عبارتند از:

1. Periodization
2. Eccentric Exercise Management
3. Cross-Training
4. Active Recovery
5. Biomarkers of Oxidative Stress and Muscle Damage

- مالون‌دی‌آلدئید: نشانگر پراکسیداسیون لیپیدها [۷].
- کربونیل‌های پروتئینی[1]: نشانگر اکسیداسیون پروتئین‌ها [۱۸].
- کراتین کیناز[2]: آنزیمی که از سلول‌های عضلانی آسیب‌دیده آزاد می‌شود [۷].
- لاکتات دهیدروژناز[3]: آنزیم دیگری که از سلول‌های عضلانی آسیب‌دیده آزاد می‌شود [۷].
- گلوتاتیون[4]: یک آنتی‌اکسیدان اصلی داخل سلولی [۱۸].
- سوپراکسید دیسموتاز[5]: آنزیمی که تجزیه رادیکال‌های سوپراکسید را کاتالیز می‌کند [۷].
- کاتالاز: آنزیمی که تجزیه پراکسید هیدروژن را کاتالیز می‌کند [۱۹].
- پروتئین واکنش‌دهنده C^6: نشانگر التهاب [۷].

۵-۶. ارتباط با میکروبیوتای روده[7]

تحقیقات نوظهور نشان می‌دهند که میکروبیوتای روده، جامعه میکروارگانیسم‌های ساکن در دستگاه گوارش، در التهاب و استرس اکسیداتیو ناشی از ورزش نقش دارد [۲۰]. تغییرات رژیم غذایی می‌تواند تعادل میکروبیوتای روده را برهم زده و پیامدهای مفید یا مضر برای میزبان داشته باشد [۲۰].

۵-۷. مکمل‌های پروتئینی و میکروبیوتای روده[8]

مصرف طولانی‌مدت مکمل‌های پروتئینی ممکن است تأثیر منفی بر میکروبیوتای روده داشته باشد [۲۰]. اگرچه مکمل‌های پروتئینی حضور متابولیت‌های ناشی از تخمیر را افزایش نمی‌دهند اما فراوانی شاخه Bacteroidetes را افزایش داده و حضور گونه‌های مرتبط با سلامت مانند Roseburia، Blautia و Bifidobacterium longum را کاهش می‌دهند [۲۰].

۵-۸. پلی‌فنول‌ها و سلامت روده[9]

پلی‌فنول‌ها می‌توانند به‌عنوان پری‌بیوتیک عمل کرده و رشد باکتری‌های مفید روده را تقویت کنند [۲۱]. متابولیت‌های میوه‌ها به‌طور مؤثری از عملکرد حمایت می‌کنند و مزایای اضافی ازجمله بهبود ظرفیت اکسیداتیو و ضدویروسی از طریق متابولیت‌های میوه و افزایش سطح پلاسمایی فنول‌های مشتق از روده را به همراه دارند [۲۱].

1. PC
2. CK
3. LDH
4. GSH
5. SOD
6. CRP
7. The Gut Microbiota Connection
8. Protein Supplementation and Gut Microbiota
9. Polyphenols and Gut Health

۵-۹. حفظ سلامت روده در ورزشکاران[1]

استراتژی‌های حفظ سلامت روده در ورزشکاران شامل موارد زیر است:

- رژیم غذایی پرفیبر: فیبر رشد باکتری‌های مفید روده را تقویت کرده و سلامت گوارش را بهبود می‌بخشد [۲۲].
- مکمل‌های پروبیوتیک: پروبیوتیک‌ها می‌توانند به بازگرداندن تعادل میکروبیوتای روده کمک کنند [۲۲].
- محدود کردن غذاهای فرآوری‌شده: غذاهای فرآوری‌شده می‌توانند سلامت روده را تحت تأثیر منفی قرار داده و التهاب را افزایش دهند [۲۲].

۵-۱۰. آتروفی عضلانی و مسیر سیگنالینگ FOXO [2]

آتروفی عضلانی، از دست دادن توده و قدرت عضلانی، می‌تواند نتیجه آسیب، بی‌فعالی یا بیماری باشد [۲۳]. مسیر سیگنالینگ forkhead box O (FOXO) با تنظیم E3 ubiquitin ligase ها و برخی عوامل اتوفاژی در آتروفی عضلانی نقش دارد [۲۳].

۵-۱۱. نقش FOXO در تخریب عضلانی[3]

مسیر سیگنالینگ FOXO توسط محرک‌های مختلفی ازجمله استرس اکسیداتیو و التهاب فعال می‌شود [۲۳]. پس از فعال‌شدن، FOXO از طریق چندین مکانیسم تخریب پروتئین‌های عضلانی را تسریع می‌کند، ازجمله:

- افزایش بیان E3 ubiquitin ligase ها: MuRF1 و Atrogin-1 ازجمله E3 ubiquitin ligaseهایی هستند که پروتئین‌های عضلانی را برای تخریب توسط پروتئازوم علامت‌گذاری می‌کنند [۲۳].
- فعال‌سازی اتوفاژی: اتوفاژی فرآیند سلولی است که پروتئین‌ها و اندامک‌های آسیب‌دیده یا ناکارآمد را حذف می‌کند [۲۳].

۵-۱۲. مقابله با آتروفی عضلانی[4]

استراتژی‌های مقابله با آتروفی عضلانی شامل موارد زیر است:

- تمرینات مقاومتی: تمرینات مقاومتی سنتز پروتئین عضلانی را تحریک کرده و سیگنالینگ FOXO را مهار می‌کند [۲۳].
- مکمل‌های تغذیه‌ای: مصرف کافی پروتئین و مکمل‌هایی مانند کراتین می‌تواند از رشد عضلانی جلوگیری کرده و آتروفی را کاهش دهد [۲۳].

1. Maintaining Gut Health for Athletes
2. Muscle Atrophy and the FOXO Signaling Pathway
3. FOXO's Role in Muscle Degradation
4. Counteracting Muscle Atrophy

- هدف‌گیری FOXO: درمان‌های هدف‌گیرنده FOXO برای درمان آتروفی عضلانی یک رویکرد امیدوارکننده است [۲۳].

٦. ملاحظات خاص برای ورزش‌های مختلف[1]

استراتژی‌های تغذیه‌ای و تمرینی برای کاهش استرس اکسیداتیو و بهبود ریکاوری ممکن است بسته به نوع ورزش متفاوت باشد.

٦-١. ورزشکاران استقامتی[2]

ورزشکاران استقامتی به‌دلیل مدت و شدت طولانی تمرینات در معرض خطر بالای استرس اکسیداتیو قرار دارند [۲۴]. استراتژی‌های تغذیه‌ای برای این ورزشکاران باید بر موارد زیر متمرکز باشد:

- بارگیری کربوهیدرات: افزایش ذخایر گلیکوژن عضلانی می‌تواند عملکرد استقامتی را بهبود بخشیده و استرس اکسیداتیو را کاهش دهد [۲۵].
- رژیم غذایی غنی از آنتی‌اکسیدان‌ها: تأکید بر مصرف میوه‌ها، سبزیجات و غلات کامل برای تأمین طیف وسیعی از آنتی‌اکسیدان‌ها [۲۶].
- هیدراتاسیون: حفظ هیدراتاسیون کافی برای پیشگیری از استرس اکسیداتیو و حمایت از عملکرد عضلانی ضروری است [۹].

٦-٢. ورزشکاران قدرتی و قدرتی- سرعتی[3]

ورزشکاران قدرتی و قدرتی- سرعتی نیز به‌دلیل شدت بالای تمرینات در معرض استرس اکسیداتیو قرار دارند [۲]. استراتژی‌های تغذیه‌ای برای این ورزشکاران باید بر موارد زیر متمرکز باشد:

- مصرف پروتئین: مصرف کافی پروتئین برای ترمیم و رشد عضلانی ضروری است [۹].
- مکمل‌های کراتین: کراتین می‌تواند قدرت و توان عضلانی را بهبود بخشیده و ممکن است خواص آنتی‌اکسیدانی نیز داشته باشد [۲۷].
- رژیم غذایی غنی از آنتی‌اکسیدان‌ها: مشابه ورزشکاران استقامتی، ورزشکاران قدرتی و قدرتی- سرعتی نیز باید رژیم غذایی غنی از میوه‌ها، سبزیجات و غلات کامل مصرف کنند [۲۶].

1. Specific Considerations for Different Sports
2. Endurance Athletes
3. Strength and Power Athletes

٦-٣. ورزشکاران تیمی[1]

ورزشکاران تیمی ترکیبی از فعالیت‌های استقامتی و شدید را تجربه می‌کنند که آن‌ها را در معرض خطر استرس اکسیداتیو و آسیب عضلانی قرار می‌دهد [۱۹]. استراتژی‌های تغذیه‌ای برای این ورزشکاران باید بر موارد زیر متمرکز باشد:

- تعادل درشت‌مغذی‌ها: مصرف کافی کربوهیدرات، پروتئین و چربی‌های سالم برای تأمین انرژی و ریکاوری عضلانی [۹].
- رژیم غذایی غنی از آنتی‌اکسیدان‌ها: تأکید بر مصرف میوه‌ها، سبزیجات و غلات کامل برای مقابله با استرس اکسیداتیو [۲۶].
- هیدراتاسیون: حفظ هیدراتاسیون کافی برای عملکرد و ریکاوری ضروری است [۹].

٦-٤. اهمیت فردی‌سازی[2]

توجه به این نکته ضروری است که استراتژی‌های بهینه تغذیه‌ای و تمرینی برای کاهش استرس اکسیداتیو و بهبود ریکاوری بسیار فردی هستند. عواملی مانند ژنتیک، وضعیت تمرینی، سن، جنسیت و شرایط محیطی می‌توانند بر پاسخ ورزشکاران به تمرینات و اثربخشی مداخلات مختلف تأثیر بگذارند. بنابراین، ورزشکاران باید با متخصصان مجرب مانند متخصصان تغذیه و مربیان بدنسازی کار کنند تا برنامه‌های شخصی‌سازی‌شده‌ای را تدوین کنند که نیازها و اهداف خاص آن‌ها را برآورده سازد.

۷. محدودیت‌های پژوهش

هر پژوهشی، به‌ویژه مطالعات مروری، با محدودیت‌هایی همراه است که می‌تواند بر تعمیم‌پذیری و قطعیت یافته‌ها تأثیر بگذارد. در این پژوهش نیز، چندین محدودیت قابل ذکر است:

۱) **ماهیت مروری:** ازآنجاکه این مطالعه یک مرور روایی/ نظام‌مند است، یافته‌های آن عمدتاً براساس داده‌های موجود در مقالات منتشر شده است. این امر به معنای آن است که هرگونه **سوگیری انتشار**[3] در ادبیات علمی (تمایل به انتشار مطالعات با نتایج مثبت) ممکن است بر نتایج نهایی این مرور نیز تأثیر گذاشته باشد.

۲) **ناهمگونی مطالعات:** باوجود تلاش برای انتخاب منابع معتبر، مطالعات اولیه مورد بررسی ممکن است از نظر طراحی پژوهش، جمعیت مورد مطالعه (به‌عنوان مثال، ورزشکاران در سطوح مختلف، جنسیت، سن)، پروتکل‌های تمرینی، روش‌های اندازه‌گیری استرس اکسیداتیو و دوزهای مکمل‌های مورد استفاده، **ناهمگونی‌هایی** داشته باشند. این ناهمگونی می‌تواند یکپارچه‌سازی و مقایسه مستقیم یافته‌ها را دشوار سازد.

1. Team Sport Athletes
2. The Importance of Individualization
3. publication bias

۳) **کیفیت متدولوژیکی:** اگرچه معیارهایی برای انتخاب مقالات با کیفیت بالا در نظر گرفته شد اما احتمال وجود تفاوت‌هایی در کیفیت متدولوژیکی جزئی‌تر بین مطالعات وجود دارد که ممکن است بر قدرت شواهد تأثیر بگذارد.

۴) **محدودیت‌های زمانی و زبانی:** این مطالعه عمدتاً بر مقالات منتشر شده در پایگاه‌های داده بین‌المللی و به زبان انگلیسی تمرکز داشته است. بنابراین، مطالعات منتشر شده به زبان‌های دیگر یا در مجلات محلی که در این پایگاه‌ها ایندکس نشده‌اند، ممکن است از قلم افتاده باشند.

۵) **عمق تحلیل برخی مداخلات:** اگرچه تلاش شد تا جامعیت در ارائه راهکارها رعایت شود اما به‌دلیل حجم وسیع ادبیات علمی، عمق تحلیل برای هر یک از مداخلات (تغذیه و تمرین) ممکن است در برخی موارد محدود باشد.

۸. جهت‌گیری‌های آینده و شکاف‌های تحقیقاتی[1]

اگرچه پیشرفت‌های قابل‌توجهی در درک نقش استرس اکسیداتیو در آسیب‌های عضلانی مرتبط با ورزش صورت گرفته است اما چندین حوزه نیاز به بررسی بیشتر دارند:

- دوزهای بهینه آنتی‌اکسیدان‌ها: تعیین دوزهای بهینه آنتی‌اکسیدان‌های مختلف برای ورزشکاران، با توجه به تداخل بالقوه با سازگاری عضلانی [۱۱].
- اثرات سینرژیستی آنتی‌اکسیدان‌ها: بررسی اثرات سینرژیستی ترکیب آنتی‌اکسیدان‌های مختلف [۲].
- اثرات بلندمدت مکمل‌های آنتی‌اکسیدانی: ارزیابی اثرات بلندمدت مکمل‌های آنتی‌اکسیدانی بر سلامت و عملکرد عضلانی.
- مدولاسیون میکروبیوتای روده: بررسی بیشتر نقش میکروبیوتای روده در التهاب و استرس اکسیداتیو ناشی از ورزش و شناسایی استراتژی‌ها برای دستکاری میکروبیوتای روده به‌منظور بهبود ریکاوری.
- رویکردهای فردی‌سازی‌شده: توسعه رویکردهای شخصی‌سازی‌شده برای مداخلات تغذیه‌ای و تمرینی براساس ویژگی‌ها و نیازهای منحصربه‌فرد ورزشکاران.
- اثرات روش‌های تمرینی خاص: بررسی تأثیر روش‌های تمرینی خاص (مانند پلیومتریک، تمرینات اکسنتریک) بر استرس اکسیداتیو و آسیب عضلانی.
- نقش آنتی‌اکسیدان‌های نوظهور: بررسی مزایای بالقوه آنتی‌اکسیدان‌های نوظهور، مانند آن‌هایی که در طب سنتی چینی یافت می‌شوند، برای کاهش استرس اکسیداتیو و بهبود ریکاوری.
- تفاوت‌های جنسیتی: بررسی تفاوت‌های جنسیتی در پاسخ به استرس اکسیداتیو و اثربخشی مداخلات مختلف.

1. Future Directions and Research Gaps

۹. نتیجه‌گیری

این مرور جامع نشان داد که استرس اکسیداتیو نقش محوری در ایجاد و تشدید آسیب‌های عضلانی ناشی از ورزش ایفا می‌کند. این وضعیت، که از عدم تعادل بین تولید گونه‌های فعال اکسیژن و ظرفیت آنتی‌اکسیدانی بدن ناشی می‌شود، می‌تواند به کاهش عملکرد، درد عضلانی تأخیری و طولانی شدن زمان ریکاوری منجر گردد. یافته‌ها تأکید می‌کنند که هم استراتژی‌های تغذیه‌ای و هم رویکردهای تمرینی مناسب، ابزارهای قدرتمندی برای مدیریت استرس اکسیداتیو و بهبود روند ریکاوری در ورزشکاران هستند. براساس یافته‌های این پژوهش، نتیجه‌گیری می‌شود که:

- **اهمیت تعادل در مصرف آنتی‌اکسیدان‌ها:** مصرف آنتی‌اکسیدان‌ها از طریق یک رژیم غذایی غنی از میوه‌ها، سبزیجات و غلات کامل، راهکار اصلی برای تقویت سیستم دفاعی بدن در برابر استرس اکسیداتیو است. بااین‌حال، استفاده بی‌رویه از مکمل‌های آنتی‌اکسیدانی با دوز بالا نیازمند احتیاط است زیرا ممکن است با سازگاری‌های مثبت عضلانی به تمرین تداخل داشته باشد.
- **نقش حیاتی درشت‌مغذی‌ها و آب:** مصرف کافی پروتئین برای ترمیم بافت عضلانی و کربوهیدرات برای بازیابی ذخایر گلیکوژن، به همراه هیدراتاسیون مناسب، پایه‌های اصلی ریکاوری و کاهش استرس اکسیداتیو پس از ورزش هستند.
- **استراتژی‌های تمرینی هوشمندانه:** دوره‌بندی مناسب تمرین، ریکاوری فعال و استفاده از تمرینات متقابل (کراس‌ترینینگ) می‌توانند به حداقل رساندن استرس اکسیداتیو و تسریع ریکاوری کمک کنند.

۹-۱. پیشنهادات برای تحقیقات آینده

۱) **مطالعات کارآزمایی بالینی با طراحی دقیق:** نیاز به پژوهش‌های مداخله‌ای کنترل‌شده با حجم نمونه بزرگتر و پروتکل‌های استانداردتر برای ارزیابی دوز، زمان‌بندی و نوع بهینه مکمل‌های آنتی‌اکسیدانی و درشت‌مغذی‌ها با در نظر گرفتن اثرات طولانی‌مدت بر سازگاری عضلانی.

۲) **بررسی مکانیسم‌های دقیق:** تحقیقات عمیق‌تر در مورد مکانیسم‌های سیگنالینگ ROS و تأثیرات آن بر فعال‌سازی مسیرهای سازگاری عضلانی، با تمرکز بر نقش آن‌ها در ورزشکاران نخبه و جمعیت‌های خاص.

۳) **پژوهش بر جمعیت‌های متنوع:** انجام مطالعات بر روی گروه‌های سنی مختلف (نوجوانان، سالمندان)، جنسیت‌های متفاوت و ورزشکاران رشته‌های ورزشی گوناگون برای درک بهتر پاسخ‌های فردی به استرس اکسیداتیو و استراتژی‌های ریکاوری.

۴) **نقش میکروبیوتای روده:** بررسی بیشتر تأثیر مداخلات تغذیه‌ای بر میکروبیوتای روده و ارتباط آن با استرس اکسیداتیو و آسیب عضلانی ناشی از ورزش.

۵) **توسعه ابزارهای اندازه‌گیری:** نیاز به توسعه و اعتبارسنجی نشانگرهای زیستی جدید و غیرتهاجمی برای ارزیابی دقیق‌تر استرس اکسیداتیو و آسیب عضلانی در محیط ورزشی.

۹-۲. کاربردهای بالینی و عملی

۱) **تدوین پروتکل‌های تغذیه‌ای شخصی‌سازی شده:** متخصصین تغذیه ورزشی می‌توانند براساس نوع ورزش، شدت تمرین و پاسخ‌های فردی ورزشکاران، برنامه‌های تغذیه‌ای شخصی‌سازی شده‌ای شامل منابع طبیعی آنتی‌اکسیدانی و نسبت‌های مناسب درشت‌مغذی‌ها را طراحی کنند.

۲) **آموزش ورزشکاران و مربیان:** افزایش آگاهی ورزشکاران و کادر مربیگری در مورد اهمیت تعادل رژیم غذایی، هیدراتاسیون مناسب و برنامه‌ریزی تمرینی اصولی برای مدیریت استرس اکسیداتیو و پیشگیری از آسیب‌های عضلانی.

۳) **ترویج ریکاوری فعال:** مربیان می‌توانند ریکاوری فعال را به‌عنوان بخشی جدایی‌ناپذیر از برنامه‌های تمرینی، برای بهبود جریان خون و دفع متابولیت‌های زائد، بگنجانند.

۴) **استفاده هوشمندانه از مکمل‌ها:** توصیه به استفاده از مکمل‌ها تنها در موارد ضروری و با نظارت متخصص، به جای مصرف بی‌رویه و بدون پشتوانه علمی.

با در نظر گرفتن این پیشنهادات، پژوهشگران و دست‌اندرکاران حوزه ورزش می‌توانند به سوی بهبود مستمر سلامت و عملکرد ورزشکاران گام بردارند.

تشکر و قدردانی

نویسندگان مراتب سپاس و قدردانی صمیمانه خود را از تمامی افرادی که در مسیر انجام و تدوین این پژوهش از طریق راهنمایی، حمایت، دلگرمی و همکاری یاری‌رسان بوده‌اند ابراز می‌دارند.

حامی/ حامیان مالی

این پژوهش هیچ حمایت مالی اختصاصی از سازمان‌های دولتی، تجاری یا غیرانتفاعی دریافت نکرده است.

مشارکت نویسندگان

نویسنده اول سهم عمده‌ای در انجام این پژوهش داشته و مسئولیت ایده‌پردازی، جستجوی منابع علمی، گردآوری داده‌ها، غربالگری و انتخاب مطالعات مرتبط، تحلیل داده‌ها، تفسیر یافته‌ها و تهیه پیش‌نویس اولیه مقاله را برعهده داشته است. سایر نویسندگان در نظارت علمی، بررسی انتقادی، اصلاح و تکمیل مقاله مشارکت داشته‌اند. تمامی نویسندگان نسخه نهایی مقاله را مطالعه و تأیید کرده‌اند.

تعارض منافع

هیچ‌گونه تعارض منافع توسط نویسندگان بیان نشده است.

منابع

[1] He, Feng J., Li, Juan, Liu, Zewen, Chuang, Chia-Chen, Wen-ge, Yang, and Zuo, Li. 2016. "Redox Mechanism of Reactive Oxygen Species in Exercise". Frontiers Media. https://doi.org/10.3389/fphys.2016.00486

[2] Tanabe, Yoko, Fujii, Naoto, and Suzuki, Katsuhiko. 2021. "Dietary Supplementation for Attenuating Exercise-Induced Muscle Damage and Delayed-Onset Muscle Soreness in Humans". Multidisciplinary Digital Publishing Institute. https://doi.org/10.3390/nu14010070

[3] Owens, Daniel J., Twist, Craig, Cobley, James N., Howatson, Glyn, and Close, Graeme L.. 2018. "Exerciseinduced muscle damage: What is it, what causes it and what are the nutritional solutions?". Taylor & Francis. https://doi.org/10.1080/17461391.2018.1505957

[4] Milne, Ginger L., Yin, Huiyong, and Morrow, Jason D.. 2008. "Human Biochemistry of the Isoprostane Pathway". Elsevier BV. https://doi.org/10.1074/jbc.r700047200

[5] Neubauer, Oliver and Yfanti, C.. NaN. "Antioxidants in Athlete"s Basic Nutrition: Considerations towards a Guideline for the Intake of Vitamin C and Vitamin E". None. https://doi.org/10.1201/b17442-4

[6] Cheng, Arthur J., Jude, Baptiste, and Lanner, Johanna T.. 2020. "Intramuscular mechanisms of overtraining". Elsevier BV. https://doi.org/10.1016/j.redox.2020.101480

[7] Barbosa, C. S., et al.. 2017. "Effects of Sesame (Sesamum indicum L.) Supplementation on Creatine Kinase, Lactate Dehydrogenase, Oxidative Stress Markers, and Aerobic Capacity in Semi-Professional Soccer Players". Frontiers in Physiology. https://doi.org/10.3389/fphys.2017.00196

[8] Hajjar, David P. and Gotto, Antonio M.. 2013. "Biological Relevance of Inflammation and Oxidative Stress in the Pathogenesis of Arterial Diseases". Elsevier BV. https://doi.org/10.1016/j.ajpath.2013.01.010

[9] Amawi, Adam Tawfiq, et al.. 2024. "Athletes nutritional demands: a narrative review of nutritional requirements". Frontiers Media. https://doi.org/10.3389/fnut.2023.1331854

[10] Mason, Shaun A., Trewin, Adam J., Parker, Lewan, and Wadley, Glenn D.. 2020. "Antioxidant supplements and endurance exercise: Current evidence and mechanistic insights". Elsevier BV. https://doi.org/10.1016/j.redox.2020.101471

[11] Jwko, Ewa, Dugocka, Barbara, Makaruk, Beata, and Cieliski, Igor. 2014. "The effect of green tea extract supplementation on exercise-induced oxidative stress parameters in male sprinters". Springer Science+Business Media. https://doi.org/10.1007/s00394-014-0757-1

[12] Gonalves, A. C., Gaspar, Drio, Flores-Flix, J., Falco, A., Alves, G., and Silva, Lus R.. 2022. "Effects of Functional Phenolics Dietary Supplementation on Athletes Performance and Recovery: A Review". International Journal of Molecular Sciences. https://doi.org/10.3390/ijms23094652

[13] McLeay, Yanita, Barnes, Matthew J., Mndel, Toby, Hurst, Suzanne M., Hurst, Roger D., and Stannard, Stephen R.. 2012. "Effect of New Zealand blueberry consumption on recovery from eccentric exercise-induced muscle damage". Springer Science+Business Media. https://doi.org/10.1186/1550-2783-9-19

[14] Bell, Phillip G., Walshe, Ian H., Davison, Gareth W., Stevenson, Emma, and Howatson, Glyn. 2014. "Recovery facilitation with Montmorency cherries following high-intensity, metabolically challenging exercise". NRC Research Press. https://doi.org/10.1139/apnm-2014-0244

[15] Massaro, Marika, Scoditti, Egeria, Carluccio, Maria Annunziata, and Cicchella, Antonio. 2019. "Effect of Cocoa Products and Its Polyphenolic Constituents on Exercise Performance and Exercise-Induced Muscle Damage and Inflammation: A Review of Clinical Trials". Multidisciplinary Digital Publishing Institute. https://doi.org/10.3390/nu11071471

[16] Brancaccio, M., et al.. 2020. "Dietary Thiols: A Potential Supporting Strategy against Oxidative Stress in Heart Failure and Muscular Damage during Sports Activity". International Journal of Environmental Research and Public Health. https://doi.org/10.3390/ijerph17249424
[17] Zhao, L, Xie, Yu-Xiao, and Wang, Chen. 2020. "Recommendations for respiratory rehabilitation in adults with coronavirus disease 2019". Lippincott Williams & Wilkins. https://doi.org/10.1097/cm9.0000000000000848
[18] Fatouros, Ioannis G., et al.. 2010. "Time-Course of Changes in Oxidative Stress and Antioxidant Status Responses Following a Soccer Game". Lippincott Williams & Wilkins. https://doi.org/10.1519/jsc.0b013e3181b60444
[19] Sohail, M., Al-mansoori, Layla, Al-Jaber, Hend, Georgakopoulos, C., Donati, F., Botr, F., Sellami, M., and Elrayess, Mohamed A.. 2020. "Assessment of Serum Cytokines and Oxidative Stress Markers in Elite Athletes Reveals Unique Profiles Associated With Different Sport Disciplines". Frontiers in Physiology. https://doi.org/10.3389/fphys.2020.600888
[20] Moreno-Prez, Diego, et al.. 2018. "Effect of a Protein Supplement on the Gut Microbiota of Endurance Athletes: A Randomized, Controlled, Double-Blind Pilot Study". Nutrients. https://doi.org/10.3390/nu10030337
[21] Nieman, D. and Mitmesser, S.. 2017. "Potential Impact of Nutrition on Immune System Recovery from Heavy Exertion: A Metabolomics Perspective". Nutrients. https://doi.org/10.3390/nu9050513
[22] NeuschwanderTetri, Brent A.. 2010. "Hepatic lipotoxicity and the pathogenesis of nonalcoholic steatohepatitis: The central role of nontriglyceride fatty acid metabolites". Lippincott Williams & Wilkins. https://doi.org/10.1002/hep.23719
[23] Chen, Kun, Gao, Peng, Li, Zongchao, Dai, Aonan, Yang, Ming, Chen, Siyu, Su, Jingyue, Deng, Zhenhan, and Li, Liangjun. 2022. "Forkhead Box O Signaling Pathway in Skeletal Muscle Atrophy". Elsevier BV. https://doi.org/10.1016/j.ajpath.2022.09.003
[24] Sahlin, Kent, Shabalina, Irina G., Mattsson, C. Mikael, Bakkman, Linda, Fernstrm, Maria, Rozhdestvenskaya, Zinaida, Enqvist, Jonas K., Nedergaard, Jan, Ekblom, Bjrn, and Tonkonogi, Michail. 2010. "Ultraendurance exercise increases the production of reactive oxygen species in isolated mitochondria from human skeletal muscle". American Physiological Society. https://doi.org/10.1152/japplphysiol.00966.2009
[25] Scott, Michael J. and Fawcett, William. 2014. "Oral carbohydrate preload drink for major surgery - the first steps from famine to feast". Wiley. https://doi.org/10.1111/anae.12921
[26] Brancaccio, M., et al.. 2022. "The Biological Role of Vitamins in Athletes Muscle, Heart and Microbiota". International Journal of Environmental Research and Public Health. https://doi.org/10.3390/ijerph19031249
[27] NaN. "with familial". None. https://doi.org/None

استناد به این مقاله: باقری، محمدرضا، طباطبایی، نگین سادات و دانشمند، فرزاد. (۱۴۰۵). مرور نظام‌مند: نقش استرس اکسیداتیو در ایجاد و تشدید آسیب‌های عضلانی ناشی از ورزش: رویکردهای تغذیه‌ای و تمرینی برای بهبود ریکاوری. *دوفصلنامه مطالعات مروری علوم ورزشی و تندرستی*، ۱(۲)، ۴۰-۶۵

DOI: 10.22054/jshsr.2026.84750.1017
Biannual Journal of *Sport and Heaith Sciences Reviews* is Licensed Under a Creative Commons Attribution-Noncommercial 4.0 International License