Sport. Physiol, 2025, 17(66): 17-33. DOI: 10.22089/spj.2025.18185.2380

Sport Physiology

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

Original Article

Changes of Cardiorespiratory Fitness and Oxidative Stress Following Q10 Supplementation Combined with High Intensity Interval Training in the Older Adults: A Randomized Double-Blind Clinical Trial

Navid Bagheri [1], Mehdi Kargarfard*[1], David Scott [2]

1. Department of Exercise Physiology, Faculty of Sport Sciences University of Isfahan, Isfahan, Iran
2. Department of Medicine, Faculty of Institute for Physical Activity and Nutrition, University of Deakin, Geelong, Australia

Received: 22-Jun-2025 | Accepted: 13-Sep-2025 | Online Published: 14-Sep-2025

*Corresponding Author: Mehdi Kargarfard, E-mail: m.kargarfard@spr.ui.ac.ir

How to Cite: Bagheri, N; Kargarfard, M; Scott, D. (2025). Changes of Cardiorespiratory Fitness and Oxidative Stress Following Q10 Supplementation Combined with High Intensity Interval Training in the Older Adults: A Randomized Double-Blind Clinical Trial. *Sport Physiology*, 17(66):17-33. (In Persian). Doi: 10.22089/spj.2025.18185.2380

Extended Abstract

Background and Purpose

Aging is characterized by a decline in antioxidant capacity and a concomitant rise in oxidative stress, which collectively contribute to cellular damage and the advancement of age-related disorders. High-intensity interval training (HIIT) has been demonstrated to enhance antioxidant defenses by upregulating enzymatic activity and improving mitochondrial function. However, the excessive reactive oxygen species (ROS) produced during intense exercise may exert adverse effects. Coenzyme Q10 (CoQ10), a vital endogenous antioxidant integral to mitochondrial electron transport and energy metabolism, also diminishes with age, potentially heightening susceptibility to oxidative damage. While the independent benefits of HIIT and CoQ10 supplementation have been established, their combined effects in older populations remain underexplored. This study aimed to evaluate whether CoQ10 supplementation potentiates antioxidant adaptations and aerobic capacity in response to HIIT among older adults.

Materials and Methods

This randomized, double-blind, placebo-controlled clinical trial with a semi-experimental pretest-posttest design enrolled 38 healthy elderly individuals aged 65–75 years. Sample size calculation using G*Power 3.1 for repeated-measures ANOVA with interaction (power = 0.80, $\alpha = 0.05$, effect size f = 0.25) indicated 34 participants were required; four additional subjects accounted for potential attrition. Eligible participants were recruited via public announcements in Isfahan and randomly allocated into HIIT+CoQ10 or HIIT+Placebo groups (n = 19 per group; 8 women and 11 men in each). All participants were medically cleared and classified as sedentary based on

Copyright: © 2025 by the authors. Submitted for possible open access publication under the terms and conditions of the Creative Commons Attribution (CC BY) license (https://creativecommons.org/licenses/by/4.0/).

the Physical Activity Scale for the Elderly (PASE).Pre-intervention assessments included three 24-hour dietary recalls and PASE for physical activity. Cardiorespiratory fitness (VO_2peak) was assessed via the Astrand submaximal cycle ergometer test. Oxidative stress and antioxidant biomarkers—malondialdehyde (MDA), superoxide dismutase (SOD), glutathione peroxidase (GPX), and total antioxidant capacity (TAC)—were quantified using standardized commercial assay kits exhibiting acceptable intra- and inter-assay variability.The HIIT intervention spanned eight weeks, with thrice-weekly sessions comprising five one-minute bouts at 80–95% of maximum heart rate (HRmax), interspersed by one-minute active recovery, alongside warm-up and cool-down phases, totaling 15 minutes per session. Intensity was progressively increased in three phases: weeks 1–3 (80–85% HRmax), weeks 4–6 (85–90% HRmax), and weeks 7–8 (90–95% HRmax). Participants ingested 100 mg/day of CoQ10 or placebo softgels with lunch; supplements were indistinguishable to preserve blinding. Adherence was monitored by capsule count and weekly reminders.Ethical approval was obtained from the University of Isfahan Ethics Committee (IR.UI.REC.1403.018), and the trial was registered with the Iranian Registry of Clinical Trials (IRCT20240310061243N1).

Results

Repeated-measures ANOVA revealed significant main effects of group ($p = 0.048$), time ($p < 0.001$), and group × time interaction ($p < 0.001$) for VO_2peak. Both groups exhibited significant post-intervention enhancements in aerobic capacity; however, the HIIT+CoQ10 group showed a significantly greater increase compared to the HIIT+Placebo group. For MDA, a marker of oxidative stress, analyses displayed a significant main effect of time ($p < 0.001$) and a significant group × time interaction ($p < 0.001$), with no significant main effect of group ($p = 0.166$). The reduction in MDA was more pronounced in the CoQ10-supplemented group, reflecting attenuated lipid peroxidation.SOD levels demonstrated no significant group effect ($p = 0.325$), but significant effects for time ($p < 0.001$) and the interaction ($p < 0.001$), indicating increases in both groups, with a larger elevation in the CoQ10 group. GPX activity showed significant time ($p < 0.001$) and group × time interaction effects ($p < 0.001$), but no significant group effect ($p = 0.750$). Improvement occurred in both groups without significant between-group differences. TAC revealed similar patterns: significant time ($p < 0.001$) and interaction effects ($p < 0.001$), but no significant group effect ($p = 0.594$). TAC increased post-intervention in both groups, with greater gains in the CoQ10 group.In summary, although both HIIT interventions improved aerobic capacity and antioxidant defenses significantly, CoQ10 supplementation elicited augmented enhancements in VO_2peak and selected antioxidant biomarkers, indicating a synergistic effect on physiological adaptations relevant to oxidative stress and aerobic fitness in older adults.

Conclusion

This investigation demonstrated that an eight-week HIIT regimen markedly enhances aerobic capacity and antioxidant defenses in older adults. CoQ10 supplementation further amplified these benefits, evidenced by greater decreases in MDA and increases in SOD and TAC relative to placebo control. Although GPX activity improved with training, CoQ10 did not significantly influence this parameter. These findings corroborate existing evidence on HIIT benefits and highlight a synergistic interaction when combined with CoQ10. Given the decline in VO_2peak and antioxidant capacity associated with aging, this combined approach provides a promising intervention to mitigate age-related physiological deterioration. Incorporating targeted supplementation alongside structured exercise in geriatric health programs is thus supported.

Future studies should investigate dose-response relationships and long-term effects in older populations to optimize anti-aging strategies through lifestyle and nutritional interventions.

Key Words: High-Intensity Interval Training (HIIT), Coenzyme Q10, Aging, VO_2peak, Oxidative Stress

Article Message

considering the decline in aerobic capacity, elevated oxidative stress, and diminished antioxidant system efficiency with aging, a combined approach of supplementation and exercise training represents a scientifically grounded and effective strategy to counteract aging-related degeneration. The findings of this study may inform the design of future geriatric medicine, exercise, and clinical nutrition interventions.

Ethical Considerations

This study was approved by the Ethics Committee of the University of Isfahan (IR.UI.REC.1403.018), and it was registered in the Iranian Registry of Clinical Trials (IRCT) under the identifier IRCT20240310061243N1.

Authors' Contributions

All authors contributed equally to the development and finalization of this manuscript.

Conflict of Interest

The authors declare that this research was conducted without any funding. No conflicts of interest exist that could have influenced the results or interpretation.

Acknowledgments

We sincerely thank all the elderly participants for their cooperation during this study.

فیزیولوژی ورزشی، تابستان ۱۴۰۴، دوره ۱۷، شماره ۶۶، صص ۱۷-۳۳. DOI: 10.22089/spj.2025.18185.2380

فیزیولوژی ورزشی
وبگاه نشریه: https://spj.ssrc.ac.ir

مقاله پژوهشی

تغییرات استقامت قلبی‌تنفسی و نشانگرهای اکسیداتیو متعاقب مکمل‌یاری کوآنزیم Q10 در ترکیب با تمرین تناوبی با شدت بالا در سالمندان: یک کارآزمایی بالینی تصادفی دوسوکور

نوید باقری [۱]، مهدی کارگرفرد*[۱]، دیوید اسکات[۲]

۱. گروه فیزیولوژی ورزشی، دانشکده علوم ورزشی، دانشگاه اصفهان، اصفهان، ایران
۲. گروه پزشکی، دانشکده سلامت مؤسسه فعالیت بدنی و تغذیه، دانشگاه دیکین، جیلانگ، استرالیا

تاریخ دریافت: ۱۴۰۴/۰۴/۰۱ | تاریخ پذیرش: ۱۴۰۴/۰۶/۲۲ | تاریخ انتشار آنلاین: ۱۴۰۴/۰۶/۲۳

*نویسنده مسئول: مهدی کارگرفرد، ایمیل: m.kargarfard@spr.ui.ac.ir

نحوه ارجاع‌دهی: باقری، نوید؛ کارگرفرد، مهدی؛ اسکات، دیوید. (۱۴۰۴). تغییرات استقامت قلبی‌تنفسی و نشانگرهای اکسیداتیو متعاقب مکمل‌یاری کوآنزیم Q10 در ترکیب با تمرین تناوبی با شدت بالا در سالمندان: یک کارآزمایی بالینی تصادفی دوسوکور. فیزیولوژی ورزشی، ۱۷(۶۶): ۱۷-۳۳.

چکیده

هدف: با افزایش سن، کاهش عملکرد سیستم آنتی‌اکسیدانی و افزایش استرس اکسیداتیو منجر به افزایش خطر آسیب‌های سلولی و تسریع فرایند سالمندی می‌شود. کوآنزیم Q10 (CoQ10) به‌عنوان یک آنتی‌اکسیدان ممکن است با تقویت دفاع سلولی، سازگاری‌های ناشی از تمرینات شدید را بهبود بخشد؛ بر این اساس، پژوهش حاضر با هدف بررسی اثر مکمل‌یاری CoQ10 بر سازگاری دستگاه آنتی‌اکسیدانی ناشی از تمرینات تناوبی با شدت بالا (HIIT) در سالمندان انجام شد.

مواد و روش ها: در این مطالعه، ۳۸ سالمند (۲۲ مرد و ۱۶ زن، ۶۵ تا ۷۵ سال) به صورت داوطلبانه شرکت کردند و به طور تصادفی به دو گروه تمرین+مکمل CoQ10 و تمرین+پلاسبو تقسیم شدند. شاخص VO2peak و نشانگرهای استرس اکسیداتیو شامل مالون‌دی‌آلدئید (MDA)، سوپراکسید دیسموتاز (SOD)، گلوتاتیون پراکسیداز (GPX) و ظرفیت آنتی‌اکسیدانی کل (TAC)، پیش و پس از هشت هفته تمرین HIIT و مصرف روزانه ۱۰۰ میلی‌گرم مکمل یا دارونما اندازه‌گیری شدند.

یافته ها: نتایج نشان داد، گروه تمرین+مکمل بهبود معناداری را در VO₂peak (P<۰/۰۵) و شاخص‌های آنتی‌اکسیدانی [MDA (P<۰/۰۵)، SOD (P<۰/۰۵) و TAC (P<۰/۰۵)] در مقایسه با گروه پلاسبو نشان داد.

نتیجه گیری: براساس یافته‌ها، اثر هم‌افزای مکمل‌یاری CoQ10 با تمرینات HIIT موجب بهبود بیشتر ظرفیت قلبی‌تنفسی و سازگاری آنتی‌اکسیدانی در سالمندان می‌شود.

واژگان کلیدی: تمرینات تناوبی با شدت بالا، کوآنزیم Q10، سالمندی، VO2peak، استرس اکسیداتیو

مقدمه

سالمندی فرایند زیستی پیچیده و اجتناب‌ناپذیری است که با تغییرات گسترده‌ای در سطوح سلولی، بافتی و سیستم‌های بدن همراه است (۱). این تغییرات منجر به کاهش تدریجی عملکردهای فیزیولوژیکی و افزایش آسیب‌پذیری در برابر

Copyright: © 2025 by the authors. Submitted for possible open access publication under the terms and conditions of the Creative Commons Attribution (CC BY) license (https://creativecommons.org/licenses/by/4.0/).

بیماری‌های مختلف می‌شود (۲). در سالمندان، شیوع بیماری‌های مزمن مانند بیماری‌های قلبی‌عروقی (۳)، اختلالات متابولیک (۴) و کاهش توده و عملکرد عضلات اسکلتی (سارکوپنیا) به‌طور چشمگیری افزایش می‌یابد (۵). این بیماری‌ها نه‌تنها بر کیفیت زندگی تأثیر می‌گذارند، بلکه فشار درخورتوجهی بر سیستم‌های مراقبت سلامت نیز وارد می‌کنند (۶). درک مکانیسم‌های زیربنایی این تغییرات نقش مهمی در طراحی مداخلات مؤثر در جهت ارتقای سلامت سالمندان دارد. یکی از مهم‌ترین مکانیسم‌هایی که در سالمندی و بیماری‌های مرتبط با آن نقش دارد، استرس اکسیداتیو است. استرس اکسیداتیو از نظر فیزیولوژیک به وضعیتی گفته می‌شود که در آن تعادل بین تولید گونه‌های فعال اکسیژن (ROS)[1] و ظرفیت سیستم‌های آنتی‌اکسیدانی بدن مختل می‌شود. ROS مولکول‌هایی ناپایدار و بسیار واکنش‌پذیر هستند که به صورت طبیعی در طی فرایندهای متابولیک مانند تنفس میتوکندریایی تولید می‌شوند (۷). از نظر فیزیولوژیک، این مولکول‌ها در تنظیم سیگنال‌های درون‌سلولی و فرایندهای ایمنی نقش دارند، اما افزایش بیش‌ازحد آن‌ها می‌تواند موجب آسیب به لیپیدها، پروتئین‌ها، دی ان ای[2] و دیگر ساختارهای سلولی شود (۸). یکی از پیامدهای مهم استرس اکسیداتیو، فعال‌سازی مسیرهای التهابی و القای سالمندی سلولی است. سلول‌های سالمند نه‌تنها توانایی تقسیم و بازسازی خود را از دست می‌دهند، بلکه مولکول‌های التهابی ترشح می‌کنند و موجب اختلال عملکرد بافتی نیز می‌شوند. در چنین وضعیتی، حالتی با عنوان «التهاب مرتبط با افزایش سن»[3] ایجاد می‌شود (۹) که زمینه‌ساز بروز بسیاری از بیماری‌های مزمن وابسته به سن می‌شود (۱۰). از سوی دیگر، با افزایش سن، کارایی سیستم‌های آنتی‌اکسیدانی بدن اعم از آنزیمی مانند سوپراکسید دیسموتاز (SOD)[4]، گلوتاتیون پراکسیداز (GPX)[5] و کاتالاز (CAT)[6] و غیرآنزیمی مثل ویتامین‌ها، فلاونوئیدها[7]، مواد معدنی و ترکیبات گوگرددار کاهش می‌یابد (۱۲، ۱۱) که این مسئله خود می‌تواند موجب تشدید آسیب‌های ناشی از استرس اکسیداتیو شود (۱۳). در این میان، دو مداخله مؤثر در بهبود وضعیت تعادل اکسیداتیو بدن، فعالیت بدنی منظم و تغذیه مناسب است (۱۴).

مطالعات نشان داده‌اند که فعالیت ورزشی از طریق تحریک آنزیم‌های آنتی‌اکسیدانی و بهبود عملکرد میتوکندری نقش مهمی در کاهش استرس اکسیداتیو ایفا می‌کند (۱۵)؛ به طور ویژه، تمرینات تناوبی با شدت بالا (HIIT)[8] به‌عنوان یک روش تمرینی کارآمد می‌توانند در کوتاه‌مدت منجر به بهبود ظرفیت هوازی شوند (۱۶) که با افزایش گذرای ROS همراه است. این افزایش موقت، در بلندمدت موجب سازگاری مثبت دستگاه آنتی‌اکسیدانی می‌شود (۱۸، ۱۷). در برخی مطالعات، کاهش استرس اکسیداتیو با افزایش فعالیت آنزیم‌های آنتی‌اکسیدانی ناشی از تمرینات HIIT در سالمندان مشاهده شده است (۱۹)؛ با این حال، مطالعه دیگری افزایش سطوح مالون دی آلدئید (MDA)[9] به‌عنوان نشانگر استرس

1. Reactive Oxygen Species
2. DNA
3. Inflammaging
4. Superoxide Dismutase
5. Glutathione Peroxidase
6. Catalase
7. Flavonoids
8. High-Intensity Interval Training
9. Malondialdehyde

اکسیداتیو را در پاسخ به تمرینات HIIT در سالمندان نشان داد (۲۰). به طور کلی، اگرچه این شیوه تمرینی می‌تواند اثر مثبت بر ظرفیت آنتی‌اکسیدانی و استرس اکسیداتیو داشته باشد، تمرینات با شدت یا حجم بسیار بالا ممکن است با افزایش شدید در ROSها منجر به ایجاد استرس اکسیداتیو شود (۲۱). در کنار این تمرینات، استفاده از موادغذایی دارای خاصیت آنتی‌اکسیدانی نیز می‌تواند در تنظیم استرس اکسیداتیو مؤثر باشد (۲۲).

کوآنزیم کیوتن (CoQ10)[1] یکی از مهم‌ترین آنتی‌اکسیدان‌های غیرآنزیمی درون‌زاد است که نقش کلیدی در زنجیره انتقال الکترون در میتوکندری و تولید انرژی ایفا می‌کند (۱۴). همچنین این ترکیب با کاهش تولید ROSها به حفظ سلامت سلولی و کاهش فرایند سالمندی کمک می‌کند؛ با این حال، غلظت CoQ10 با افزایش سن کاهش می‌یابد (۲۳) که می‌تواند با افزایش حساسیت به استرس اکسیداتیو و کاهش توان بازیابی سلولی همراه باشد (۲۴).

برخی پژوهش‌ها اثر مثبت مصرف مکمل CoQ10 را بر افزایش فعالیت آنزیم‌های آنتی‌اکسیدانی، کاهش التهاب و بهبود عملکرد متابولیکی در سالمندان نشان داده‌اند (۲۵). مصرف مکمل CoQ10 همراه با تمرین ممکن است اثری دوگانه ایجاد کند؛ به صورتی که با کاهش اثرات حاد ROSها ناشی از تمرین، سازگاری با تمرین را کاهش می‌دهد (۲۶) یا با بهبود عملکرد میتوکندریایی، سازگاری با تمرین را افزایش می‌دهد (۲۷، ۲۵)؛ این در حالی است که بررسی تداخل یا هم‌افزایی احتمالی این دو مداخله می‌تواند به درک بهتر پاسخ‌های سازگارانه بدن در برابر استرس اکسیداتیو کمک کند. طبق کاوش پژوهشگر، پژوهش‌ها در زمینه اثر هم‌زمان این مکمل و تمرینات ورزشی، به‌ویژه در سالمندان محدود است؛ بر این اساس، هدف پژوهش حاضر، بررسی تأثیر هشت هفته تمرین تناوبی با شدت بالا به همراه مصرف مکملCoQ10 بر ظرفیت VO2peak، به‌عنوان شاخص ظرفیت هوازی و سطوح SOD، GPX، وضعیت آنتی‌اکسیدانی کل (TAC) و MDA به‌عنوان شاخص استرس اکسیداتیو، در سالمندان سالم بود.

روش پژوهش

پژوهش حاضر، کارآزمایی بالینی تصادفی دوسوکور با طرح پیش‌آزمون-پس‌آزمون و نوع پژوهش نیمه‌تجربی و کاربردی بود که روی سالمندان سالم انجام شد. تعیین حجم نمونه موردنیاز با استفاده از نرم‌افزار G*Power نسخه ۳.۱ و براساس طراحی آماری تحلیل واریانس با اندازه‌گیری مکرر با تعامل درون‌گروهی و بین‌گروهی انجام شد. با فرض توان آزمون ۸۰ درصد (۱ - β)، سطح معناداری ۰/۰۵ و اندازه اثر بزرگ (f(V) =۰/۲۵)، حجم نمونه برابر با ۳۴ نفر برآورد شد. با در نظر گرفتن احتمال ریزش آزمودنی‌ها، ۱۰ درصد (معادل ۴ نفر) به حجم نمونه افزوده شد. درمجموع، ۳۸ سالمند (بازه سنی ۶۵ تا ۷۵ سال) به روش نمونه‌گیری دردسترس انتخاب شدند. شرکت‌کنندگان به صورت تصادفی به دو گروه مساوی شامل گروه تمرین تناوبی با شدت بالا همراه با مکمل کوآنزیم Q10 (گروه HIIT+CoQ10؛ ۸ زن و ۱۱ مرد) و گروه تمرین تناوبی با شدت بالا همراه با دارونما (P)[2] (گروهHIIT+P؛ ۸ زن و ۱۱ مرد) تقسیم شدند. تمام شرکت‌کنندگان از نظر پزشکی سالم بودند و براساس نمرات به‌دست‌آمده از مقیاس فعالیت بدنی سالمندان (PASE)[3]، سبک زندگی

1. Coenzyme Q10
2. Placebo
3. Physical Activity Scale for the Elderly

کم‌تحرک داشتند (۲۸). فرایند جذب شرکت‌کنندگان از طریق انتشار آگهی در شبکه‌های اجتماعی و اطلاع‌رسانی در پارک‌های سطح شهر اصفهان انجام شد. شرکت‌کنندگان پس از توضیح حضوری درباره پژوهش و مراحل انجام آزمون‌ها، پرسشنامه وضعیت سلامت و سابقه فعالیت بدنی را تکمیل کردند که شامل اطلاعاتی درباره وضعیت بیماری‌ها، سطح فعالیت بدنی طی شش ماه گذشته، ساعات خواب (حداقل ۸ تا ۹ ساعت در هر شبانه‌روز) و مصرف مکمل یا داروها بود. معیارهای خروج آزمودنی‌ها از مطالعه شامل غیبت بیش از سه جلسه تمرینی، مصرف کمتر از حد مجاز مکمل، به طوری که بیش از شش کپسول در بسته‌های مکمل و دارونما پس از پایان مداخله باقی بماند، بروز هرگونه بیماری یا درد در طول دوره مداخله و اعلام تمایل نداشتن به ادامه همکاری توسط شرکت‌کننده بود. در صورت وقوع هریک از این معیارها، فرد از فرایند مطالعه حذف شد.

ارزیابی‌های تغذیه و فعالیت بدنی

میزان دریافت انرژی و درشت‌مغذی‌ها با استفاده از پرسشنامه یادآمد غذایی ۲۴ ساعته در سه روز (شامل یک روز تعطیل و دو روز غیر متوالی در طول هفته) در ابتدای مطالعه ثبت شد. سطح فعالیت بدنی روزانه نیز با مقیاس فعالیت بدنی سالمندان (PASE) ارزیابی شد (۲۹). سپس مقادیر مصرفی هر درشت مغذی با استفاده از نرم‌افزار Caltivita برآورد شد.

ارزیابی آمادگی قلبی‌تنفسی

برای سنجش ظرفیت قلبی‌تنفسی، از آزمون زیربیشینه آستراند[1] روی ارگومتر مونارک[2] استفاده شد (۳۰). این آزمون در نوبت صبح و پس از صرف صبحانه انجام گرفت. برای اجرای آزمون، ابتدا یک دوره گرم کردن کوتاه برای آمادگی آزمودنی در نظر گرفته شد. همچنین دوچرخه ثابت متناسب با قد و وضعیت راحتی شرکت‌کننده (تنظیم ارتفاع زین و فرمان) تنظیم شد. سپس رکاب زدن در یک سطح ثابت به مدت ۶ دقیقه ادامه یافت. در طول آزمون، ضربان قلب در فواصل منظم (معمولاً هر دقیقه) ثبت شد و در صورت افزایش بیش‌ازحد ضربان قلب نسبت به محدوده هدف، شدت کاهش داده شد تا حالت زیربیشینه حفظ شود.

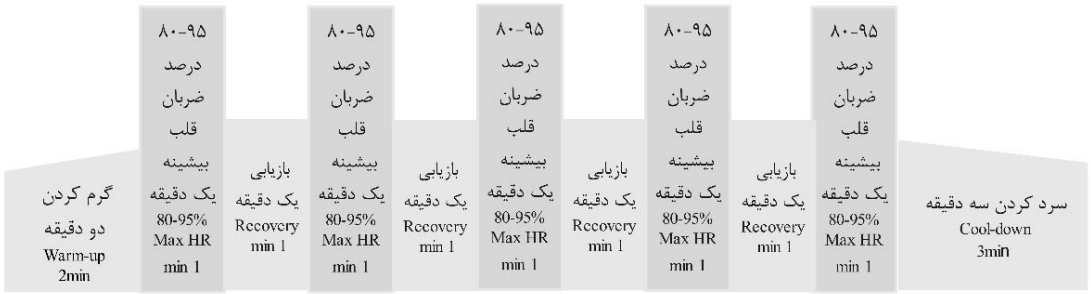
شاخص‌های آنتی‌اکسیدانی

برای ارزیابی استرس اکسیداتیو و وضعیت آنتی‌اکسیدانی، سطوح برخی از نشانگرهای بیوشیمیایی اندازه‌گیری شد. به طور مشخص، به‌منظور سنجش استرس اکسیداتیو، سطح مالون‌دی‌آلدئید (MDA) به‌عنوان شاخص پراکسیداسیون لیپیدی با ضریب تغییرات درون‌آزمایشی ۷/۶ درصد و بین‌آزمایشی ۵/۵ درصد اندازه‌گیری شد. برای بررسی وضعیت دفاع آنتی‌اکسیدانی، غلظت سوپراکسید دیسموتاز (SOD) با ضریب تغییرات درون‌آزمایشی ۹/۵ درصد و بین‌آزمایشی ۶ درصد، گلوتاتیون پراکسیداز (GPX) با ضریب تغییرات درون‌آزمایشی ۷/۶ درصد و بین‌آزمایشی ۲/۵ درصد و ظرفیت آنتی‌اکسیدانی کل (TAC) با ضریب تغییرات درون‌آزمایشی ۷/۳ درصد و بین‌آزمایشی ۵/۲ درصد با استفاده از کیت‌های استاندارد تجاری شرکت نوند سلامت اندازه‌گیری شد.

1. Astrand Sub-Maximal Cycle Test
2. Monark

روش اجرا

ابتدا شرکت‌کنندگان در سه جلسه آزمون اولیه شرکت کردند: در روز نخست، پرسشنامه‌ها تکمیل شد؛ در روز دوم، آزمون حداکثر اکسیژن مصرفی (VO2peak) انجام شد؛ در روز سوم، نمونه‌گیری خون صورت گرفت. نمونه‌گیری خون در شرایط ناشتایی در ساعت ۷ تا ۸ صبح پس از ده ساعت ناشتایی انجام شد. نمونه‌ها در لوله‌های آزمایشی مخصوص جمع‌آوری شده و در دمای یخچال (۴ درجه سانتی گراد) نگهداری شدند و پس از انتقال به آزمایشگاه بررسی شدند. براساس دستورالعمل‌های مطالعه رجیک[1] و همکاران (۳۱)، پروتکل تمرین تناوبی با شدت بالا و حجم کم طراحی شد و به مدت هشت هفته و سه جلسه در هفته اجرا شد. تمرینات روی دوچرخه‌های ارگومتر الکترونیکی انجام گرفت. هر جلسه شامل مراحل دو دقیقه گرم کردن و پنج نوبت تمرین با شدت بالا به مدت ۱ دقیقه (با شدتی بین ۸۰ تا ۹۵ درصد ضربان قلب بیشینه فردی) بود که با ۱ دقیقه ریکاوری فعال با شدت پایین بین هر نوبت همراه بود. در پایان، شرکت‌کنندگان سه دقیقه سرد کردن انجام دادند (شکل ۲). مدت هر جلسه تمرینی ۱۵ دقیقه بود. شدت تمرینات به صورت تدریجی در طول دوره افزایش یافت؛ به طوری که هفته‌های اول تا سوم، شدت ۸۰ تا ۸۵ درصد ضربان قلب بیشینه، هفته‌های چهارم تا ششم، شدت ۸۵ تا ۹۰ درصد ضربان قلب بیشینه و هفته‌های هفتم و هشتم، شدت ۹۰ تا ۹۵ درصد ضربان قلب بیشینه بود. جلسات تمرینی در بازه زمانی ۷:۳۰ تا ۱۰:۳۰ صبح برگزار شدند.



شکل ۱- پروتکل تمرین در طول هشت هفته

Figure 1- Training protocol over the eight-week period

مکمل‌یاری با CoQ10 و دارونما

در هر دو گروه، شرکت‌کنندگان روزانه یک عدد سافت‌ژل مکمل یا دارونما را همراه با وعده ناهار مصرف کردند. مقدار دوز تجویزی کوآنزیم Q10 برای هر شرکت‌کننده ۱۰۰ میلی‌گرم در روز بود (۳۴-۳۲). شرکت‌کنندگان از طریق پیامک، یادآوری‌هایی درباره زمان مصرف مکمل دریافت کردند و در پایان دوره، بسته‌های مصرف‌شده و باقیمانده را تحویل دادند. دارونما کپسول‌های سافت‌ژل حاوی ترکیبات غیرفعال شامل گلیسرول و گلیسرین و آب مقطر بود (placebo) که از نظر شکل، رنگ، اندازه و بسته‌بندی کاملاً مشابه با مکمل CoQ10 طراحی و تولید شده بود (۳۵). بسته‌بندی دارونما نیز با

1. Reljic

مکمل اصلی یکسان بود تا فرایند مطالعه به‌صورت دوسوکور حفظ شود. شایان ذکر است، شرکت‌کنندگان و محققان از مصرف دارونما یا مکمل اصلی مطلع نبودند.

تجزیه و تحلیل آماری

تحلیل آماری با استفاده از نرم‌افزار SPSS نسخه ۲۶ انجام شد. نرمال بودن توزیع داده‌ها با آزمون شاپیرو-ویلک بررسی شد. برای بررسی یکنواختی و همگنی اولیه بین دو گروه، آزمون لون به کار رفت. به‌منظور بررسی اثر مداخله در دو گروه، از آزمون تحلیل واریانس با اندازه‌گیری مکرر استفاده شد. در صورت معنادار بودن نتایج، آزمون تعقیبی توکی برای بررسی تفاوت‌های زوجی به کار رفت.

نتایج

مشخصات اولیه افراد شرکت‌کنندگان در این مطالعه به تفکیک گروه در جدول (۱) نشان داده شده است.

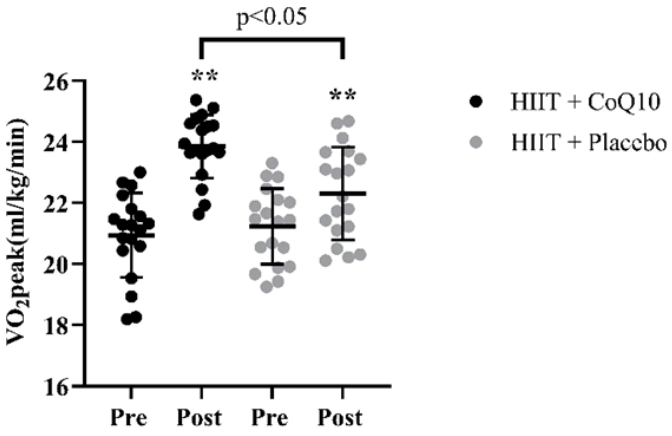
جدول ۱- مشخصات جمعیت‌شناختی شرکت‌کنندگان به تفکیک گروه‌ها

Table 1- Participant demographics by group

HIIT+placebo	HIIT+CoQ10	متغیر | Variable
70.00±4.137	69.21± 4.57	سن (سال) | Age (year)
11	11	تعداد | n مرد | Male
8	8	زن | Female
161.97±8.03	162.74±10.20	قد (سانتی‌متر) | Height (cm)
70.88±9.12	70.61±8.80	وزن (کیلوگرم) | Weight (kg)
27.23±4.14	26.98±4.95	شاخص توده بدنی (کیلوگرم بر مترمربع) | BMI (kg/m^2)

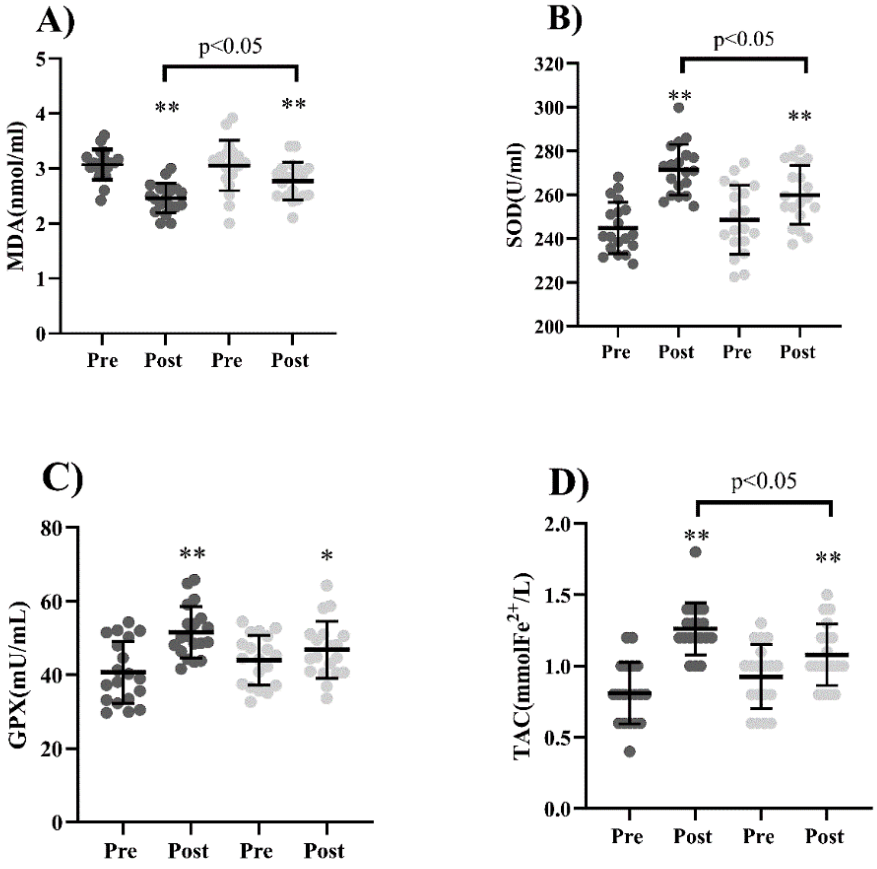
نتایج آزمون تحلیل واریانس سه‌طرفه مخلوط نشان داد، تعامل معناداری بین زمان، گروه و جنسیت برای هیچ‌یک از متغیرهای اندازه‌گیری‌شده وجود نداشت (P>۰/۰۵)؛ یعنی تأثیر مداخله در طول زمان بین مردان و زنان در گروه‌های مختلف تفاوت معناداری نداشت.

با توجه به تحلیل آماری داده‌های این مطالعه، در متغیر VO2peak، اثر گروه (P=۰/۰۴۸) و اثر آزمون (P<۰/۰۰۱) و اثر تعاملی گروه در آزمون (P<۰/۰۰۱) معنادار بود. با کمک آزمون تعقیبی توکی، نتایج مطابق شکل (۳) به دست آمد. تحلیل آماری نشانگر استرس اکسیداتیو MDA بیانگر اثر گروه (P=۰/۱۶۶)، اثر آزمون (P<۰/۰۰۱) و اثر تعاملی گروه در آزمون (P<۰/۰۰۱) بود که با کمک آزمون تعقیبی توکی نتایج مطابق شکل (A۴) به دست آمد. در نشانگر آنتی‌اکسیدانی SOD، اثر گروه (P=۰/۳۲۵)، اثر آزمون (P<۰/۰۰۱) و اثر تعاملی گروه در آزمون (P<۰/۰۰۱) بود که با کمک آزمون تعقیبی توکی نتایج مطابق شکل (B۴) به دست آمد. در نشانگر آنتی‌اکسیدانی GPX، اثر گروه (P=۰/۷۵۰)، اثر آزمون (P<۰/۰۰۱) و اثر تعاملی گروه در آزمون (P<۰/۰۰۱) بود که با کمک آزمون تعقیبی توکی نتایج مطابق شکل (C۴) به دست آمد. به‌علاوه، تحلیل متغیر TAC نشان داد، اثر گروه (P=۰/۵۹۴)، اثر آزمون (P<۰/۰۰۱) و اثر تعاملی گروه در آزمون (P<۰/۰۰۱) بود که با کمک آزمون تعقیبی توکی نتایج در شکل (D۴) به دست آمد.



شکل ۲- مقایسه تغییرات اکسیژن مصرفی اوج بین دو گروه در پیش‌آزمون و پس‌آزمون. (** معناداری در سطح P<۰/۰۰۱)

Figure 2- Comparison of changes in peak oxygen consumption (VO_2peak) between the two groups at pre-test and post-test. (**indicates significance at P<0.001)



شکل ۳- مقایسه تغییرات مالون دی آلدهید (A)، سوپراکسید دیسموتاز (B)، گلوتاتیون پراکسیداز (C) و ظرفیت انتی اکسیدانی کل (D) بین دو گروه در پیش‌آزمون و پس‌آزمون. (* معناداری در سطح P<۰/۰۵؛ ** معناداری در سطح P<۰/۰۰۱)

Figure 3- Comparison of changes in MDA (A), SOD (B), GPX (C), and TAC (D) between the two groups at pre-test and post-test. (*indicates significance at P<0.05, and ** indicates significance at P<0.001)

بحث و نتیجه‌گیری

هدف این پژوهش، بررسی تأثیر مکمل‌یاری CoQ10 بر وضعیت اکسیداتیو ناشی از هشت هفته تمرین تناوبی با شدت بالا (HIIT) در سالمندان بود. نتایج نشان داد، هر دو گروه تمرینی بهبود معناداری در VO_2peak در مقایسه با پیش‌آزمون داشتند؛ با این حال، میزان این بهبود در گروه HIIT+CoQ10 به طور معناداری بیشتر از گروه HIIT+P بود. این یافته حاکی از آن است که اجرای تمرین HIIT به مدت هشت هفته، تأثیر مثبت بر استقامت قلبی‌تنفسی سالمندان دارد و مصرف CoQ10 می‌تواند به‌عنوان عاملی تقویت‌کننده به افزایش VO_2peak کمک کند.

در این مطالعه، بررسی نشانگرهای استرس اکسیداتیو، کاهش معنادار MDA در گروه HIIT+CoQ10 را در مقایسه با گروه HIIT+P نشان داد که می‌تواند ناشی از مصرف این مکمل باشد. همچنین سطح آنزیم‌های آنتی‌اکسیدانی SOD و TAC در هر دو گروه افزایش یافت و مصرف مکمل CoQ10 موجب افزایش بیشتر این دو نشانگر آنتی‌اکسیدانی شد؛ در حالی که سطح GPX تنها در مقایسه با پیش‌آزمون افزایش یافت و مصرف مکمل CoQ10 تأثیر معناداری بر سطوح آن نداشت.

یافته‌های پژوهش حاضر با نتایج پژوهش‌های پیشین که تأثیر مثبت HIIT بر VO_2peak سالمندان را گزارش کردند (۳۶)، همسوست. همچنین در مطالعه‌ای مروری که به مقایسه این شیوه تمرینی با تمرینات تداومی با شدت متوسط پرداخته بود، تمرین HIIT به‌عنوان روشی مؤثرتر در بهبود VO_2max معرفی شد (۳۷). در مطالعه مروری نظام‌مند دیگری که به مقایسه سازگاری بدن با تمرین HIIT و تمرین تداومی با شدت متوسط تا زیاد در زنان پرداخته بود، تفاوت معناداری بین دو شیوه مشاهده نشد؛ با این حال، نتایج نشان داد با افزایش سن، پاسخ به تمرین در جهت بهبود VO_2max کاهش می‌یابد (۳۸).

همسو با مطالعه حاضر، شواهد اخیر نشان می‌دهند که ترکیب تمرینات تناوبی با شدت بالا (HIIT) و مصرف CoQ10 می‌تواند بهبود معناداری در ظرفیت هوازی و عملکرد قلبی‌تنفسی در سالمندان ایجاد کند. مطالعه‌ای در سال ۲۰۲۵ روی مدل حیوانی نشان داد، ترکیب HIIT با مکمل CoQ10 منجر به کاهش آستانه لاکتات، بهبود پارامترهای گازهای خونی (pO_2، pCO_2) و افزایش ظرفیت انتقال اکسیژن شد. این نتایج حاکی از بهبود تعادل اسید-باز و کاهش استرس متابولیک در طول تمرینات شدید بود (۳۹). علاوه بر این، مطالعه‌ای در سال ۲۰۲۲ نشان داد، مصرف روزانه ۲۰۰ میلی‌گرم CoQ10 به مدت شش هفته در افراد دارای اضافه‌وزن و چاقی منجر به افزایش معنادار VO_2max، کاهش ضربان قلب در حالت استراحت و کاهش فشارخون سیستولیک شد. این یافته‌ها نشان‌دهنده بهبود عملکرد قلبی‌تنفسی و ظرفیت هوازی در این جمعیت بود (۴۰). در زمینه بیماری‌های قلبی، مطالعه‌ای در سال ۲۰۲۰ روی بیماران مبتلا به نارسایی قلبی نشان داد، مکمل‌یاری با CoQ10 به مدت سه ماه منجر به افزایش معنادار در ظرفیت عملکردی اندازه‌گیری‌شده با VO_2peak و بهبود عملکرد اندوتلیال شد. این نتایج حاکی از نقش CoQ10 در بهبود عملکرد قلبی و ظرفیت هوازی در بیماران قلبی است (۴۱). اجرای تمرینات HIIT منجر به بهبود عملکرد و تراکم میتوکندریایی می‌شود و افزایش ROSهای درون سلول با افزایش بیان PGC1-α موجب افزایش تراکم میتوکندریایی می‌شود (۴۲). از طرفی مکمل‌یاری CoQ10 با ایفای نقش در چرخه انتقال الکترون و محافظت از میتوکندری بر بهبود میزان اکسیژن مصرفی اوج تأثیر دارد (۴۳).

نتایج این پژوهش، همخوان با شواهد پیشین، تأیید می‌کند که راهبردهای تغذیه‌ای می‌توانند استرس اکسیداتیو ناشی از تمرین را کاهش دهند (۴۴). به صورت ویژه، مطالعات اخیر نشان می‌دهند که تمرینات شدید با مکمل‌یاری CoQ10 از طریق کاهش سطح MDA به‌عنوان شاخص پراکسیداسیون لیپید و افزایش آنزیم‌های آنتی‌اکسیدانی مانند SOD و GPX و TAC، نقش مؤثری در کاهش استرس اکسیداتیو ایفا می‌کند (۴۶، ۴۵). در این مطالعه کاهش معناداری در سطوح GPX مشاهده نشد که با نتایج مطالعات اخیر همسوست (۴۸، ۴۷). تغییرنیافتن GPX ممکن است ناشی از بهبود عملکرد میتوکندری‌ها و کاهش استرس اکسیداتیو و ایجاد بازخورد منفی در سیستم آنتی‌اکسیدانی GPX باشد (۵۰، ۴۹)؛ با این حال برخی پژوهش‌ها نتوانسته‌اند اثر معناداری برای مکمل‌یاری CoQ10 بر شاخص‌های استرس اکسیداتیو نشان دهند؛ برای مثال، مصرف ۲۰۰ میلی‌گرمی CoQ10 به مدت چهار هفته تأثیر معناداری بر سطح SOD و MDA نداشت (۵۱). در یک مطالعه مرور نظام‌مند، مصرف مکمل CoQ10 منجر به کاهش MDA و افزایش SOD و TAC شد؛ البته به علت ناهمگونی زیاد مطالعات لازم است نتایج بااحتیاط تفسیر شود (۵۲).

عملکرد CoQ10 به‌عنوان حامل الکترون در زنجیره انتقال الکترون میتوکندری، بهبود کارایی تنفس سلولی، افزایش تولید ATP و مهار تولید گونه‌های فعال اکسیژن (ROS) است (۵۴، ۵۳). به‌علاوه، نقش CoQ10 در حفاظت از غشاهای سلولی و تنظیم ژن‌های مرتبط با استرس اکسیداتیو و التهاب نیز به‌تازگی مدنظر قرار گرفته است (۵۵). تمرینات ورزشی با پاسخ افزایشی ROSها در بدن منجر به سازگاری با این تمرینات می‌شوند (۵۶). در همین راستا، تمرین تناوبی با شدت بالا (HIIT) به دلیل ماهیت متناوب و شدت زیاد، قادر است سازگاری‌های فیزیولوژیک در سیستم آنتی‌اکسیدانی بدن ایجاد کند (۵۷). مکانیسم اصلی در این سازگاری فعال‌سازی مسیر Nrf2 است که آنزیم‌های آنتی‌اکسیدانی را افزایش و آسیب اکسیداتیو را کاهش می‌دهد (۵۸). همچنین این شیوه تمرینی باعث افزایش بیان mRNA آنزیم‌های آنتی‌اکسیدانی SOD1 و CAT در کلیه‌های موش‌های مبتلا به بیماری مزمن کلیه شد (۵۹). در کنار اثربخشی این تمرینات، مطالعات حیوانی اثربخشی مصرف مکمل CoQ10 را بر مسیر Nrf2 در کبد موش‌های دیابتی بیان کردند و نشان دادند که مصرف این مکمل ظرفیت آنتی‌اکسیدانی را افزایش می‌دهد (۶۰).

با توجه به یافته‌های پژوهش حاضر، می‌توان نتیجه گرفت که تمرین تناوبی با شدت بالا (HIIT) به مدت هشت هفته، موجب بهبود معنادار در ظرفیت هوازی و وضعیت آنتی‌اکسیدانی سالمندان می‌شود. این بهبود نه‌تنها در شاخص‌های عملکرد قلبی‌تنفسی مانند VO_2peak مشهود بود، بلکه در کاهش شاخص استرس اکسیداتیو نظیر MDA و افزایش آنزیم‌های آنتی‌اکسیدانی همچون SOD و TAC نیز منعکس شد؛ بنابراین مصرف مکمل CoQ10 در کنار تمرین HIIT تأثیر هم‌افزا بر سازگاری‌های ایجادشده در ظرفیت هوازی و وضعیت اکسیداتیو دارد.

درمجموع، یافته‌های این پژوهش از رویکرد ترکیبی تمرین HIIT و مکمل‌یاری با CoQ10 در بهبود ظرفیت هوازی، کاهش استرس اکسیداتیو و ارتقای سلامت سالمندان حمایت می‌کند. این نتایج می‌تواند مبنایی برای طراحی مداخلات جامع در برنامه‌های توان‌بخشی و سلامت‌نگه‌دار سالمندان فراهم آورد.

پیام مقاله

نتایج این پژوهش نشان می‌دهد که مصرف مکمل کوآنزیم Q10 در کنار تمرینات HIIT می‌تواند نقش درخورتوجهی در ارتقای ظرفیت هوازی، بهبود عملکرد سیستم آنتی‌اکسیدانی و کاهش شاخص‌های استرس اکسیداتیو در سالمندان ایفا کند. به طور خاص، افزایش معنادار سطوح VO2peak، کاهش سطح مالون‌دی‌آلدئید (MDA) به‌عنوان نشانگر آسیب اکسیداتیو و افزایش فعالیت آنزیم‌های آنتی‌اکسیدانی مانند سوپراکسید دیسموتاز (SOD) و ظرفیت آنتی‌اکسیدانی کل (TAC) حاکی از آن است که CoQ10 می‌تواند به‌عنوان مکملی مؤثر بر بهبود سازگاری‌های فیزیولوژیک ناشی از تمرینات ورزشی در سنین بیشتر، مطرح شود. با توجه به اینکه سالمندی با کاهش ظرفیت هوازی، افزایش استرس اکسیداتیو و افت کارایی سیستم دفاع آنتی‌اکسیدانی همراه است، به نظر می‌رسد استفاده از رویکرد ترکیبی مکمل‌یاری و تمرینات ورزشی راهکاری علمی و کارآمد برای مقابله با روند تخریبی سالمندی باشد؛ بر این اساس، یافته‌های این مطالعه می‌تواند مبنایی برای طراحی مداخلات آینده‌نگر در حوزه طب سالمندی، ورزش و تغذیه بالینی قرار گیرد و ضرورت انجام پژوهش‌های گسترده‌تر در زمینه تأثیر مکمل‌های آنتی‌اکسیدانی بر پاسخ‌های تمرینی در جمعیت‌های سالمند را برجسته می‌کند.

ملاحظات اخلاقی

همه شرکت‌کنندگان پس از کسب اطلاعات کامل درباره تحقیق، رضایت‌نامه آگاهانه کتبی را امضا کردند. این پژوهش با کد اخلاق IR.UI.REC.1403.018 در کمیته اخلاق در پژوهش دانشگاه اصفهان تصویب شد و در مرکز بین‌المللی ثبت کارآزمایی‌های بالینی ایران با شناسه IRCT20240310061243N1 به ثبت رسید.

مشارکت نویسندگان

این مقاله حاصل همکاری کامل است و همه نویسندگان به طور مساوی در نتیجه نهایی سهم داشتند.

تعارض منافع

بنابر اظهار نویسندگان، این مقاله تعارض منافع ندارد.

تشکر و قدردانی

از همراهی تمامی شرکت‌کنندگان سالمند در این مطالعه صمیمانی قدردانی می‌کنیم.

منابع

1. Belardinelli R, Muçaj A, Lacalaprice F, Solenghi M, Seddaiu G, Principi F, et al. Coenzyme Q10 and exercise training in chronic heart failure. European Heart Journal. 2006;27(22):2675-81. https://doi.org/10.1093/eurheartj/ehl158
2. Li Z, Zhang Z, Ren Y, Wang Y, Fang J, Yue H, et al. Aging and age-related diseases: from mechanisms to therapeutic strategies. Biogerontology. 2021;22(2):165-87. https://doi.org/10.1007/s10522-021-09910-5
3. Steenman M, Lande G. Cardiac aging and heart disease in humans. Biophysical Reviews. 2017;9(2):131-7. https://doi.org/10.1007/s12551-017-0255-9

4. Amorim JA, Coppotelli G, Rolo AP, Palmeira CM, Ross JM, Sinclair DA. Mitochondrial and metabolic dysfunction in ageing and age-related diseases. Nature Reviews Endocrinology. 2022;18(4):243-58. https://doi.org/10.1038/s41574-021-00626-7

5. Ferri E, Marzetti E, Calvani R, Picca A, Cesari M, Arosio B. Role of age-related mitochondrial dysfunction in sarcopenia. International Journal of Molecular Sciences. 2020;21(15):5236. https://doi.org/10.3390/ijms21155236

6. Netuveli G, Blane D. Quality of life in older ages. British Medical Bulletin. 2008;85(1):113-26. https://doi.org/10.1093/bmb/ldn003

7. Glasauer A, Chandel NS. Ros. Current Biology. 2013;23(3):R100-R2. https://doi.org/10.1016/j.cub.2012.12.011

8. Mittler R. ROS are good. Trends in plant science. 2017;22(1):11-9. https://doi.org/10.1016/j.tplants.2016.08.002

9. Zuo L, Prather ER, Stetskiv M, Garrison DE, Meade JR, Peace TI, Zhou T. Inflammaging and oxidative stress in human diseases: from molecular mechanisms to novel treatments. International Journal of Molecular Sciences. 2019;20(18):4472. https://doi.org/10.3390/ijms20184472

10. Leyane TS, Jere SW, Houreld NN. Oxidative stress in ageing and chronic degenerative pathologies: molecular mechanisms involved in counteracting oxidative stress and chronic inflammation. International Journal of Molecular Sciences. 2022;23(13):7273. https://doi.org/10.3390/ijms23137273

11. Gil P, Fariñas F, Casado A, López-Fernández E. Malondialdehyde: a possible marker of ageing. Gerontology. 2002;48(4):209-14. https://doi.org/10.1159/000058352

12. Varesi A, Campagnoli LIM, Carrara A, Pola I, Floris E, Ricevuti G, et al. Non-enzymatic antioxidants against alzheimer's disease: prevention, diagnosis and therapy. Antioxidants. 2023;12(1):180. https://doi.org/10.3390/antiox12010180

13. Hajam YA, Rani R, Ganie SY, Sheikh TA, Javaid D, Qadri SS, et al. Oxidative stress in human pathology and aging: molecular mechanisms and perspectives. Cells. 2022;11(3):552. https://doi.org/10.3390/cells11030552

14. Valaei K, Taherkhani S, Arazi H, Suzuki K. Cardiac oxidative stress and the therapeutic approaches to the intake of antioxidant supplements and physical activity. Nutrients. 2021;13(10):3483. https://doi.org/10.3390/nu13103483

15. Powers SK, Radak Z, Ji LL. Exercise-induced oxidative stress: past, present and future. The Journal of Physiology. 2016;594(18):5081-92. https://doi.org/10.1113/JP270646

16. Atakan MM, Li Y, Koşar ŞN, Turnagöl HH, Yan X. Evidence-based effects of high-intensity interval training on exercise capacity and health: a review with historical perspective. International Journal of Environmental Research and Public Health. 2021;18(13):7201. https://doi.org/10.3390/ijerph18137201

17. Lu Y, Wiltshire HD, Baker JS, Wang Q. Effects of high intensity exercise on oxidative stress and antioxidant status in untrained humans: a systematic review. Biology. 2021;10(12):1272. https://doi.org/10.3390/biology10121272

18. Powers SK, Goldstein E, Schrager M, Ji LL. Exercise training and skeletal muscle antioxidant enzymes: an update. Antioxidants. 2023;12(1):39. https://doi.org/10.3390/antiox12010039

19. Zhou Z, Chen C, Teo E-C, Zhang Y, Huang J, Xu Y, Gu Y. Intracellular oxidative stress induced by physical exercise in adults: systematic review and meta-analysis. Antioxidants. 2022; 11(9). https://doi.org/10.3390/antiox11091751

20. Daniela M, Catalina L, Ilie O, Paula M, Daniel-Andrei I, Ioana B. Effects of exercise training on the autonomic nervous system with a focus on anti-inflammatory and antioxidants effects. Antioxidants. 2022;11(2):350. https://doi.org/10.3390/antiox11020350

21. Lu Y, Wiltshire HD, Baker JS, Wang Q. Effects of high intensity exercise on oxidative stress and antioxidant status in untrained humans: a systematic review. Biology. 2021; 10(12). https://doi.org/10.3390/biology10121272

22. Forman HJ, Zhang H. Targeting oxidative stress in disease: promise and limitations of antioxidant therapy. Nature Reviews Drug Discovery. 2021;20(9):689-709. https://doi.org/10.1038/s41573-021-00233-1

23. Aaseth J, Alexander J, Alehagen U. Coenzyme Q10 supplementation – In ageing and disease. Mechanisms of Ageing and Development. 2021;197:111521. https://doi.org/10.1016/j.mad.2021.111521

24. de la Bella-Garzón R, Fernández-Portero C, Alarcón D, Amián JG, López-Lluch G. Levels of plasma coenzyme Q10 are associated with physical capacity and cardiovascular risk in the elderly. Antioxidants. 2022;11(2):279. https://doi.org/10.3390/antiox11020279

25. Hernández-Camacho JD, Bernier M, López-Lluch G, Navas P. Coenzyme Q10 supplementation in aging and disease. Frontiers in Physiology. 2018;9:44. https://doi.org/10.3389/fphys.2018.00044

26. Pala R, Beyaz F, Tuzcu M, Er B, Sahin N, Cinar V, Sahin K. The effects of coenzyme Q10 on oxidative stress and heat shock proteins in rats subjected to acute and chronic exercise. J Exerc Nutrition Biochem. 2018;22(3):14-20. https://doi.org/10.3390/app15052618

27. Andreani C, Bartolacci C, Guescini M, Battistelli M, Stocchi V, Orlando F, et al. Combination of coenzyme Q(10) intake and moderate physical activity counteracts mitochondrial dysfunctions in a SAMP8 mouse model. Oxid Med Cell Longev. 2018;2018:8936251. https://doi.org/10.1155/2018/8936251

28. Washburn RA, Smith KW, Jette AM, Janney CA. The physical activity scale for the elderly (PASE): development and evaluation. Journal of Clinical Epidemiology. 1993;46(2):153-62. https://doi.org/10.1016/0895-4356(93)90053-4

29. Craig C, Marshall A, Sjostrom M, Bauman A, Lee P, Macfarlane D, et al. International physical activity questionnaire-short form. J Am Coll Health. 2017;65(7):492-501.

30. Golding LA, Myers CR, Sinning WE. Y's way to physical fitness: the complete guide to fitness testing and instruction. (No Title). 1989.

31. Reljic D, Wittmann F, Fischer JE. Effects of low-volume high-intensity interval training in a community setting: a pilot study. European Journal of Applied Physiology. 2018;118:1153-67. https://doi.org/10.1007/s00421-018-3845-8

32. Abdollahzad H, Alipour B, Aghdashi MA, Jafarabadi MA. Coenzyme Q10 supplementation in patients with rheumatoid arthritis: are there any effects on cardiovascular risk factors? European Journal of Integrative Medicine. 2015;7(5):534-9. https://doi.org/10.1016/j.eujim.2015.09.003

33. Dai S, Tian Z, Zhao D, Liang Y, Liu M, Liu Z, et al. Effects of coenzyme Q10 supplementation on biomarkers of oxidative stress in adults: a GRADE-Assessed systematic review and updated meta-analysis of randomized controlled trials. Antioxidants. 2022;11(7):1360. https://doi.org/10.1007/s00394-015-1042-7

34. Raygan F, Rezavandi Z, Dadkhah Tehrani S, Farrokhian A, Asemi Z. The effects of coenzyme Q10 administration on glucose homeostasis parameters, lipid profiles, biomarkers of inflammation and oxidative stress in patients with metabolic syndrome. European Journal of Nutrition. 2016;55(8):2357-64. https://doi.org/10.1007/s00394-015-1042-7

35. Sangouni AA, Taghdir M, Mirahmadi J, Sepandi M, Parastouei K. Effects of curcumin and/or coenzyme Q10 supplementation on metabolic control in subjects with metabolic syndrome: a randomized clinical trial. Nutr J. 2022;21(1):62. https://doi.org/10.1186/s12937-022-00816-7

36. Bouaziz W, Malgoyre A, Schmitt E, Lang P-O, Vogel T, Kanagaratnam L. Effect of high-intensity interval training and continuous endurance training on peak oxygen uptake among seniors aged 65

or older: A meta-analysis of randomized controlled trials. International Journal of Clinical Practice. 2020;74(6):e13490. https://doi.org/10.1111/ijcp.13490

37. Poon ET-C, Waris W, Sze-Tak HR, and Wong SH-S. Interval training versus moderate-intensity continuous training for cardiorespiratory fitness improvements in middle-aged and older adults: a systematic review and meta-analysis. Journal of Sports Sciences. 2021;39(17):1996-2005. https://doi.org/10.1080/02640414.2021.1912453
38. Lindner R, Raj IS, Yang AWH, Zaman S, Larsen B, Denham J. Moderate to vigorous-intensity continuous training versus highintensity interval training for improving VO2max in women: a systematic review and meta-analysis. International Journal of Sports Medicine. 2023;44(07):484-95. https://doi.org/10.1055/a-2044-8952
39. Yasul Y, Yılmaz B, Şenel Ö, Kurt D, Akbulut T, Çalıkuşu A, et al. Evaluating the impact of coenzyme Q10 and high-intensity interval training on lactate threshold and Plasma blood gases in rats: a randomized controlled trial. European Journal of Applied Physiology. 2025. https://doi.org/10.1007/s00421-025-05756-8
40. Kunching S, Nararatwanchai T, Chalermchai T, Wongsupasawat K. Impacts of coenzyme Q10 supplementation on body composition and exercise performance in overweight and class1 obesity. Asia-Pacific Journal of Science and Technology. 2022;27(06):APST-27-06-2. https://doi.org/10.14456/apst.2022.84
41. Di Lorenzo A, Iannuzzo G, Parlato A, Cuomo G, Testa C, Coppola M, et al. Clinical evidence for Q10 coenzyme supplementation in heart failure: from energetics to functional improvement. J Clin Med. 2020;9(5). https://doi.org/10.3390/jcm9051266
42. Mantle D, Hargreaves IP, Domingo JC, Castro-Marrero J. Mitochondrial dysfunction and coenzyme q10 supplementation in post-viral fatigue syndrome: an overview. International Journal of Molecular Sciences. 2024; 25(1). https://doi.org/10.3390/ijms25010574
43. Zeng Z, Centner C, Gollhofer A, König D. Effects of dietary strategies on exercise-induced oxidative stress: a narrative review of human studies. Antioxidants. 2021; 10(4). https://doi.org/10.3390/ijms25010574
44. Dai S, Tian Z, Zhao D, Liang Y, Liu M, Liu Z, et al. Effects of coenzyme Q10 supplementation on biomarkers of oxidative stress in adults: a GRADE-assessed systematic review and updated meta-analysis of randomized controlled trials. Antioxidants (Basel). 2022;11(7). https://doi.org/10.3390/antiox11071360
45. Sangsefidi ZS, Yaghoubi F, Hajiahmadi S, Hosseinzadeh M. The effect of coenzyme Q10 supplementation on oxidative stress: A systematic review and meta-analysis of randomized controlled clinical trials. Food Sci Nutr. 2020;8(4):1766-76. https://doi.org/10.1002/fsn3.1492
46. Sedaghat A, Samadi M, Shirvani H, Sepandi M, Tahmasebi W. Coenzyme Q10 supplementation and oxidative stress parameters: an updated systematic review and meta-analysis of randomized controlled clinical trials. Asian Journal of Sports Medicine. 2022;13(3). https://doi.org/10.5812/asjsm-131308
47. Zhang Y, Huang X, Liu N, Liu M, Sun C, Qi B, et al. Discovering the potential value of coenzyme Q10 in oxidative stress: enlightenment from a synthesis of clinical evidence based on various population. Front Pharmacol. 2022;13:936233. https://doi.org/10.3389/fphar.2022.936233
48. Circu ML, Aw TY. Reactive oxygen species, cellular redox systems, and apoptosis. Free Radical Biology and Medicine. 2010;48(6):749-62. https://doi.org/10.1016/j.freeradbiomed.2009.12.022
49. Akbari A, Mobini GR, Agah S, Morvaridzadeh M, Omidi A, Potter E, et al. Coenzyme Q10 supplementation and oxidative stress parameters: a systematic review and meta-analysis of clinical trials. Eur J Clin Pharmacol. 2020;76(11):1483-99. https://doi.org/10.1007/s00228-020-02919-8
50. Mousavinejad E, Ghaffari MA, Riahi F, Hajmohammadi M, Tiznobeyk Z, Mousavinejad M. Coenzyme Q10 supplementation reduces oxidative stress and decreases antioxidant enzyme activity in children

with autism spectrum disorders. Psychiatry Research. 2018;265:62-9. https://doi.org/10.1016/j.psychres.2018.03.061

51. Okudan N, Belviranli M, Torlak S. Coenzyme Q10 does not prevent exercise-induced muscle damage and oxidative stress in sedentary men. J Sports Med Phys Fitness. 2018;58(6):889-94. https://doi.org/10.23736/s0022-4707.17.07146-8

52. Akbari A, Mobini GR, Agah S, Morvaridzadeh M, Omidi A, Potter E, et al. Coenzyme Q10 supplementation and oxidative stress parameters: a systematic review and meta-analysis of clinical trials. Eur J Clin Pharmacol. 2020;76(11):1483-99. https://doi.org/10.1007/s00228-020-02919-8

53. Hidalgo-Gutiérrez A, González-García P, Díaz-Casado ME, Barriocanal-Casado E, López-Herrador S, Quinzii CM, López LC. Metabolic targets of coenzyme Q10 in mitochondria. Antioxidants. 2021;10(4). https://doi.org/10.3390/antiox10040520

54. Hernández-Camacho JD, Bernier M, López-Lluch G, Navas P. Coenzyme Q10 supplementation in aging and disease. Frontiers in Physiology. 2018;9:2018. https://doi.org/10.3389/fphys.2018.00044

55. Dabbaghi Varnousfaderani S, Musazadeh V, Ghalichi F, Kavyani Z, Razmjouei S, Faghfouri AH, et al. Alleviating effects of coenzyme Q10 supplements on biomarkers of inflammation and oxidative stress: results from an umbrella meta-analysis. Frontiers in Pharmacology. 2023;14:2023. https://doi.org/10.3389/fphar.2023.1191290

56. Done AJ, Traustadóttir T. Nrf2 mediates redox adaptations to exercise. Redox Biology. 2016;10:191-9. https://doi.org/10.1016/j.redox.2016.10.003

57. Bogdanis GC, Stavrinou P, Fatouros IG, Philippou A, Chatzinikolaou A, Draganidis D, et al. Short-term high-intensity interval exercise training attenuates oxidative stress responses and improves antioxidant status in healthy humans. Food Chem Toxicol. 2013;61:171-7. https://doi.org/10.1016/j.fct.2013.05.046

58. Portela FS, Malheiro LFL, Oliveira CA, Mercês É AB, De Benedictis LM, De Benedictis JM, et al. High-intensity interval training improves hepatic redox status via Nrf2 downstream pathways and reduced CYP2E1 expression in female rats with cisplatin-induced hepatotoxicity. Food Chem Toxicol. 2025;196:115234. https://doi.org/10.1016/j.fct.2024.115234

59. Tucker PS, Briskey DR, Scanlan AT, Coombes JS, Dalbo VJ. High intensity interval training favourably affects antioxidant and inflammation mRNA expression in early-stage chronic kidney disease. Free Radic Biol Med. 2015;89:466-72. https://doi.org/10.1016/j.freeradbiomed.2015.07.162