



Review Paper

**The Effect of Nutrients on Improving the Growth and Quality of Medicinal
Plants and Enhancing Athletes' Physical Capacity**

Parisa Hashemi Shahraki^{1,2}, Shahla Hashemi Shahraki^{3*}

¹ Department of Physical Education and Sport Sciences, Faculty of Physical Education and Sport Sciences, Payam-e Noor University, Shahrekord, Iran

² General Office of Education, Chaharmahal and Bakhtiari Province, Shahrekord, Iran

³ Department of Biology, Faculty of Sciences, University of Sistan and Baluchestan, Zahedan, Iran

Received: 26/08/2025, **Accepted:** 26/09/2025

Abstract

In recent years, medicinal and aromatic plants have attracted considerable attention in the field of sports nutrition due to their diverse phytochemical constituents, including flavonoids, alkaloids, terpenoids, and phenolics. These compounds can reduce oxidative stress induced by intense exercise, accelerate recovery, and enhance athletic performance through their antioxidant and anti-inflammatory properties. However, the quantity and quality of these phytochemicals in medicinal plants are highly dependent on ecological and nutritional conditions. Factors such as soil type, light intensity, irrigation levels, and mineral nutrient availability during plant growth play a crucial role in the synthesis and accumulation of secondary metabolites. The growing preference for natural sources and herbal supplements in recent years is largely attributed to their ability to mitigate oxidative stress, strengthen the immune system, and expedite recovery following intense physical activity. The present review investigates the relationship among mineral nutrition of medicinal plants, ecological factors influencing the quality of secondary metabolites, and the physiological effects of these plants on athletes. Existing evidence indicates that agronomic conditions including soil type, light intensity, irrigation regime, and nutrient availability significantly influence the synthesis and accumulation patterns of secondary metabolites. For instance, nitrogen and sulfur play pivotal roles in the production of alkaloids and sulfur-containing compounds, whereas nitrogen deficiency often enhances the synthesis of phenolics and flavonoids. These variations not only affect the medicinal quality of the plants but, when used strategically, can also improve antioxidant capacity, reduce muscle inflammation, increase endurance, and enhance aerobic performance in athletes. Notably, plants such as grape and pomegranate have gained special recognition in sports nutrition due to their potent antioxidant compounds and beneficial metabolic effects. Ultimately, the findings suggest that optimal agronomic and nutritional management, combined with the targeted use of herbal supplements, can serve as a safe and effective strategy to promote athlete health and enhance physical performance.

Keywords: Nutrients, Medicinal plants, Athletes, Secondary metabolites

Citation: Hashemi Shahraki P, Hashemi Shahraki, S The Effect of Nutrients on Improving the Growth and Quality of Medicinal Plants and Enhancing Athletes' Physical Capacity. *Quality and Durability of Agricultural Products and Food Staffs*, 2025; 5(1): 113-127.



© The Author(s) **Publisher:** Islamic Azad University of Kerman, Iran

DOI: <https://doi.org/10.71516/qafj.2025.1216033>

* **Corresponding Author:** Shahla Hashemi Shahraki, **Email:** shahlahashemi15@yahoo.com

Extended Abstract

Introduction

In recent years, medicinal and aromatic plants have gained increasing attention in sports nutrition due to their rich content of bioactive phytochemicals such as flavonoids, alkaloids, terpenoids, and phenolics that exhibit antioxidant, anti-inflammatory, and adaptogenic properties. These compounds can mitigate oxidative stress induced by intense physical activity, accelerate post-exercise recovery, and enhance athletic performance. However, the concentration and efficacy of these phytochemicals are not static; they are profoundly influenced by ecological and agronomic factors, including soil type, light intensity, irrigation regime, and mineral nutrient availability. Despite significant advances in both agronomic management and sports nutrition as separate disciplines, the critical link between how cultivation practices affect the phytochemical profile of medicinal plants and consequently their physiological impact on athletes remains underexplored. This review aims to bridge this gap by examining the interplay among mineral nutrition, environmental factors, secondary metabolite synthesis in medicinal plants, and their subsequent effects on key physiological markers in athletes.

Methods

This study is a comprehensive narrative review based on a systematic literature search conducted across major scientific databases, including PubMed, Scopus, Web of Science, and Google Scholar. Key search terms included “medicinal plants,” “athletic performance,” “phytochemical

quality,” “ecological factors,” “secondary metabolites,” and “nutrients.” The selection process followed a stepwise approach: initial screening of titles to remove duplicates, followed by abstract review, and finally full-text assessment of eligible articles. Selected studies were thematically categorized into three main sections: (1) the influence of ecological and agronomic factors (soil, light, water) on phytochemical quality; (2) the role of macro- and micronutrients in modulating secondary metabolism; and (3) the physiological effects of plant-derived compounds on athletic performance, recovery, and oxidative stress markers.

Results and Discussion

The synthesis of secondary metabolites in medicinal plants is highly responsive to environmental cues. Soil pH, for instance, significantly affects the bioavailability of micronutrients like Fe, Mn, and Zn, which act as cofactors in phenolic biosynthesis pathways. Studies show that mildly acidic to neutral pH (5.7–6.5) generally favors higher phenolic and flavonoid content in species like *Oryza sativa* and *Zea mays*, whereas slightly alkaline conditions may benefit others like *Macrotyloma uniflorum*. Similarly, light intensity and spectral quality regulate key enzymes such as phenylalanine ammonia-lyase (PAL), with high light promoting flavonoid accumulation in sun-loving species (e.g., *Ginkgo biloba*), while shade-tolerant plants like *Panax ginseng* produce more ginsenosides under low light. Ultraviolet-B (UV-B) radiation further enhances anthocyanin and phenolic production as a protective response. Water availability also plays a dual role: moderate drought stress often increases antioxidant compounds (e.g., 77% rise in total phenolics in lemon balm under 50% irrigation), but severe drought reduces biomass and may

compromise essential oil yield. Crucially, mineral nutrition directly shapes phytochemical profiles. Nitrogen availability governs the carbon/nitrogen balance: high N favors alkaloid synthesis (e.g., in *Atropa belladonna*), while N deficiency redirects carbon flux toward phenolics and flavonoids. Sulfur is essential for sulfur-containing compounds like allicin in garlic and glucosinolates in crucifers. Phosphorus and potassium indirectly support secondary metabolism by fueling ATP-dependent biosynthetic reactions and facilitating sugar transport. When consumed by athletes, these phytochemicals exert multifaceted physiological effects. Polyphenol-rich plants like pomegranate (*Punica granatum*) and grape (*Vitis vinifera*) enhance endogenous antioxidant defenses (e.g., superoxide dismutase, catalase) via activation of the Nrf2/Keap1 pathway, reduce inflammatory markers (IL-6, TNF- α) through NF- κ B inhibition, and improve mitochondrial efficiency. Clinical trials confirm that pomegranate juice (500 mL/day for 2 weeks) lowers post-exercise malondialdehyde and IL-6 in football players, while grape extract (300 mg/day for 6 weeks) increases antioxidant capacity and reduces creatine kinase in endurance runners. Curcumin and astaxanthin further demonstrate dose-dependent anti-inflammatory and performance-enhancing effects, though excessive antioxidant intake may blunt beneficial training adaptations by interfering with redox signaling (hormesis). Notably, the agronomic origin of these plants directly influences their efficacy: for example, sulfur-fertilized garlic yields more anti-inflammatory organosulfur compounds, while sun-exposed grapes accumulate higher resveratrol levels. This underscores a novel integrative paradigm: optimizing cultivation conditions not only improves

herbal quality but also enhances their functional value in sports nutrition.

Conclusion

This review demonstrates that the phytochemical potency of medicinal plants and their subsequent benefits for athletes is not inherent but environmentally modulated. Strategic agronomic practices, including tailored nutrient management, controlled light exposure, and regulated irrigation, can be leveraged to enhance the concentration of specific bioactive compounds. In turn, these optimized phytochemical profiles translate into measurable improvements in athletic recovery, oxidative balance, and performance. Future research should adopt interdisciplinary approaches that combine plant physiology, phytochemistry, and sports science to develop standardized, evidence-based herbal supplements. Such integration promises a safe, natural, and effective strategy to support athlete health and performance in alignment with anti-doping regulations and holistic wellness principles.

Keywords: Nutrients, Medicinal plants, Athletes, Secondary metabolites

Funding: There was no external funding in this study.

Authors' contribution: All authors contributed equally to the writing and preparation of this manuscript.

Conflict of interest: The authors declare that there is no conflict of interest.



مقاله مروری

تأثیر مواد مغذی بر بهبود رشد و کیفیت گیاهان دارویی و افزایش توان جسمانی ورزشکاران

پریسا هاشمی شهرکی^۱، شهلا هاشمی شهرکی^{۲*}

^۱ گروه تربیت بدنی و علوم ورزشی، دانشکده تربیت بدنی و علوم ورزشی، دانشگاه پیام نور، شهرکرد، ایران

^۲ اداره کل آموزش و پرورش استان چهارمحال و بختیاری، شهرکرد، ایران

^۳ گروه زیست شناسی، دانشکده علوم، دانشگاه سیستان و بلوچستان، زاهدان، ایران

دریافت: ۱۴۰۴/۰۶/۰۴، پذیرش: ۱۴۰۴/۰۷/۰۴

چکیده

آلودگی در سال‌های اخیر گیاهان دارویی و معطر به واسطه دارا بودن ترکیبات فیتوشیمیایی متنوع از جمله فلاونوئیدها، آلکالوئیدها، ترپنوئیدها و فنولیک‌ها، در حوزه تغذیه ورزشی مورد توجه قرار گرفته‌اند. این ترکیبات می‌توانند با اثرات آنتی‌اکسیدانی و ضدالتهابی، استرس اکسیداتیو ناشی از تمرینات شدید را کاهش دهند، بازتوانی را تسریع کنند و عملکرد ورزشی را افزایش دهند. با این حال، میزان و کیفیت این ترکیبات در گیاهان دارویی وابسته به شرایط اکولوژیکی و تغذیه‌ای است. عواملی مانند نوع خاک، شدت نور، میزان آبیاری و دسترسی به عناصر معدنی در طول رشد گیاه در سنتز و تجمع متابولیت‌های ثانویه نقش مهمی دارند. افزایش تمایل به منابع طبیعی و مکمل‌های گیاهی در سال‌های اخیر عمدتاً به دلیل توانایی آن‌ها در کاهش استرس اکسیداتیو، تقویت سیستم ایمنی و تسریع روند بازتوانی پس از فعالیت‌های شدید بدنی است. پژوهش حاضر با رویکردی مروری، به بررسی ارتباط میان تغذیه معدنی گیاهان دارویی، عوامل اکولوژیک مؤثر بر کیفیت ترکیبات ثانویه، و اثرات این گیاهان بر شاخص‌های فیزیولوژیک ورزشکاران می‌پردازد. شواهد موجود نشان می‌دهند که شرایط زراعی از جمله نوع خاک، شدت نور، وضعیت آبیاری و میزان مواد مغذی، به شکل چشمگیری بر الگوی سنتز و تجمع متابولیت‌های ثانویه تأثیرگذار هستند. برای نمونه، نیتروژن و گوگرد در افزایش تولید آلکالوئیدها و ترکیبات گوگرددار نقش محوری دارند، در حالی که کمبود نیتروژن اغلب موجب افزایش تولید فنولیک‌ها و فلاونوئیدها می‌شود. این تغییرات نه تنها کیفیت دارویی گیاه را تحت تأثیر قرار می‌دهند، بلکه در صورت مصرف هدفمند می‌توانند به بهبود ظرفیت آنتی‌اکسیدانی، کاهش التهاب عضلانی، افزایش استقامت و ارتقای عملکرد هوازی ورزشکاران کمک نمایند. به طور خاص، گیاهانی مانند انگور، انار به دلیل وجود ترکیبات آنتی‌اکسیدانی و اثرات متابولیک سودمند، جایگاه ویژه‌ای در تغذیه ورزشی یافته‌اند. در نهایت، یافته‌ها بیانگر آن است که مدیریت بهینه تغذیه‌ای و زراعی، همراه با بهره‌گیری از مکمل‌های گیاهی، می‌تواند رویکردی ایمن و کارآمد برای ارتقای سلامت و بهبود توانمندی ورزشکاران محسوب شود.

واژه‌های کلیدی: مواد مغذی، گیاهان دارویی، ورزشکاران، ترکیبات ثانویه

استناد: پریسا هاشمی شهرکی، شهلا هاشمی شهرکی. تأثیر مواد مغذی بر بهبود رشد و کیفیت گیاهان دارویی و افزایش توان جسمانی ورزشکاران، کیفیت و ماندگاری تولیدات کشاورزی و مواد غذایی، (۱۴۰۴)، دوره ۵، شماره ۱، صفحات ۱۱۳-۱۲۷.

DOI: <https://doi.org/10.71516/qafj.2025.1216033>

ناشر: دانشگاه آزاد اسلامی واحد کرمان، ایران

© نویسندگان



مقدمه

گیاهان دارویی از دوران باستان به عنوان یکی از اساسی ترین منابع درمانی در نظام های سنتی پزشکی مورد استفاده قرار گرفته اند و همچنان در عصر حاضر نقش برجسته ای در حوزه سلامت و درمان ایفا می کنند (۱). با توجه به افزایش شیوع عوارض جانبی ناشی از مصرف داروهای سنتزی و هم زمان با تمایل فزاینده جوامع به روش های درمانی طبیعی، ایمن تر و کم عوارض، تقاضا برای محصولات گیاهی دارویی در سال های اخیر رشد چشمگیری داشته است (۲). این گیاهان علاوه بر کاربرد درمانی در بیماری های مختلف، در حوزه های پیشگیری، ارتقای سطح سلامت عمومی، بهبود کیفیت زندگی و حتی در عملکرد ورزشی نیز مورد توجه قرار گرفته اند. بسیاری از ترکیبات فعال داروهای مدرن از جمله آسپیرین (استخراج شده از گونه های جنس *Salix*)، تاکسول (حاصل از *Taxus baccata*) و آلکالوئیدهای وینکا (مانند وینکریستین و وینبلاستین از *Catharanthus roseus*) ریشه در گیاهان دارویی دارند. از دیدگاه اقتصادی، صنعت داروهای گیاهی و مکمل های طبیعی به یکی از پردرآمدترین و گسترده ترین بخش های بازار جهانی سلامت تبدیل شده است (۳). همچنین، کاربرد گیاهان دارویی محدود به حوزه درمان نبوده و در طول تاریخ ورزش نیز نقش های مؤثری در بهبود عملکرد جسمی و شناختی ورزشکاران ایفا کرده اند (۴). در تمدن های باستانی، ورزشکاران به طور گسترده از گیاهان دارویی به منظور ارتقای توان جسمانی، بهبود تمرکز ذهنی و کاهش خستگی عضلانی استفاده می کردند. به عنوان مثال، یونانیان باستان سیر را به عنوان یک ماده طبیعی برای افزایش استقامت و مقاومت در رقابت های ورزشی مصرف می نمودند. همچنین، در سیستم های پزشکی سنتی چین و آیورودا (هند)، گیاهانی همچون جینسینگ به دلیل خواص آداپتوژنی و توانمندسازی بدن در برابر استرس فیزیکی و روانی، به عنوان عوامل تقویت کننده انرژی و نیروبخش مورد استفاده قرار می گرفتند (۵). با پیشرفت دانش فارماکولوژی و فیزیولوژی ورزشی در عصر مدرن، این کاربردهای سنتی مورد بررسی های علمی قرار گرفته و شواهد تجربی متعددی از اثرات مثبت بسیاری از گیاهان دارویی بر عملکرد ورزشی از جمله افزایش ظرفیت

هوازی، کاهش زمان بازیابی پس از فعالیت شدید، و تعدیل پاسخ التهابی ارائه شده است. در حال حاضر، ورزشکاران حرفه ای به ویژه با توجه به نگرانی های مربوط به عوارض جانبی داروهای سنتزی و محدودیت های ناشی از قوانین ضد دوپینگ، تمایل فزاینده ای به استفاده از مکمل های گیاهی دارند. در این میان، گیاهانی مانند جینسینگ، زنجبیل، زردچوبه و چای سبز به دلیل خواص آنتی اکسیدانی، ضد التهابی و انرژی بخش، جایگاه ویژه ای در برنامه های تغذیه ورزشی یافته اند (۶). با این حال، ورزشکاران به ویژه آن هایی که درگیر فعالیت های ورزشی شدید و طولانی مدت هستند، همچنان با چالش بالینی و فیزیولوژیکی استرس اکسیداتیو مواجه می باشند. این نوع فعالیت ها منجر به افزایش تولید گونه های فعال اکسیژن در میتوکندری ها و سایر بخش های سلول می شود. در صورت عدم تعادل بین تولید گونه های فعال اکسیژن و ظرفیت سیستم آنتی اکسیدانی ذاتی بدن، انباشت این رادیکال های آزاد باعث القای استرس اکسیداتیو می گردد که در پی آن، آسیب به لیپیدهای غشای سلولی، پروتئین ها و DNA، القای پاسخ های التهابی، افزایش خستگی عضلانی و اختلال در فرآیندهای بازتوانی عضلانی رخ می دهد (۷). در این راستا، مکمل های آنتی اکسیدانی به عنوان یک راهبرد تغذیه ای برای تعدیل استرس اکسیداتیو و حفظ هموستاز سلولی مطرح شده اند. هرچند مکمل های سنتتیک آنتی اکسیدانی (مانند ویتامین C و E) به طور گسترده مورد استفاده قرار گرفته اند، اما نگرانی هایی در مورد ایمنی بلندمدت، اثرات جانبی بالقوه و همچنین محدودیت های نظارتی مرتبط با قوانین ضد دوپینگ، جایگزین های طبیعی را مورد توجه قرار داده است. در این زمینه، گیاهان دارویی به عنوان منابع غنی از ترکیبات ثانویه مانند پلی فنول ها، فلاونوئیدها، آنتوسیانین ها و تربنوئیدها، توانایی قابل توجهی در خنثی سازی گونه های فعال اکسیژن و افزایش فعالیت آنزیم های آنتی اکسیدانی داخلی (مانند سوپراکسید دیسموتاز، گلوتاتیون پراکسیداز و کاتالاز) از خود نشان داده اند. این مکانیسم های چندوجهی نه تنها از سلول در برابر آسیب اکسیداتیو محافظت می کنند، بلکه می توانند به طور غیرمستقیم عملکرد ورزشی، زمان بازیابی و مقاومت عضلانی را بهبود بخشند (۷). چای سبز به دلیل غنی بودن از کاتچین ها به ویژه اپی گالوکاتچین گالات

زردچوبه با ترکیب فعال کورکومین، و انگور حاوی رسوراترول، از جمله منابع گیاهی شناخته شده‌ای هستند که در مطالعات بالینی و آزمایشگاهی اثربخشی آن‌ها در کاهش استرس اکسیداتیو، تعدیل پاسخ التهابی و تسهیل فرآیند ریکاوری پس از فعالیت‌های ورزشی شدید به‌طور علمی تأیید شده است (۸). این ترکیبات با بازگرداندن تعادل بین گونه‌های فعال اکسیژن و سیستم آنتی‌اکسیدانی بدن، نه تنها از ساختارهای سلولی در برابر آسیب اکسیداتیو محافظت می‌کنند، بلکه می‌توانند توانایی‌های جسمانی، کیفیت تمرین و زمان بازیابی عملکرد عضلانی را بهبود بخشند. Sellami و همکاران (۲۰۱۸) در مطالعه‌ای گزارش کردند که گیاهانی همچون *Rhodiola rosea*، *Tribulus terrestris* و *Ginkgo biloba* با داشتن ترکیبات بیولوژیکی فعال، قادرند استقامت هوازی و بی‌هوازی را افزایش داده، سطح استرس اکسیداتیو را کاهش دهند و زمان بازتوانی پس از فعالیت‌های فیزیکی شدید را به‌طور معنی‌داری کوتاه‌تر نمایند (۹). این یافته‌ها اهمیت روزافزون گیاهان دارویی را در مدیریت فیزیولوژیکی ورزشکاران برجسته می‌سازد. این گیاهان به‌عنوان منابع غنی از ترکیبات ثانویه گیاهی شناخته می‌شوند. اگرچه این متابولیت‌ها برای فرآیندهای اساسی رشد و نمو گیاه ضروری نیستند، اما نقش کلیدی در مکانیسم‌های دفاعی گیاه در برابر عوامل استرس‌زای زنده (مانند پاتوژن‌ها) و غیرزنده (مانند اشعه فرابنفش، خشکی و دماهای شدید) ایفا می‌کنند. همین خواص دفاعی در سطح گیاه، در بدن انسان به‌عنوان مکانیسم‌های محافظتی ضدالتهابی، آنتی‌اکسیدانی و آداپتوژنی ترجمه می‌شوند و زمینه‌ساز کاربردهای بالقوه آن‌ها در بهینه‌سازی عملکرد ورزشی و سلامت عمومی می‌گردند. از دیدگاه بیوشیمیایی، مکانیسم‌های اصلی اثر ترکیبات ثانویه گیاهی عمدتاً بر پایه خنثی‌سازی گونه‌های فعال اکسیژن، تنظیم منفی مسیرهای سیگنال‌دهی التهابی به‌ویژه فاکتور رونویسی هسته‌ای NF-κB فعال‌سازی آنزیم‌های فاز دوم سم‌زدایی مانند گلوتاتیون-S-ترانسفراز، و تعدیل پاسخ‌های ایمنی ذاتی و اکتسابی استوار است (۱۰). این مکانیسم‌های چندوجهی، ضمن کاهش آسیب اکسیداتیو به ماکرومولکول‌های سلولی، به حفظ هموستاز سلولی و بهبود عملکرد فیزیولوژیکی در شرایط استرس متابولیک مانند فعالیت‌های ورزشی شدید کمک می‌کنند.

با این حال، سنتز و تجمع این متابولیت‌های زیست‌فعال در بافت‌های گیاهی یک پدیده ثابت یا ذاتی نیست، بلکه تحت تأثیر تعامل پیچیده‌ای از عوامل ژنتیکی، محیطی و زراعی قرار دارد. به‌طور خاص، شرایط اکولوژیکی و مدیریت تغذیه‌ای گیاه نقش تعیین‌کننده‌ای در کمیت و کیفیت ترکیبات ثانویه دارند. عواملی همچون نوع و ساختار خاک، شدت و طیف نور فتوسنتزی، رژیم آبیاری، دما و به‌ویژه غلظت و تعادل عناصر غذایی ضروری (مانند نیتروژن، فسفر، پتاسیم، گوگرد و عناصر کمیاب) می‌توانند به‌طور مستقیم یا غیرمستقیم بر مسیرهای بیوسنتزی فنول‌ها، فلاونوئیدها و سایر متابولیت‌های ثانویه تأثیرگذار باشند. این وابستگی زیست‌محیطی، ضرورت استانداردسازی شرایط کشت و برداشت گیاهان دارویی را برای تضمین کارایی بالینی و تکرارپذیری اثرات درمانی آن‌ها بیش از پیش آشکار می‌سازد (۱۱). Prabhudev و همکاران (۲۰۲۳)، نشان دادند که تغییرات pH خاک در بازه ۳/۸ تا ۸/۳ به‌طور معنی‌داری بر میزان فنول‌ها و فلاونوئیدها و نیز ظرفیت آنتی‌اکسیدانی گیاهان اثرگذار است. همچنین، مطالعاتی نشان داده‌اند که استفاده از اصلاح‌کننده‌های آلی مانند کودهای آلی می‌تواند باعث افزایش محتوای فنول‌ها و توان آنتی‌اکسیدانی در گیاهان خانواده شب‌بوین شود. در این میان، نقش عناصر غذایی بسیار حیاتی است. عناصر غذایی ماکرو (نیتروژن، فسفر، پتاسیم، کلسیم، منیزیم) و میکرو (آهن، روی، منگنز، مس، بور) علاوه بر نقش بنیادین در متابولیسم اولیه (مانند فتوسنتز و تنفس)، به‌عنوان کوفاکتورها برای آنزیم‌های کلیدی در مسیرهای سنتز متابولیت‌های ثانویه عمل می‌کنند (۱۲). برای مثال، نیتروژن جزئی اساسی در ساختار آلکالوئیدها و اسیدهای آمینه پیش‌ساز برخی فنول‌هاست. از سوی دیگر، عناصری مانند روی و منگنز کوفاکتور آنزیم سوپراکسید دیسموتاز هستند که خود در مسیرهای تولید متابولیت‌های دفاعی نقش دارد. با مدیریت اصولی و دقیق تغذیه گیاه، میزان ترکیبات فعال در گیاهان دارویی افزایش یافته که موجب بهبود کیفیت دارویی و کاربردهای درمانی آن‌ها می‌شود. با وجود پیشرفت‌های قابل توجه در دو حوزه‌ی مستقل علم مدیریت زراعی و تغذیه ورزشی، هنوز پیوند عمیق میان این دو دانش به‌طور جامع مورد توجه قرار نگرفته است. در علم مدیریت زراعی، تمرکز اصلی بر مدیریت بهینه‌ی

تأثیر عوامل محیطی و تغذیه‌ای بر سنتز

متابولیت‌های ثانویه

گیاهان دارویی، به دلیل دارا بودن ترکیبات متنوع فیتوشیمیایی مانند آلکالوئیدها، فلاونوئیدها، ترپنوئیدها، تانن‌ها و گلیکوزیدها، همواره مورد توجه پژوهشگران و صنایع دارویی قرار داشته‌اند (۱۳). این ترکیبات نه تنها در پاسخ به تنش‌های محیطی نقش دارند، بلکه پایه و اساس کاربردهای درمانی این گیاهان را تشکیل می‌دهند (۱۴). کیفیت و کمیت این مواد مؤثره به شدت تحت تأثیر عوامل محیطی و زراعی است و حتی تغییرات چشمگیری در مقدار ترکیبات فیتوشیمیایی شود. در ادامه تعدادی از عوامل محیطی و مدیریتی که نقش کلیدی در سنتز و تجمع متابولیت‌های ثانویه دارند، مورد بررسی قرار گرفته‌اند.

نقش نوع خاک در سنتز ترکیبات

فیتوشیمیایی

ویژگی‌های فیزیکی و شیمیایی خاک مانند pH، بافت، ظرفیت نگهداری آب، مواد آلی و نسبت عناصر غذایی، نقش تعیین‌کننده‌ای در رشد و متابولیسم ثانویه گیاهان دارویی دارد. به‌طور مثال، خاک‌های با pH اسیدی معمولاً جذب عناصر ریزمغذی مانند آهن، منگنز و روی را افزایش می‌دهند که ممکن است به تولید بیشتر آنزیم‌های دخیل در سنتز ترکیبات فنلی منجر شود (۱۵). در مقابل، خاک‌های قلیایی می‌توانند میزان در دسترس بودن فسفر را کاهش دهند که این موضوع می‌تواند مستقیماً سنتز متابولیت‌هایی مانند آلکالوئیدها و ساپونین‌ها را تحت تأثیر قرار دهد. Prabhudev و همکاران (۲۰۲۳)، اثر pH در بازه ۳/۸ تا ۸/۳ را بر چند گونه گیاهی ارزیابی کرد. در شرایط اسیدی تا نزدیک خنثی (حدود ۵/۷-۶/۵)، گونه‌های *Oryza sativa* و *Zea mays* بیشترین رشد بالاترین محتوای ترکیبات فنلی و فلاونوئیدی را نشان دادند. در مقابل، برای گونه‌ی *Macrotyloma uniflorum*، شرایط کمی قلیایی (حدود pH ۷/۶) مطلوب‌تر بود و سبب افزایش رشد و بهبود ظرفیت آنتی‌اکسیدانی شد. این یافته‌ها بیانگر آن است که اگرچه به‌طور کلی شرایط اسیدی-خنثی می‌تواند برای بسیاری از گونه‌ها مناسب باشد، اما الگوی تولید ترکیبات

شرایط کشت و تغذیه‌ی گیاهان دارویی است؛ به‌گونه‌ای که با اعمال راهبردهای دقیق زراعی می‌توان کیفیت و کمیت متابولیت‌های فعال را به‌طور چشمگیری ارتقا بخشید. در سوی دیگر، علم تغذیه ورزشی بر ارزیابی اثرات فیزیولوژیک همین ترکیبات بر بدن ورزشکاران متمرکز است و نشان می‌دهد که چگونه این مواد می‌توانند استقامت، بازتوانی و عملکرد ورزشی را بهبود دهند. بنابراین تحقیقات هر دو حوزه، به صورت جداگانه پیش رفته‌اند و تاکنون مطالعه‌ای که این دو حوزه را به هم پیوند دهد و به‌طور نظام‌مند نشان دهد چگونه مدیریت زراعی و تغذیه‌ای گیاهان دارویی می‌تواند بر اثرگذاری آن‌ها در حوزه تغذیه ورزشی مؤثر باشد، در دسترس نیست. بنابراین، انجام یک مطالعه مروری برای پر کردن این خلأ، نه تنها یک ضرورت علمی، بلکه یک نیاز کاربردی برای متخصصان علوم زراعی، صنایع غذایی و تغذیه ورزشی محسوب می‌شود.

روش کار

در مطالعه مروری حاضر، برای گردآوری اطلاعات، جستجو در پایگاه‌های علمی معتبر شامل PubMed، Scopus، Google Scholar، Web of Science medicinal، phytochemical، athletic performance، plants، secondary، ecological factors، quality، metabolites و nutrients. بعد از دریافت مقالات، فرآیند غربالگری مقالات به صورت گام‌به‌گام انجام شد: ابتدا عناوین مقالات بررسی و موارد تکراری حذف گردید، سپس چکیده‌ها مرور شد و در نهایت متن کامل مقالات واجد شرایط مطالعه شد. در نهایت، مقالات انتخاب‌شده بر اساس موضوع به بخش‌های اصلی تأثیر عوامل اکولوژیکی و زراعی (مانند نوع خاک، شدت نور، میزان آبیاری) بر کیفیت گیاهان دارویی، نقش مواد مغذی در رشد و ترکیبات گیاهان دارویی، اثر گیاهان دارویی بر شاخص‌های فیزیولوژیکی ورزشکاران تقسیم و مورد استفاده قرار گرفتند.

کاهش شدت نور به‌طور معنی‌داری موجب افزایش متابولیت‌های ثانویه شد (۱۹). این نتایج نشان می‌دهد که بهینه‌سازی شدت نور می‌تواند ابزاری کلیدی برای افزایش بازدهی متابولیت‌های ثانویه در شرایط کشت کنترل‌شده باشد. نور علاوه بر اثرگذاری بر میزان تولید متابولیت‌های ثانویه، می‌تواند فعالیت آنزیم‌های کلیدی مسیرهای بیوسنتزی را نیز تغییر دهد. به‌عنوان مثال، مطالعات نشان داده‌اند که افزایش شدت نور باعث بالا رفتن فعالیت آنزیم‌های فنیل آلانین آمونیولاز و سینامیل الکل دهیدروژناز و افزایش محتوای فلاونوئیدها در گیاهان دارویی *Withania somnifera* می‌شود (۲۰). همچنین کیفیت نوری، که به طول موج‌های مختلف نور اشاره دارد، یکی دیگر از عوامل مؤثر بر تولید ترکیبات ثانویه گیاه است. نور مرئی شامل طیف‌هایی از جمله آبی، قرمز، سبز و زرد است که هر یک به گونه‌ای متمایز در تنظیم رشد گیاه و بیوسنتز متابولیت‌ها نقش دارند. در این میان، نور آبی و قرمز بیش از سایر طول موج‌ها به‌عنوان محرک‌های اصلی تولید ترکیبات فیتوشیمیایی شناخته شده‌اند. نور آبی با تحریک مسیرهای بیوسنتزی مرتبط باعث افزایش تولید فلاونوئیدها و فنول‌ها می‌شود؛ این تغییرات اغلب با افزایش بیان ژن‌های مرتبط در این مسیرها همراه است. به‌طور مثال، تحت تابش نور آبی، افزایش قابل توجهی در تجمع فلاونوئیدها و فلاونوئیدهای خاص مانند سالیروسید در گیاه *Rhodiola imbricata* مشاهده شده است (۲۱). از سوی دیگر، نور قرمز علاوه بر تحریک رشد گیاهان، معمولاً باعث افزایش تولید ترپنوئیدها و آلکالوئیدها می‌شود. مطالعات نشان داده‌اند که تابش نور قرمز می‌تواند بیان آنزیم‌های کلیدی در مسیرهای بیوسنتزی ترپنوئیدها و آلکالوئیدها را افزایش داده و در نتیجه مقدار این ترکیبات در گیاه را ارتقا بخشد. علاوه بر نور مرئی، پرتوهای فرابنفش نیز می‌توانند تأثیر قابل توجهی بر تولید متابولیت‌های ثانویه داشته باشند. به‌طور مثال، تابش UV-B میزان آنتوسیانین در *Coleus forskohlii* را تا حدود ۹۶٪ افزایش داد، در حالی که بر روی *Cymbopogon citratus* تنها افزایش ۴۵٪ در محتوای فنول کل گزارش کردند (۲۲، ۲۳). این یافته‌ها نشان می‌دهد که نه تنها شدت و کیفیت نور، بلکه نوع طیف نوری نیز می‌تواند تعیین‌کننده مسیر و سطح تولید متابولیت‌های ثانویه در گیاهان دارویی باشد.

فیتوشیمیایی تحت تأثیر pH به‌طور قابل توجهی بین گونه‌ها متفاوت است. علاوه بر این، نتایج سنجش فعالیت آنتی‌اکسیدانی نشان داد که ظرفیت آنتی‌اکسیدانی گیاهان ارتباط تنگاتنگی با pH خاک و تغییرات متابولیت‌های ثانویه دارد. کاهش فعالیت آنتی‌اکسیدانی در pH های بالا احتمالاً ناشی از محدودیت دسترسی عناصر ریزمغذی در خاک‌های قلیایی است، در حالی که در pH های پایین‌تر افزایش دسترسی این عناصر موجب بهبود فعالیت آنزیم‌های بیوسنتزی و افزایش ترکیبات فنلی می‌شود (۱۶). Mudau و همکاران (۲۰۲۲) در مطالعه‌ای میدانی در ساوانای آفریقای جنوبی، تأثیر دو تیپ خاکی متمایز شامل GM-L^۱ و AKS-CH^۲ را بر محتوای متابولیت‌های ثانویه گیاهان دارویی بومی ارزیابی کردند. نتایج نشان داد که الگوی تولید ترکیبات فیتوشیمیایی به‌طور هم‌زمان به نوع خاک و گونه‌ی گیاهی وابسته است. به‌عنوان نمونه، گونه *Dichrostachys cinerea* در خاک AKS-CH بالاترین میزان تانن نامحلول را داشت، در حالی که *Ziziphus mucronata* در همین خاک بیشترین سطح فنول را نشان داد. این یافته‌ها بیانگر آن است که خاک می‌تواند ظرفیت بیوسنتزی گونه‌ها را به شیوه‌ای متفاوت تعدیل کند و انتخاب بستر کشت مناسب، یک عامل کلیدی در ارتقای کیفیت دارویی گیاهان به شمار می‌رود (۱۵، ۱۷).

شدت نور و کیفیت طیف نوری

شدت نور از مهم‌ترین عوامل محیطی در تنظیم مسیرهای بیوسنتزی متابولیت‌های ثانویه در گیاهان دارویی است. واکنش گیاهان به شدت نور به نیاز نوری آن‌ها وابسته است؛ به‌طوری‌که در گونه‌های آفتاب‌دوست، نور شدید موجب افزایش تولید ترکیبات ثانویه می‌شود، در حالی که در گیاهان سایه‌پسند، نور کم این فرایند را تحریک می‌کند. برای مثال، Xu و همکاران (۲۰۱۴) گزارش کردند که در *Ginkgo biloba*، شدت نور بالا سبب افزایش قابل توجه فلاونوئیدها شد (۱۸). در مقابل، در *Panax ginseng*، نور کم منجر به افزایش تجمع جینسنوزیدها گردید. همچنین در *Polygonum minus*

^۱ Glenrosa-Mispah-Lithosols

^۲ Aeolian Kalahari Sand-Clovelly-Hutton

مدیریت آبیاری و تأثیر تنش خشکی

وضعیت آبیاری یکی از مهم‌ترین عوامل مؤثر بر ترکیب مواد مؤثره گیاهان دارویی است (۲۴). در مناطق خشک و نیمه‌خشک، کمبود آب یکی از مهم‌ترین چالش‌های محیطی برای گیاهان به شمار می‌رود. این تنش غیرزنده می‌تواند فرآیندهای فیزیولوژیک، بیوشیمیایی و متابولیکی گیاه را به شدت تحت تأثیر قرار دهد. در گیاهان دارویی و معطر، که به دلیل تولید ترکیبات ثانویه‌ای مانند فنولیک‌ها، فلاونوئیدها، آلکالوئیدها و اسانس‌ها ارزشمند هستند، کم‌آبی نقش ویژه‌ای دارد. تغییر در میزان و الگوی سنتز این ترکیبات معمولاً به عنوان یک واکنش دفاعی در برابر شرایط نامساعد محیطی بروز می‌کند و در واقع بخشی از استراتژی بقا و سازگاری گیاه به شمار می‌رود (۱۱). تنش خشکی با ایجاد اختلال در تعادل اکسیداسیون، کاهش سلولی، منجر به افزایش تجمع گونه‌های فعال اکسیژن می‌گردد. این مولکول‌های واکنش‌پذیر در صورت عدم خنثی‌سازی، موجب آسیب به ساختارهای حیاتی گیاه از جمله غشاهای سلولی، پروتئین‌ها و اسیدهای نوکلئیک می‌شوند. در واکنش به این شرایط، گیاه با تحریک مسیرهای متابولیسم ثانویه، به سنتز ترکیباتی نظیر فلاونوئیدها، فنولیک‌ها و آنتوسیانین‌ها می‌پردازد. این متابولیت‌های ثانویه با خاصیت آنتی‌اکسیدانی خود نقش مؤثری در خنثی‌سازی رادیکال‌های آزاد داشته و در نتیجه، نقش حفاظت از ساختار سلولی و افزایش تحمل گیاه در برابر شرایط تنش‌زای خشکی را انجام می‌دهند. از دیدگاه بیوشیمیایی، مسیرهای فنیل پروپانویید (تولید اسیدهای فنولیک و فلاونوئیدها) و مسیر شیکیمات در پاسخ به خشکی تحریک می‌شوند. بسته شدن روزنه‌ها و کاهش فتوسنتز نیز باعث تغییر در تخصیص کربن می‌شود؛ بخشی از کربن که به رشد اختصاص داشت، به سمت سنتز متابولیت‌های ثانویه هدایت می‌شود (۲۵). به عنوان نمونه، *Chrysargyris* و همکاران (۲۰۲۲) در بادرنجبویه گزارش کردند که تنش خشکی (۵۰٪ آبیاری) میزان کل فنولیک را در برداشت دوم از ۲۳۱.۸۸ به ۴۱۰.۴۳ $\mu\text{mol GAE/g FW}$ (افزایش حدود ۷۷٪) و فلاونوئیدها را از ۲۹.۹۱ به ۳۹.۰۱ mg rutin/g FW (افزایش حدود ۳۰٪) رساند (۲۴). در گیاه شنبلیله، نشان دادند که تنش

خشکی موجب افزایش آنتوسیانین به میزان ۳۵٪ و کاروتنوئید به میزان ۲۲٪ شد، در حالی که عملکرد دانه بیش از ۴۰٪ کاهش یافت (۲۶). این یافته نشان می‌دهد که بهبود کیفیت متابولیت‌ها همزمان با افت شدید عملکرد زیستی رخ می‌دهد. در زیره سبز نیز گزارش کردند که خشکی محتوای فنولیک برگ را حدود ۲۸٪ افزایش داد. با این حال، در شرایط آبیاری کامل، اسانس بذر و فنولیک‌های دانه بیشترین مقدار را داشتند (۲۷). این نتایج بیانگر آن است که بخش‌های مختلف گیاه واکنش متفاوتی به تغییر وضعیت آبی نشان می‌دهند. همچنین در مریم‌گلی نشان دادند که کم‌آبی متوسط بازده اسانس و غلظت ترکیبات اصلی مانند کامفور و ۱،۸-سینئول را افزایش داد. در مقابل، در شرایط خشکی شدید، بازده اسانس کاهش یافت که نشان‌دهنده وجود یک آستانه بهینه برای تحریک سنتز متابولیت‌هاست (۲۸).

مواد مغذی و نقش آن‌ها در رشد و کیفیت گیاهان دارویی

عناصر غذایی ماکرو مانند نیتروژن (N)، فسفر (P)، پتاسیم (K) و گوگرد (S) و همچنین عناصر غذایی میکرو همچون آهن (Fe)، روی (Zn) و منگنز (Mn) برای رشد گیاه ضروری هستند. میزان دسترس‌پذیری آن‌ها هم بر متابولیسم اولیه و هم بر متابولیسم ثانویه تأثیر می‌گذارد. تغذیه متعادل موجب افزایش زیست‌توده گیاه و شرایط مناسب برای فرایندهای متابولیکی می‌شود. با این حال، کمبود یا عدم تعادل مواد غذایی می‌تواند به شدت الگوی ترکیبات ثانویه را تغییر دهد و در برخی موارد حتی باعث افزایش مواد فعال دارویی شود (۲۹). برای نمونه، نیتروژن از یک سو موجب تقویت رشد رویشی و افزایش سنتز پروتئین می‌شود و از سوی دیگر، مستقیماً بر تولید ترکیبات نیتروژن‌دار نظیر آلکالوئیدها تأثیر دارد (۳۰). مکانیسم اثر نیتروژن به فرضیه تعادل کربن/نیتروژن باز می‌گردد؛ در شرایط وفور نیتروژن، گیاه کربن حاصل از فتوسنتز را به سمت سنتز ترکیبات N-دار مانند آلکالوئیدها هدایت می‌کند، در حالی که در کمبود نیتروژن، کربن مازاد به مسیرهای کربن‌محور شامل فنولیک‌ها، تانن‌ها و فلاونوئیدها منتقل می‌شود (۳۷، ۳۸).

اثر گیاهان دارویی بر شاخص‌های فیزیولوژیکی ورزشکاران

در سال‌های اخیر، استفاده از گیاهان دارویی و معطر به عنوان منابع طبیعی مکمل‌های تغذیه‌ای در حوزه ورزش و علوم ورزشی مورد توجه فزاینده‌ای قرار گرفته است (۳۴-۳۶). این گیاهان به واسطه برخورداری از متابولیت‌های ثانویه‌ای همچون فلاونوئیدها، فنولیک‌ها، ترپنوئیدها و آلکالوئیدها می‌توانند نقشی اساسی در بهبود عملکرد ورزشی، کاهش استرس اکسیداتیو و تقویت سیستم ایمنی ایفا کنند (۳۷). از آن‌جا که فعالیت‌های ورزشی شدید منجر به افزایش تولید رادیکال‌های آزاد شده و می‌تواند آسیب‌های سلولی و خستگی زودرس را به دنبال داشته باشد، بهره‌گیری از گیاهان دارویی سرشار از آنتی‌اکسیدان به عنوان یک رویکرد مؤثر در بهبود وضعیت فیزیولوژیک و ارتقای توانمندی ورزشکاران پیشنهاد می‌شود (۳۷). ورزشکاران حرفه‌ای و نیمه‌حرفه‌ای به دلیل انجام تمرینات شدید، به‌طور ویژه در معرض استرس اکسیداتیو قرار دارند. رادیکال‌های آزاد تولیدشده در جریان فعالیت‌های ورزشی می‌توانند به ساختارهای حیاتی نظیر غشاهای سلولی، پروتئین‌ها و DNA آسیب وارد کنند. یافته‌های پژوهشی نشان داده‌اند که ترکیبات آنتی‌اکسیدانی موجود در گیاهانی همچون انگور، انار، هلو و گریپ‌فروت قادرند با خنثی‌سازی رادیکال‌های آزاد، ظرفیت آنتی‌اکسیدانی بدن را به‌طور قابل توجهی افزایش دهند (۳۸). گیاهان دارویی از طریق چندین مسیر فیزیولوژیکی می‌توانند بر بهبود عملکرد ورزشی و سلامت ورزشکاران اثرگذار باشند. نخست، ترکیبات آنتی‌اکسیدانی و ضدالتهابی موجود در آن‌ها مانند پلی‌فنول‌ها و فلاونوئیدها با خنثی‌سازی رادیکال‌های آزاد، کاهش پراکسیداسیون لیپید و افزایش فعالیت آنزیم‌های دفاع آنتی‌اکسیدانی، موجب کاهش استرس اکسیداتیو، خستگی و آسیب‌های سلولی ناشی از تمرینات شدید می‌شوند. دوم، برخی آلکالوئیدها نظیر کافئین و افدرین با تحریک سیستم عصبی مرکزی و افزایش ترشح کاتکول‌آمین‌ها، هوشیاری و ظرفیت تحمل تمرینات شدید را ارتقا می‌دهند (۳۹). سوم، تعدیل متابولیسم انرژی از طریق افزایش اکسیداسیون چربی و حفظ ذخایر گلیکوژن عضلانی، زمینه‌ساز بهبود استقامت ورزشی است. چهارم، برخی گیاهان مانند جینکوبیلوبا و

مطالعات نشان داده‌اند که مصرف بالای نیتروژن اغلب با افزایش غلظت آلکالوئیدها در گیاهانی مانند *Atropa belladonna* همراه است، در حالی که کمبود نیتروژن معمولاً منجر به کاهش تجمع این ترکیبات می‌گردد. ترکیبات فنولیکی و فلاونوئیدی که عمدتاً از مسیرهای متابولیکی کربن تولید می‌شوند، در شرایط کمبود نیتروژن افزایش می‌یابند. دلیل این پدیده تغییر در نسبت C/N است که موجب تغییر جهت جریان کربن به سوی مسیرهای دفاعی می‌شود. به این ترتیب، گیاه در شرایط تنش غذایی قادر است با افزایش متابولیت‌های ثانویه کربن‌دار، بقای خود را تضمین کند. گوگرد نیز نقش حیاتی در فرآیندهای متابولیکی دارد. این عنصر در بیوسنتز اسیدهای آمینه‌ی گوگرددار (مانند سیستئین و متیونین) و ترکیباتی چون گلوتاتیون و آلین نقش کلیدی دارد (۳۱). این ترکیبات به‌عنوان پیش‌ساز بسیاری از متابولیت‌های گوگرددار عمل کرده و در سازوکار دفاع اکسیداتیو و نیز تشکیل ترکیبات دارویی در گیاهانی مانند سیر مؤثر هستند. به عنوان مثال، مصرف گوگرد در سیر موجب افزایش چشمگیر آلین و سایر ترکیبات گوگردی می‌شود، در حالی که کمبود آن تولید گلوکوزینولات‌ها در گیاهان چلیپایی نظیر خردل و کلم را کاهش می‌دهد. این مکانیسم نشان می‌دهد که گوگرد از طریق تأمین پیش‌سازهای بیوشیمیایی و تقویت مسیر گلوتاتیون، سنتز متابولیت‌های دفاعی را کنترل می‌کند. فسفر و پتاسیم عمدتاً با فرایندهای انرژی و رشد سلولی مرتبط‌اند، اما نقش غیرمستقیمی در سنتز متابولیت‌های ثانویه دارند. فسفر از طریق افزایش تولید ATP و تأمین انرژی موردنیاز واکنش‌های بیوسنتزی، به‌ویژه در مسیرهای پرانرژی مانند سنتز آلکالوئیدها، مؤثر است (۳۲). به‌عنوان نمونه، گزارش شده است که تغذیه فسفر در شبلیله سبب افزایش تجمع آلکالوئید تریگونلین شده است. پتاسیم نیز به‌طور عمده به‌عنوان فعال‌کننده آنزیم‌های متابولیکی و تنظیم‌کننده انتقال قندها عمل می‌کند؛ بنابراین از طریق افزایش دسترسی کربن به مسیرهای ثانویه می‌تواند سنتز ترکیباتی مانند ترپنوئیدها و آلکالوئیدها را تحت تأثیر قرار دهد (۳۳).

نیتروژن دار مانند آلکالوئیدها دارد. بر اساس فرضیه تعادل کربن/نیتروژن، در شرایط وفور نیتروژن، کربن حاصل از فتوسنتز به سنتز ترکیبات N-دار هدایت می‌شود، اما در کمبود نیتروژن به سمت ترکیبات کربنی مثل فنولیک‌ها و فلاونوئیدها می‌رود. از منظر کاربرد ورزشی، شواهد نشان داد که گیاهانی مانند انار و انگور با دارا بودن ترکیبات فنولی و ظرفیت بالای آنتی‌اکسیدانی، نقش مهمی در بهبود استقامت، تسریع بازتوانی و کاهش استرس اکسیداتیو ایفا می‌کنند (۴۱). در مقابل، گیاهانی مانند جینسینگ و رودیولا بیشتر در بهبود تحمل تمرینات شدید و کاهش خستگی مؤثر بوده‌اند. این نتایج نشان می‌دهد که اثر گیاهان دارویی وابسته به نوع ترکیبات غالب آن‌ها و حتی شرایط ورزشی مصرف‌کنندگان است. اثرات گیاهان دارویی و مکمل‌های گیاهی بر عملکرد ورزشی در سطوح مولکولی و فیزیولوژیک از طریق تنظیم مسیرهای سیگنالینگ کلیدی و تغییر در بیان ژن‌های مرتبط با پاسخ به استرس بروز می‌کند. ترکیبات فعال گیاهی از جمله پلی‌فنول‌ها، فلاونوئیدها و کاروتنوئیدها در تنظیم مسیر Nrf2/Keap1-ARE نقش عمده‌ای دارند (۴۲). فعال‌سازی Nrf2 موجب افزایش بیان آنزیم‌های آنتی‌اکسیدانی نظیر سوپراکسید دیسموتاز، کاتالاز، گلوتاتیون پراکسیداز می‌شود که دفاع سلولی را در برابر گونه‌های فعال اکسیژن تقویت می‌کنند. این فرآیند به‌ویژه در تمرینات استقامتی شدید که تولید گونه‌های فعال اکسیژن افزایش یافته و خطر آسیب به غشاهای سلولی، پروتئین‌ها و DNA وجود دارد، اهمیت ویژه‌ای دارد. در کنار این مسیر، ترکیباتی مانند کورکومین و آستاگزانتین با مهار مسیر NF- κ B از تولید سایتوکاین‌های پیش‌التهابی مانند IL-6 و TNF- α جلوگیری می‌کنند و از این طریق پاسخ‌های التهابی ناشی از تمرینات سنگین را تعدیل می‌نمایند (۴۳). مسیرهای MAPK شامل ERK، JNK و p38 نیز از دیگر نقاط کلیدی در پاسخ به استرس هستند که تعدیل آن‌ها توسط ترکیبات گیاهی می‌تواند تعادل میان استرس سازگارکننده و استرس مخرب را حفظ کند (۴۴). شواهد بالینی نشان می‌دهد که این مکانیزم‌های مولکولی در شرایط واقعی تمرین نیز نقش فعالی دارند. به‌عنوان نمونه، در مطالعه‌ای بر فوتبالیست‌ها، مصرف روزانه ۵۰۰ میلی‌لیتر آب انار به مدت دو هفته موجب کاهش معنی‌دار مالون‌دی‌آلدئید و

کورديسپس با تقویت سنتز نیتریک‌اکسید و گشادشدن عروق، موجب بهبود جریان خون و اکسیژن‌رسانی به عضلات می‌شوند (۴۰). بنابراین، توجه به تغذیه گیاهان دارویی، یکی از ارکان کلیدی در طراحی برنامه‌های تغذیه ورزشی به شمار می‌آید.

بحث

یافته‌های مرور حاضر نشان داد که کیفیت و کمیت ترکیبات ثانویه در گیاهان دارویی به شدت تحت تأثیر عوامل اکولوژیکی و مدیریتی از جمله نوع خاک، شدت نور، شرایط آبیاری و دسترسی به عناصر معدنی قرار دارد. این تغییرات نه تنها بر ویژگی‌های دارویی گیاهان اثرگذار هستند، بلکه از منظر علوم ورزشی نیز اهمیت دارند؛ زیرا مصرف گیاهان با ترکیبات آنتی‌اکسیدانی و ضدالتهابی می‌تواند عملکرد فیزیولوژیکی ورزشکاران را بهبود بخشد. مطالعات مختلف نشان داده‌اند که نوع خاک و pH آن نقشی کلیدی در تولید متابولیت‌های ثانویه دارد. به عنوان مثال، پژوهش Prabhudev و همکاران (۲۰۲۳) بیان کرد که خاک‌های نزدیک به pH خنثی بیشترین سطح ترکیبات فنولی را ایجاد می‌کنند، در حالی که Mudau و همکاران (۲۰۲۲) گزارش دادند که نوع خاک علاوه بر کمیت، الگوی سنتز ترکیبات را نیز تغییر می‌دهد. این تناقض‌ها احتمالاً ناشی از تفاوت در گونه‌های گیاهی و شرایط اقلیمی محل مطالعه است. شدت نور نیز از مهم‌ترین عوامل مؤثر بر سنتز متابولیت‌هاست. Xu و همکاران (۲۰۱۴) نشان دادند که نور زیاد باعث افزایش فلاونوئیدها در *Ginkgo biloba* می‌شود، در حالی که در *Panax ginseng* نور کم تجمع متابولیت‌ها را افزایش می‌دهد. در زمینه مدیریت آبیاری، شواهد حاکی از آن است که کم‌آبی ملایم می‌تواند باعث افزایش فلاونوئیدها و ترکیبات فنولی شود، در حالی که خشکی شدید باعث کاهش عملکرد زیستی و افت کیفیت ترکیبات گزارش شده است. این یافته‌ها نشان می‌دهد که شدت و مدت تنش آبی عامل اصلی تفاوت نتایج است و مدیریت بهینه آبیاری برای بهبود کیفیت گیاهان دارویی ضروری است. همچنین عناصر معدنی نیز در تولید ترکیبات ثانویه نقش اساسی دارند. برای مثال، نیتروژن علاوه بر تقویت رشد رویشی و سنتز پروتئین، نقش مهمی در تولید ترکیبات

IL-6 پس از مسابقه شد و فعالیت آنزیم‌های سوپراکسید دیسموتاز و کاتالاز افزایش یافت (۴۵). در مطالعه‌ای دیگر، مصرف عصاره انگور با دوز ۳۰۰ میلی گرم در روز طی شش هفته در دوندگان استقامتی باعث افزایش ظرفیت آنتی اکسیدانی و کاهش کراتین کیناز پس از تمرین گردید (۴۶). اثر کورکومین نشان داد که مصرف ۴۰۰ میلی گرم کورکومین روزانه به مدت شش هفته سبب کاهش اینترلوکین-۶ و CRP در ورزشکاران استقامتی گردید، هرچند دوزهای بالاتر از یک گرم در روز گاهی موجب بروز عوارض گوارشی خفیف شده‌اند که ضرورت تعیین محدوده ایمن و مؤثر را برجسته می‌کند. در مورد آستاگزانتین نیز گزارش شده است که مصرف روزانه ۱۲ میلی گرم به مدت هشت هفته در دوچرخه‌سواران استقامتی موجب افزایش زمان تا خستگی، کاهش لاکتات خون و بهبود اکسیداسیون چربی شده است (۴۷). در مقابل، نتایج مربوط به رزوراترول متناقض‌تر بوده است؛ برخی مطالعات افزایش ظرفیت آنتی اکسیدانی و کاهش التهاب را گزارش کرده‌اند، اما برخی دیگر تغییری در VO_2max مشاهده نکرده‌اند. چنین یافته‌هایی نشان می‌دهد که پاسخ به مکمل‌های گیاهی به نوع ترکیب، دوز مصرفی، مدت مداخله و نوع ورزش وابسته است و نمی‌توان نتیجه واحدی برای همه شرایط ارائه کرد. از نظر دوز و مدت استفاده، مطالعات نشان می‌دهد که دوزهای پایین تا متوسط اغلب مؤثرتر بوده‌اند، در حالی که مصرف بیش از حد آنتی اکسیدان‌ها می‌تواند موجب مهار سیگنالینگ وابسته به گونه‌های فعال اکسیژن شود؛ پدیده‌ای که با عنوان "هورمسیس" شناخته می‌شود. در واقع، گونه‌های فعال اکسیژن در مقادیر کنترل شده نقش پیام‌رسان در سازگاری‌های تمرینی دارند و حذف کامل آن‌ها ممکن است پاسخ تمرینی را تضعیف کند. از سوی دیگر، برای مشاهده اثرات معنی‌دار معمولاً مصرف مکمل‌ها باید حداقل چهار تا هشت هفته ادامه یابد، زیرا مدت استفاده کوتاه‌مدت‌تر غالباً تغییرات قابل توجهی نشان نداده‌اند. در زمینه تفاوت میان ورزش‌های هوازی و بی‌هوازی نیز الگوهای جالبی مشاهده شده است. در ورزش‌های استقامتی مانند دو ماراثن و دوچرخه‌سواری، مصرف ترکیبات آنتی اکسیدانی به‌طور مکرر موجب بهبود ظرفیت آنتی اکسیدانی، کاهش تجمع لاکتات و افزایش VO_2max شده است. در حالی که در فعالیت‌های

بی‌هوازی نظیر تمرینات مقاومتی و وزنه‌برداری، اثرات بیشتر در کاهش التهاب و آسیب عضلانی دیده شده است تا در بهبود مستقیم عملکرد. علت احتمالی این تفاوت آن است که منبع تولید گونه‌های فعال اکسیژن و نوع سازگاری‌های فیزیولوژیکی در این دو نوع ورزش متفاوت است؛ تمرینات هوازی بیشتر با گونه‌های فعال اکسیژن میتوکندریایی و سازگاری‌های اکسیداتیو در ارتباط‌اند، اما تمرینات بی‌هوازی عمدتاً با آسیب مکانیکی عضله و پاسخ‌های التهابی همراه هستند. از این‌رو، مکمل‌های گیاهی ممکن است در هر نوع ورزش اثر متمایزی ایجاد کنند. نکته بدیع در این مطالعه، تأکید بر پیوند میان ویژگی‌های زراعی گیاهان دارویی و اثرات فیزیولوژیک آن‌ها در بدن ورزشکاران است. شرایط کشت و خاک می‌تواند به‌طور مستقیم بر ترکیب متابولیت‌های ثانویه گیاه تأثیر بگذارد؛ برای نمونه، کاهش نیتروژن خاک موجب افزایش سنتز فلاونوئیدها و در نتیجه فعال‌سازی قوی‌تر مسیر Nrf2 می‌شود، در حالی که افزایش شدت نور خورشید می‌تواند محتوای رزوراترول در انگور را افزایش داده و اثرات آنتی اکسیدانی آن را تقویت کند. همچنین تأمین کافی گوگرد در خاک به افزایش ترکیبات گوگرددار با خاصیت ضدالتهابی منجر می‌شود. در این چارچوب می‌توان مسیر یکپارچه‌ای را ترسیم کرد که از شرایط زراعی آغاز شده، بر متابولیت‌های فعال گیاه اثر می‌گذارد، سپس از طریق مسیرهای مولکولی نظیر Nrf2 و NF- κ B در بدن ورزشکار عمل کرده و در نهایت به بهبود شاخص‌های فیزیولوژیکی و عملکردی ختم می‌شود. چنین دیدگاهی می‌تواند نقطه اتصال میان علوم گیاه پزشکی، بیوشیمی گیاهی و فیزیولوژی ورزشی را شکل دهد. در مجموع، می‌توان گفت که مکمل‌های گیاهی با فعال‌سازی مسیرهای Nrf2/Keap1، NF- κ B و MAPK و با تعدیل شاخص‌های آنتی اکسیدانی و التهابی، توانایی بهبود عملکرد ورزشی و تسریع ریکاوری را دارند. شواهد بالینی نشان می‌دهد که نوع ورزش، دوز، مدت مصرف نقش تعیین‌کننده‌ای در میزان اثربخشی دارند. افزون بر این، شرایط زراعی گیاهان دارویی از طریق تغییر در متابولیت‌های فعال می‌تواند به‌طور غیرمستقیم اما قابل توجه بر اثرات فیزیولوژیک مکمل‌ها در ورزشکاران تأثیر بگذارد. بنابراین، برای دستیابی به درک جامع و کاربردی از اثرات این ترکیبات، ضروری است که

این، هنوز پرسش‌های مهمی بی‌پاسخ مانده است؛ از جمله تعیین دوز و مدت مصرف بهینه برای هر گیاه، بررسی اثرات هم‌زمان چند گیاه بر عملکرد ورزشی، و مطالعه تفاوت پاسخ‌ها در میان ورزشکاران با رشته‌ها و شرایط تمرینی گوناگون. انجام پژوهش‌های آینده در این زمینه می‌تواند به طراحی مکمل‌های هدفمندتر و تدوین دستورالعمل‌های کاربردی برای مربیان، ورزشکاران و متخصصان تغذیه کمک کند. در نهایت، می‌توان نتیجه گرفت که تلفیق مدیریت دقیق کشاورزی با دانش تغذیه ورزشی، رویکردی نوین و چندبُعدی برای ارتقای سلامت و توانمندی ورزشکاران فراهم می‌آورد؛ رویکردی که ظرفیت دارد هم در سطح علمی و هم در سطح عملی، به توسعه مکمل‌های طبیعی و استراتژی‌های بهبود عملکرد ورزشی کمک کند.

تعارض منافع

نویسندگان هیچ‌گونه تعارض منافع ندارند.

پژوهش‌های آینده با دیدگاه میان‌رشته‌ای و طراحی بالینی دقیق‌تر انجام شوند تا پیوند میان کشاورزی، بیوشیمی گیاهی و فیزیولوژی ورزشی به‌صورت علمی و نظام‌مند برقرار گردد.

نتیجه‌گیری

بررسی حاضر نشان داد که عوامل اکولوژیکی و تغذیه‌ای گیاهان دارویی - مانند نوع خاک، شدت نور، شرایط آبیاری و دسترسی به عناصر معدنی بر کیفیت و میزان ترکیبات ثانویه اثر می‌گذارند و این تغییرات مستقیماً می‌توانند بر کارایی فیزیولوژیک ورزشکاران اثر بگذارند. شواهد علمی حاکی از آن است که گیاهانی مانند انار و انگور به دلیل غنای ترکیبات فنولی و آنتی‌اکسیدانی، موجب بهبود استقامت، تسریع بازتوانی و کاهش استرس اکسیداتیو در ورزشکاران شده است. از این منظر، توجه به راهبردهای بهینه زراعی نه تنها کیفیت دارویی گیاهان را ارتقا می‌دهد، بلکه می‌تواند جایگاه آن‌ها را به‌عنوان مکمل‌های ورزشی ایمن و اثربخش تثبیت کند. با وجود

References

1. Ribeiro GdJG, De Souza EE, Palmisano G, Durigon EL, Liebau E, Wrenger C. Plant-derivate extracts and natural products with antiviral activity. *Frontiers in Virology*. 2025;5:1632734.
2. Karalija E, Macanović A, Ibragić S. Revisiting Traditional Medicinal Plants: Integrating Multiomics, In Vitro Culture, and Elicitation to Unlock Bioactive Potential. *Plants*. 2025;14(13):2029.
3. Babar SS, Jawad Z, Ayub F, Khan MI. Principles of Drug Discovery from Plants. *Herbal Pharmacopeia*: CRC Press; 2025. p. 65-88.
4. Marconi GR, Osseer B, Osseer G, Miuța CC, Toth C, Ardelean VP, et al. Assessing nutritional knowledge and physical health among football players: A pilot study from three sports clubs in Western Romania. *Sports*. 2025;13(1):16.
5. Baydas G, Uca M, Nedzvetsky VS, Nedzvetsky V, Nedzvetsky V, et al. *Phytotherapy: Considerations for athletes and athletic trainers*. 2024.
6. Winterstein AP, Storrs CM. Herbal supplements: considerations for the athletic trainer. *Journal of athletic training*. 2001 Oct;36(4):425.
7. Özdemir K, Demir Y. Phenolic Compounds in Exercise Physiology: Dual role in oxidative stress and recovery adaptation. *Food Science & Nutrition*. 2025;13(8):e70714.
8. Volpe-Fix AR, de França E, Silvestre JC, Thomatieli-Santos RV. The use of some polyphenols in the modulation of muscle damage and inflammation induced by physical exercise: a review. *Foods*. 2023;12(5):916.
9. Sellami M, Slimeni O, Pokrywka A, Kuvačić G, D Hayes L, Milic M, et al. Herbal medicine for sports: a review. *Journal of the International Society of Sports Nutrition*. 2018;15(1):14.
10. Morgan MJ, Liu Z-g. Crosstalk of reactive oxygen species and NF-κB signaling. *Cell research*. 2011;21(1):103-15.

11. Prinsloo G, Nogemane N. The effects of season and water availability on chemical composition, secondary metabolites and biological activity in plants. *Phytochemistry Reviews*. 2018;17(4):889-902.
12. Pandey N. Role of plant nutrients in plant growth and physiology. *Plant nutrients and abiotic stress tolerance*: Springer; 2018. p. 51-93.
13. Shahraki SH, Javar FM, Jamali B, Sargazi F. Beneficial role of Coronatine on the morphological and physiological responses of Cress Plants (*Lepidium sativum*) exposed to Silver Nanoparticle. *Botanical Studies*. 2024;65(1):17.
14. Hashemi S, Asrar Z, Pourseyedi S, Nadernejad N. Investigation of ZnO nanoparticles on proline, anthocyanin contents and photosynthetic pigments and lipid peroxidation in the soybean. *IET Nanobiotechnology*. 2019;13(1):66-70.
15. Rengel Z. Availability of Mn, Zn and Fe in the rhizosphere. *Journal of soil science and plant nutrition*. 2015;15(2):397-409.
16. Prabhudev SH, Ravindra KN, Supreetha BH, Nithyanandha KR, Dharmappa KK, Giresha AS. Effect of soil pH on plants growth, phytochemical contents and their antioxidant activity. *Journal of advanced applied scientific research*. 2023 Sep 14;5(5).
17. Mudau HS, Mokoboki HK, Ravhuhali KE, Mkhize Z. Effect of soil type: Qualitative and quantitative analysis of phytochemicals in some browse species leaves found in savannah biome of South Africa. *Molecules*. 2022;27(5):1462.
18. Xu Y, Wang G, Cao F, Zhu C, Wang G, El-Kassaby YA. Light intensity affects the growth and flavonol biosynthesis of Ginkgo (*Ginkgo biloba* L.). *New forests*. 2014;45(6):765-76.
19. Mohd Yusof FF, Yaacob JS, Osman N, Ibrahim MH, Wan-Mohtar WAAQI, Berahim Z, et al. Shading effects on leaf gas exchange, leaf pigments and secondary metabolites of *Polygonum minus* Huds., an aromatic medicinal herb. *Plants*. 2021;10(3):608.
20. Takshak S, Agrawal Sá. Secondary metabolites and phenylpropanoid pathway enzymes as influenced under supplemental ultraviolet-B radiation in *Withania somnifera* Dunal, an indigenous medicinal plant. *Journal of Photochemistry and Photobiology B: Biology*. 2014;140:332-43.
21. Kapoor S, Raghuvanshi R, Bhardwaj P, Sood H, Saxena S, Chaurasia OP. Influence of light quality on growth, secondary metabolites production and antioxidant activity in callus culture of *Rhodiola imbricata* Edgew. *Journal of Photochemistry and Photobiology B: Biology*. 2018; 183:258-65.
22. Takshak S, Agrawal SB. Anatomical changes linked performance of two indigenous medicinal plants, *Withania Somnifera* Dunal and *Coleus Forskohlii* Briq. Exposed to Supplemental Ultraviolet-B Radiation. 2017.
23. Kumari R, Agrawal SB. Supplemental UV-B induced changes in leaf morphology, physiology and secondary metabolites of an Indian aromatic plant *Cymbopogon citratus* (DC) Stapf under natural field conditions. *International Journal of Environmental Studies*. 2010;67(5):655-75.
24. Chrysargyris A, Petropoulos SA, Tzortzakis N. Essential oil composition and bioactive properties of lemon balm aerial parts as affected by cropping system and irrigation regime. *Agronomy*. 2022;12(3):649.
25. Paul A, Acharya K, Chakraborty N. Involvement of phenylpropanoid pathway and shikimic acid pathway in environmental stress response. *Biology and biotechnology of environmental stress tolerance in plants*: Apple Academic Press; 2023. p. 27-66.
26. Maleki M, Shojaeiyan A, Mokhtassi-Bidgoli A. Differential responses of two fenugreek (*Trigonella foenum-graecum* L.) landraces pretreated with melatonin to prolonged drought stress and subsequent recovery. *BMC Plant Biology*. 2024;24(1):161.
27. Alinian S, Razmjoo J, Zeinali H. Flavonoids, anthocynins, phenolics and essential oil produced in cumin (*Cuminum cyminum* L.) accessions under different irrigation regimes. *Industrial Crops and Products*. 2016;81:49-55.
28. Bettaieb I, Zakhama N, Wannes WA, Kchouk ME, Marzouk B. Water deficit effects on *Salvia officinalis* fatty acids and essential oils composition. *Scientia horticulturae*. 2009;120(2):271-5.

29. Mosa KA, Ali MA, Ramamoorthy K, Ismail A. Exploring the relationship between plant secondary metabolites and macronutrient homeostasis. *Plant Nutrition and Food Security in the Era of Climate Change*: Elsevier; 2022. p. 119-46.
30. Li D, Zhang T, Yu H, Li Y, Lv T, Yu D, Liu C. The impacts of different nitrogen supply on root traits, root exudates, and soil enzyme activities of exotic and native plant communities. *Plant and Soil*. 2025 Mar;508(1):209-26.
31. Francioso A, Baseggio Conrado A, Mosca L, Fontana M. Chemistry and biochemistry of sulfur natural compounds: key intermediates of metabolism and redox biology. *Oxidative Medicine and Cellular Longevity*. 2020;2020(1):8294158.
32. Yokoyama R. Evolution of aromatic amino acid metabolism in plants: a key driving force behind plant chemical diversity in aromatic natural products. *Philosophical Transactions B*. 2024;379(1914):20230352.
33. Rawat J, Pandey N, Saxena J. Role of potassium in plant photosynthesis, transport, growth and yield. *Role of potassium in abiotic stress*. 2022;1-14.
34. Bell PG, McHugh MP, Stevenson E, Howatson G. The role of cherries in exercise and health. *Scandinavian journal of medicine & science in sports*. 2014;(3):477-90.
35. Zuzarte M, Girão H, Salgueiro L. Aromatic plant-based functional foods: A natural approach to manage cardiovascular diseases. *Molecules*. 2023;28(13):5130.
36. Arenas-Jal M, Suñé-Negre JM, Pérez-Lozano P, García-Montoya E. Trends in the food and sports nutrition industry: A review. *Critical reviews in food science and nutrition*. 2020;60(14):2405-21.
37. Miransari M, Adham S, Miransari M, Miransari AA. The effects of nutrients on the growth and quality of medicinal and aromatic plants, affecting athletic abilities. *Journal of Trace Elements and Minerals*. 2025;11:100205.
38. Tan JM. Maximizing athletic performance: The role of nutrition in elite sports. *Revista de Psicología del Deporte (Journal of Sport Psychology)*. 2024;33(2):129-38.
39. Ingegneri M, Smeriglio E, Zebbiche Y, Cornara L, Visalli L, Smeriglio A, et al. The dark side of "smart drugs": Cognitive enhancement vs. clinical concerns. *Toxics*. 2025;13(4):247.
40. Tang F, Yan H-L, Wang L-X, Xu J-F, Peng C, Ao H, et al. Review of natural resources with vasodilation: traditional medicinal plants, natural products, and their mechanism and clinical efficacy. *Frontiers in pharmacology*. 2021;12:627458.
41. Elejalde E, Villarán MC, Alonso RM. Grape polyphenols supplementation for exercise-induced oxidative stress. *Journal of the International Society of Sports Nutrition*. 2021;18(1):3.
42. Altanam SY, Darwish N, Bakillah A. Exploring the interplay of antioxidants, inflammation, and oxidative stress: mechanisms, therapeutic potential, and clinical implications. *Diseases*. 2025;13(9):309.
43. Nie W, Li J, Rajabi S. Molecular Mechanisms, Endurance athlete, and synergistic therapeutic effects of marine-derived antioxidant astaxanthin supplementation and exercise in cancer, metabolic diseases, and healthy individuals. *Food Science & Nutrition*. 2025;13(7):e70470.
44. Ma Y-T, Li C, Shen Y, You W-H, Han M-X, Mu Y-F, et al. Mechanisms of the JNK/p38 MAPK signaling pathway in drug resistance in ovarian cancer. *Frontiers in Oncology*. 2025;15:1533352.
45. Urbaniak A, Skarpańska-Stejnborn A. Effect of pomegranate fruit supplementation on performance and various markers in athletes and active subjects: A systematic review. *International Journal for Vitamin and Nutrition Research*. 2019.
46. de Lima Tavares Toscano L, Silva AS, de França ACL, de Sousa BRV, de Almeida Filho EJB, da Silveira Costa M, et al. A single dose of purple grape juice improves physical performance and antioxidant activity in runners: a randomized, crossover, double-blind, placebo study. *European journal of nutrition*. 2020;59(7):2997-3007.
47. Sciberras JN, Galloway SDR, Fenech A, Grech G, Farrugia C, Duca D, et al. The effect of turmeric (Curcumin) supplementation on cytokine and inflammatory marker responses following 2 hours of endurance cycling. *Journal of the International Society of Sports Nutrition*. 2015;12(1):5.