

مروری بر اثر مکمل‌های تغذیه‌ای همراه با ورزش بر استرس اکسیداتیو، التهاب و عملکرد متابولیک در افراد دارای اضافه‌وزن

شیرین خدادادی شیراز^{*۱}

۱- کارشناسی ارشد رشته فیزیولوژی ورزشی، گرایش تغذیه ورزشی، دانشکده تربیت بدنی و علوم ورزشی، دانشگاه گیلان، گیلان، ایران .

چکیده

اضافه‌وزن و چاقی از مهم‌ترین مشکلات سلامت در جهان امروز محسوب می‌شوند که با افزایش استرس اکسیداتیو، التهاب مزمن درجه پایین و اختلالات متابولیک همراه هستند. این عوامل می‌توانند زمینه‌ساز بروز بیماری‌های قلبی عروقی، دیابت نوع ۲ و سایر بیماری‌های مزمن شوند. در سال‌های اخیر، توجه ویژه‌ای به نقش ورزش و مکمل‌های تغذیه‌ای در کنترل این اختلالات شده است، زیرا هر دو مداخله قادرند از طریق مسیرهای فیزیولوژیک و متابولیکی مختلف، وضعیت اکسیداتیو و التهابی بدن را بهبود بخشند. هدف از این مطالعه مروری، بررسی اثر مکمل‌های تغذیه‌ای همراه با ورزش بر استرس اکسیداتیو، التهاب و عملکرد متابولیک در افراد دارای اضافه‌وزن بود. در این پژوهش، مطالعات مرتبط با تأثیر انواع تمرینات ورزشی شامل تمرینات هوازی، مقاومتی و تناوبی شدید، همراه با مکمل‌های تغذیه‌ای مختلف از جمله پلی‌فنول‌ها، چای سبز، امگا ۳، CLA، ویتامین‌ها و سایر ترکیبات آنتی‌اکسیدانی مورد بررسی قرار گرفتند. یافته‌ها نشان داد که ورزش منظم می‌تواند با افزایش ظرفیت آنتی‌اکسیدانی، بهبود عملکرد میتوکندری، کاهش چربی احشایی و افزایش حساسیت انسولینی، موجب بهبود وضعیت متابولیک شود. همچنین مکمل‌های تغذیه‌ای از طریق کاهش تولید گونه‌های فعال اکسیژن، مهار مسیرهای التهابی و تقویت سیستم دفاع آنتی‌اکسیدانی، نقش مؤثری در کاهش آسیب‌های ناشی از اضافه‌وزن دارند. نتایج مطالعات بیانگر آن است که ترکیب ورزش و مکمل‌های تغذیه‌ای در بسیاری از موارد اثرات هم‌افزا داشته و نسبت به هر مداخله به‌تنهایی، کاهش بیشتری در شاخص‌های التهابی و استرس اکسیداتیو و بهبود بیشتری در شاخص‌های متابولیکی ایجاد می‌کند. با این حال، تفاوت در نوع مکمل، شدت تمرین و ویژگی‌های آزمودنی‌ها موجب ناهمگونی در برخی یافته‌ها شده است. در مجموع، به نظر می‌رسد استفاده هم‌زمان از ورزش و مکمل‌های تغذیه‌ای می‌تواند راهبردی مؤثر برای بهبود سلامت متابولیک و کاهش عوارض ناشی از اضافه‌وزن باشد، هرچند انجام پژوهش‌های بیشتر برای تعیین دقیق‌ترین پروتکل‌های مداخله‌ای ضروری است.

کلمات کلیدی: اضافه‌وزن، استرس اکسیداتیو، التهاب، ورزش، مکمل‌های تغذیه‌ای

مقدمه

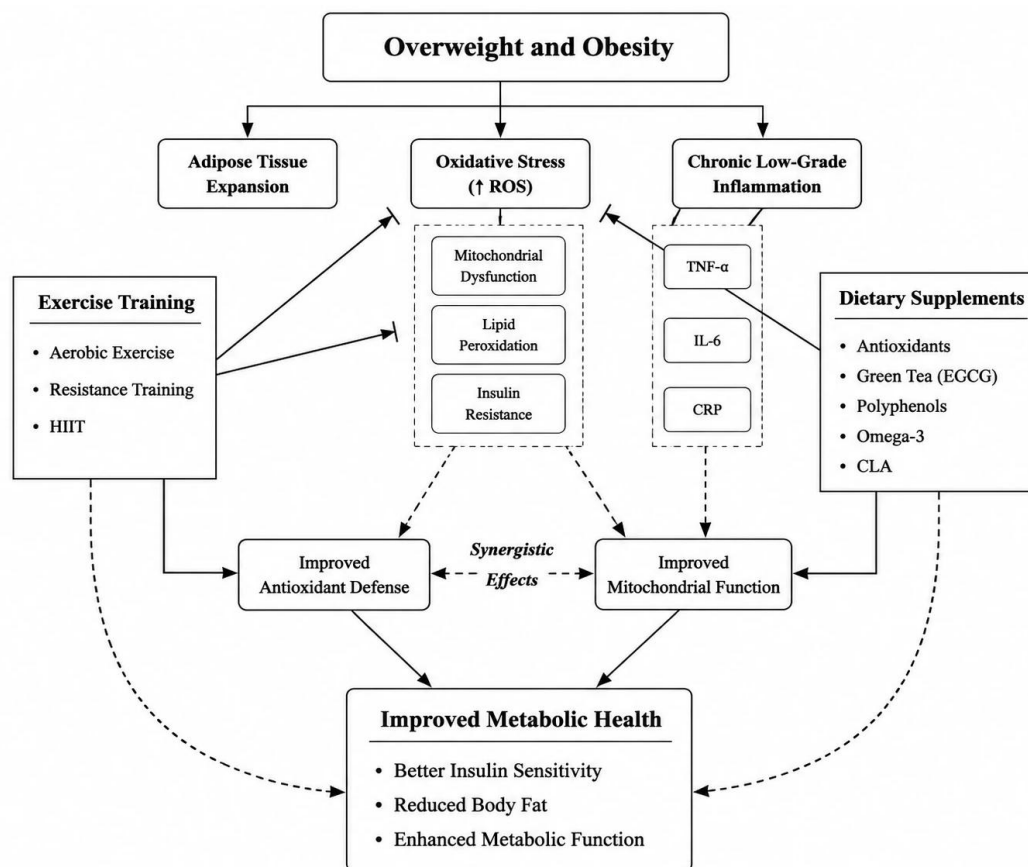
. مقدمه و بیان مسئله

اضافه وزن و چاقی به عنوان یکی از چالش های مهم بهداشت عمومی در دهه های اخیر مطرح شده اند، زیرا شیوع آن ها به طور مداوم در سراسر جهان رو به افزایش است و پیامدهای گسترده ای بر سلامت جسمانی، عملکرد فیزیولوژیک و کیفیت زندگی دارد. این اختلال متابولیک با تجمع بیش از حد بافت چربی و اختلال در عملکرد آن مشخص می شود؛ بافتی که برخلاف تصور گذشته صرفاً یک مخزن انرژی نیست، بلکه یک اندام فعال غدد درون ریز محسوب می شود که طیف وسیعی از آدیپوکاین ها، سایتوکاین های التهابی و مولکول های تنظیم کننده متابولیسم را ترشح می کند و نقش مهمی در ایجاد التهاب سیستمیک مزمن و استرس اکسیداتیو دارد (Taherkhani et al., ۲۰۲۱). افزایش توده چربی، به ویژه چربی احشایی، منبع اصلی تولید گونه های فعال اکسیژن (ROS) و اختلال در تعادل بین سیستم های تولید کننده و خنثی کننده رادیکال های آزاد است که نهایتاً زمینه ساز ایجاد مقاومت انسولینی، دیس لیپیدمی، افزایش سطوح CRP و سایر اختلالات متابولیک می شود (Valaei et al., ۲۰۲۱). شرایطی که اگر درمان نشوند می توانند خطر ابتلا به بیماری های قلبی عروقی، دیابت نوع ۲، کبد چرب غیر الکلی و سایر بیماری های مزمن را به شدت افزایش دهند (Capozzi et al., ۲۰۲۲).

در این میان، فعالیت بدنی منظم یکی از مهم ترین مداخلات غیر دارویی برای کنترل اضافه وزن شناخته می شود؛ فعالیتی که می تواند با بهبود شاخص های التهابی، افزایش فعالیت سیستم آنتی اکسیدانی درون زا و ارتقای حساسیت انسولینی، تأثیر چشمگیری بر عملکرد متابولیک داشته باشد (Shamsnia et al., ۲۰۲۳). تمرینات هوازی، مقاومتی و حتی تمرینات تناوبی شدید (HIIT) هر یک از مسیرهای متفاوتی بر وضعیت عمومی بدن اثر می گذارند؛ اما تمرینات با شدت بالا در سال های اخیر به دلیل کارایی بالاتر در کاهش چربی بدن و تقویت سازگاری های سلولی توجه بیشتری را به خود جلب کرده اند (Gawel et al., ۲۰۲۴). این نوع از تمرینات با تحریک مسیرهای بیوژنز میتوکندری، افزایش نسبت $NAD^+/NADH$ و تنظیم فاکتورهای مرتبط با استرس اکسیداتیو، موجب بهبود وضعیت آنتی اکسیدانی در افراد دارای اضافه وزن می شوند (Verhaegen et al., ۲۰۲۲). افزون بر این، فعالیت بدنی نقش مهمی در کنترل التهاب مزمن مرتبط با چاقی ایفا می کند؛ به گونه ای که مطالعات مختلف نشان داده اند ورزش منظم می تواند سطوح سایتوکاین های پیش التهابی نظیر $TNF-\alpha$ و $IL-6$ را کاهش داده و در مقابل، سایتوکاین های ضد التهابی مانند $IL-10$ را افزایش دهد (Meuffels et al., ۲۰۲۲). با این وجود، ورزش به تنهایی همیشه قادر نیست پاسخ های مطلوب و کامل در زمینه کاهش استرس اکسیداتیو یا التهاب ایجاد کند، به خصوص در افرادی که دارای چاقی شدید، رژیم غذایی نامناسب یا محدودیت های ورزشی هستند. بر این اساس، مکمل های تغذیه ای در دهه های اخیر توجه گسترده ای را به خود جلب کرده اند؛ مکمل هایی که می توانند با تقویت فعالیت های آنتی اکسیدانی، تعدیل مسیرهای التهابی و بهبود متابولیسم انرژی، تأثیر مداخله ورزشی را افزایش دهند. برای مثال، ترکیبات آنتی اکسیدانی نظیر ویتامین C، ویتامین E، سلنیوم، پلی فنول ها و ترکیبات گیاهی مانند کورکومین و رزوراترول به دلیل توانایی در کاهش ROS، تنظیم مسیر $Nrf2-Keap1$ و محافظت از ساختار سلولی در برابر آسیب اکسیداتیو مطرح شده اند

(۲۰۲۴, Asbaghi et al., ۲۰۲۳; Shamsnia et al., ۲۰۲۳). پلی فنول های موجود در چای سبز، انگور و سایر گیاهان نیز به عنوان مکمل های بالقوه مؤثر در بهبود عملکرد میتوکندری، کاهش التهاب و ارتقای ظرفیت آنتی اکسیدانی شناخته شده اند (Rojano- ۲۰۲۲, Capozzi et al., ۲۰۲۱; Ortega, ۲۰۲۱). چای سبز به طور خاص با ترکیباتی مانند EGCG تأثیر قابل توجهی بر کنترل وزن، بهبود پروفایل لیپیدی و کاهش استرس اکسیداتیو دارد و شواهد متعددی بر کارایی آن در افراد دارای اضافه وزن ارائه شده است (۲۰۲۴, Asbaghi et al.). از سوی دیگر، امگا ۳ به دلیل خصیصه های ضدالتهابی، تأثیر بر کاهش CRP و بهبود شاخص های لیپیدی، یکی از رایج ترین مکمل های است که به همراه ورزش در مداخلات مرتبط با اضافه وزن مورد بررسی قرار می گیرد (Montazer et al., ۲۰۲۱).

افزون بر مکمل های آنتی اکسیدانی و ضدالتهابی، مکمل های چندجزئی جدید که ترکیبی از مواد مؤثر بر انرژی، آنتی اکسیدان ها و محرک های متابولیک هستند نیز در مدیریت چاقی مورد توجه قرار گرفته اند. مطالعات کارآزمایی بالینی حاکی از آن است که مصرف مکمل های چندترکیبی همراه با ورزش می تواند کاهش وزن و بهبود ترکیب بدنی را سریع تر و مؤثرتر ایجاد کند، زیرا ترکیب مواد فعال در این مکمل ها از مسیرهای هم افزا بر کنترل وزن، آنتی اکسیداسیون و تنظیم هورمون های مرتبط با گرسنگی اثر می گذارد (۲۰۲۳, Nederveen et al.). همچنین مکمل هایی مانند اسید لینولئیک کونژوگه (CLA) نیز به دلیل اثرات احتمالی بر کاهش چربی بدن، تنظیم مسیرهای التهابی و بهبود عملکرد جسمانی مورد بررسی قرار گرفته اند و نقش بالقوه ای در کنار فعالیت ورزشی دارند (۲۰۲۳, Putera et al.). این شواهد نشان می دهد که ترکیب ورزش با مکمل های هدفمند می تواند نتایج متابولیکی بسیار مطلوبی ایجاد کند؛ با این حال، کارایی این مکمل ها بسته به نوع ترکیب، دوز، مدت مصرف و ویژگی های فردی تفاوت هایی دارد و در برخی موارد، یافته ها متناقض گزارش شده اند (۲۰۲۲, Bonetti et al.). به طور کلی، افزایش آگاهی از ارتباط میان فعالیت بدنی، مکمل های تغذیه ای و شاخص های متابولیکی در افراد دارای اضافه وزن، ضرورت انجام پژوهش های جامع در این زمینه را برجسته می سازد. اهمیت چنین مباحثی زمانی دوچندان می شود که بدانیم بسیاری از افراد دارای اضافه وزن به دلیل محدودیت های جسمانی قادر به انجام ورزش شدید نیستند و از سوی دیگر، مصرف خودسرانه مکمل های تغذیه ای می تواند آسیب زا باشد. بنابراین، شناسایی مکانیزم های اثرگذار، تعیین دوزهای اثربخش، انواع مکمل های مفید و بررسی اثرات هم افزایی آن ها با ورزش، نقش مهمی در طراحی پروتکل های مداخله ای ایمن و کاربردی دارد (۲۰۲۴, Kalogerakou & Antoniadou). به همین دلیل، مرور جامع مطالعات موجود می تواند راهنمای مناسبی برای متخصصان تغذیه ورزشی، مربیان و پژوهشگران فراهم آورد تا براساس یافته های علمی، بهترین رویکردهای ترکیبی را برای کاهش التهاب، کنترل استرس اکسیداتیو و بهبود شاخص های متابولیک در افراد دارای اضافه وزن انتخاب کنند.



شکل ۱. مدل مفهومی روابط میان اضافه وزن، استرس اکسیداتیو و التهاب، به همراه نقش تعدیل کننده ورزش و مکمل های تغذیه ای در بهبود پیامدهای متابولیک. اضافه وزن با افزایش تولید رادیکال های آزاد و فعال سازی مسیرهای التهابی، موجب اختلال در عملکرد میتوکندری، مقاومت به انسولین و اختلالات متابولیک می شود. ورزش منظم و برخی مکمل های تغذیه ای از طریق تقویت سیستم آنتی اکسیدانی، تعدیل مسیرهای التهابی و بهبود عملکرد سلولی می توانند این چرخه ناسالم را تضعیف کنند.

شکل ۱ ارتباط علی و فیزیولوژیک میان اضافه وزن، استرس اکسیداتیو و التهاب را در قالب یک مدل مفهومی نشان می دهد. در وضعیت اضافه وزن، تجمع چربی احشایی موجب افزایش تولید گونه های فعال اکسیژن (ROS) و فعال سازی سیتوکین های التهابی می شود. این شرایط نه تنها ظرفیت دفاع آنتی اکسیدانی را کاهش می دهد، بلکه با ایجاد التهاب مزمن درجه پایین، پیامدهایی مانند

مقاومت به انسولین، کاهش ظرفیت میتوکندری و اختلال در تنظیم گلوکز و چربی را رقم می‌زند. در این مدل، ورزش به‌عنوان یک مداخله کلیدی با افزایش فعالیت آنزیم‌های آنتی‌اکسیدانی، بهبود حساسیت انسولین، و تعدیل پاسخ‌های التهابی عمل می‌کند. همچنین مکمل‌های تغذیه‌ای—به‌ویژه ترکیبات آنتی‌اکسیدانی، پلی‌فنول‌ها و اسیدهای چرب مفید—نقش تقویتی در مهار استرس اکسیداتیو و التهاب داشته و می‌توانند اثرات محافظتی ورزش را افزایش دهند. در مجموع، مدل نشان می‌دهد که ترکیب ورزش و مکمل‌ها به‌طور هم‌افزا می‌تواند اختلالات متابولیک مرتبط با اضافه‌وزن را بهبود بخشد.

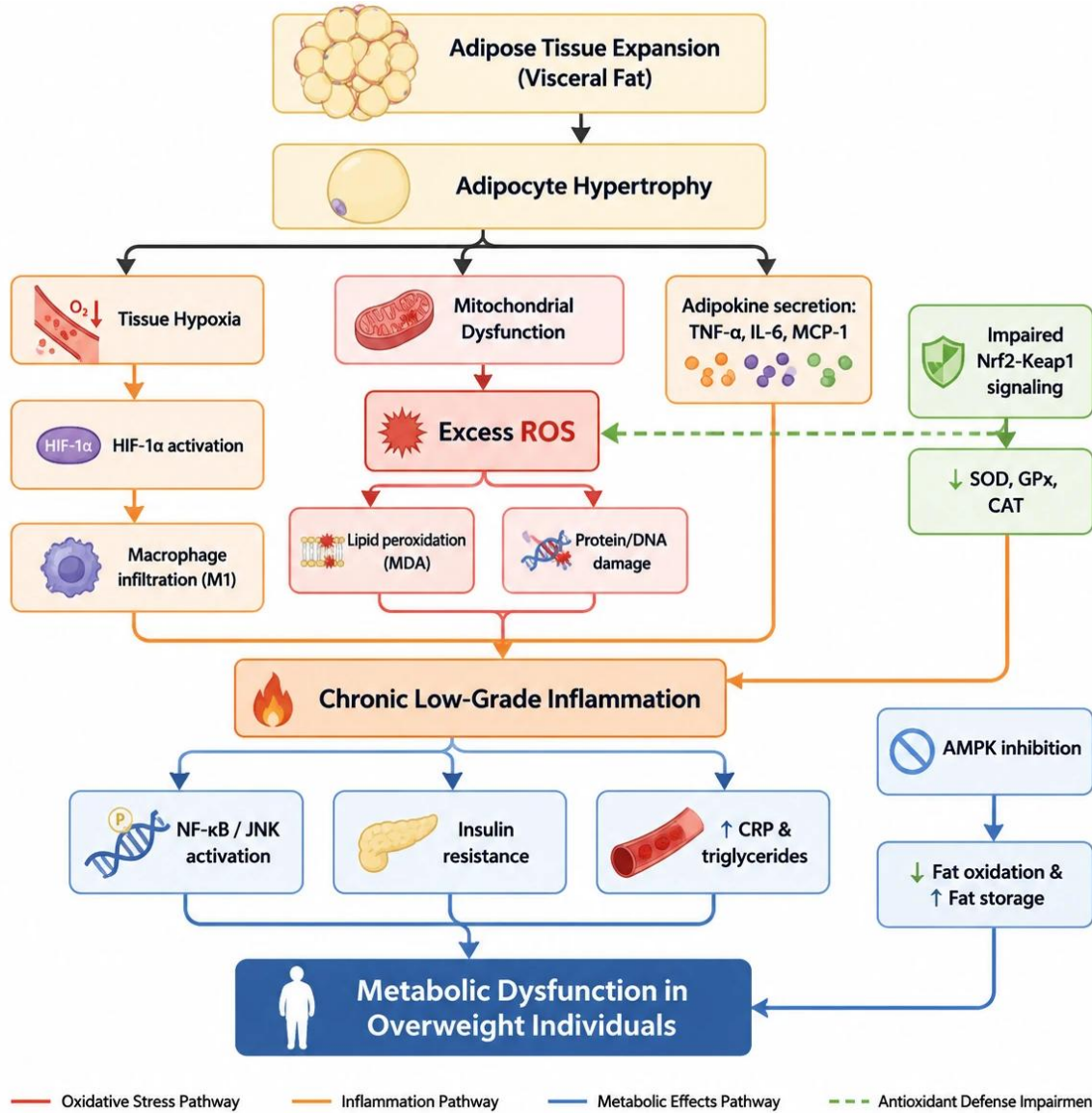
۲. مکانیسم‌های استرس اکسیداتیو و التهاب در افراد دارای اضافه‌وزن

استرس اکسیداتیو به‌عنوان یکی از مهم‌ترین پیامدهای فیزیولوژیکی اضافه‌وزن و چاقی شناخته می‌شود و زمانی رخ می‌دهد که تعادل ظریف میان تولید گونه‌های فعال اکسیژن (ROS) و ظرفیت آنتی‌اکسیدانی دفاعی بدن به هم می‌خورد. در افراد دارای اضافه‌وزن، افزایش حجم و فعالیت متابولیک بافت چربی، به‌ویژه چربی احشایی، منجر به افزایش شدید تولید ROS در سطح سلولی و میتوکندریایی می‌شود (Taherkhani et al., ۲۰۲۱). با افزایش اندازه آدیپوسیت‌ها، جریان خون بافت چربی کاهش می‌یابد و هیپوکسی موضعی ایجاد می‌شود؛ این کمبود اکسیژن، فاکتور $HIF-1\alpha$ را فعال کرده و باعث افزایش تولید ROS، التهاب موضعی و جذب ماکروفاژها در بافت چربی می‌شود (Capozzi et al., ۲۰۲۲). در نتیجه، استرس اکسیداتیو به یک چرخه معیوب تبدیل می‌شود؛ چرخه‌ای که در آن ROS اضافی موجب آسیب به لیپیدها، پروتئین‌ها و DNA می‌شود و این آسیب‌ها نیز به نوبه خود شرایط التهابی را تشدید می‌کنند، وضعیتی که در افراد چاق بسیار رایج است (Verhaegen et al., ۲۰۲۲). افزون بر این، اختلال در عملکرد میتوکندری ناشی از چاقی نیز یکی از محرک‌های کلیدی در افزایش تولید ROS است، زیرا میتوکندری‌های ناسالم با راندمان پایین‌تر عمل کرده و الکترون‌های فرار بیشتری را به اکسیژن منتقل می‌کنند که نتیجه آن افزایش رادیکال‌های آزاد است. از سوی دیگر، التهاب مزمن درجه پایین یا low-grade chronic inflammation یکی از ویژگی‌های کلاسیک چاقی به‌شمار می‌رود که ارتباط مستقیمی با اختلالات متابولیک دارد. بافت چربی هیپرتروفیک، آدیپوکاین‌هایی نظیر $TNF-\alpha$ ، $IL-6$ ، $MCP-1$ و رسیتین ترشح می‌کند که هر یک مسیرهای التهابی سیستمیک را فعال می‌سازند (Putera et al., ۲۰۲۳). ماکروفاژهای $M1$ که در بافت چربی افراد چاق تجمع می‌یابند، به شدت مولکول‌های پیش‌التهابی تولید می‌کنند که از طریق افزایش $NF-\kappa B$ و JNK موجب اختلال در سیگنالینگ انسولین و ایجاد مقاومت انسولینی می‌شوند (Valaei et al., ۲۰۲۱). در نتیجه، التهاب دیگر یک پدیده موضعی محدود به بافت چربی نیست، بلکه به صورت سیستمیک اثر گذاشته و منجر به افزایش CRP، مقاومت انسولین، افزایش تری‌گلیسریدها و کاهش حساسیت انسولینی می‌شود (Montazer et al., ۲۰۲۱). این التهاب مزمن، علاوه بر اثرات متابولیکی، موجب آسیب قلبی، کاهش ظرفیت آنتی‌اکسیدانی و اختلال در تنظیم هورمون‌هایی نظیر لپتین و آدیپونکتین نیز می‌شود که خود زمینه‌ساز افزایش وزن بیشتر است (Cauci et al., ۲۰۲۱). همچنین شواهد نشان می‌دهد که التهاب مزمن ناشی از چاقی می‌تواند فعالیت سیستم ایمنی را مختل کرده و احتمال بروز بیماری‌های عفونی و خودایمنی را نیز افزایش دهد.

در حوزه مکانیسم‌های مولکولی، یکی از مسیرهای مهمی که در افراد دارای اضافه‌وزن مختل می‌شود، مسیر Nrf2-Keap1 است. این مسیر به طور طبیعی نقش اساسی در تنظیم دفاع آنتی‌اکسیدانی دارد و فعال‌سازی Nrf2 موجب افزایش تولید آنزیم‌هایی مثل SOD ، GPx و CAT می‌شود که وظیفه خنثی‌سازی ROS را بر عهده دارند. با این حال، مطالعات نشان داده‌اند که در بافت چربی افراد چاق، فعالیت Nrf2 کاهش می‌یابد و این مسئله باعث تضعیف دفاع آنتی‌اکسیدانی و افزایش آسیب اکسیداتیو می‌شود (Shamsnia et al., ۲۰۲۳). در کنار این موضوع، رسوب چربی در کبد، عضلات و سایر بافت‌ها نیز به التهاب ثانویه و افزایش تولید ROS منجر می‌شود که وضعیت متابولیکی را پیچیده‌تر می‌کند. از این رو، چاقی نه فقط یک اختلال انرژی، بلکه یک بیماری التهابی-اکسیداتیو محسوب می‌شود که مجموعه‌ای از مسیرهای سلولی و مولکولی را درگیر می‌کند. مطالعات حیوانی نیز نشان داده‌اند موش‌های چاق دچار افزایش شدید سطوح MDA ، کاهش ظرفیت آنتی‌اکسیدانی و افزایش آسیب DNA می‌شوند که نشان‌دهنده نقش مستقیم چاقی در آسیب سلولی است (Wojcik-Grzybek et al., ۲۰۲۲). این یافته‌ها نشان می‌دهد که حضور استرس اکسیداتیو و التهاب نه پیامد ثانویه، بلکه جزء جدایی‌ناپذیر اضافه‌وزن است.

ارتباط میان استرس اکسیداتیو و التهاب همچنین بر کنترل وزن و متابولیسم انرژی اثر می‌گذارد. ROS اضافی می‌تواند مسیر AMPK را مهار کنند؛ یکی از مهم‌ترین حسگرهای انرژی بدن است که فعال‌سازی آن موجب افزایش اکسیداسیون چربی، بهبود عملکرد میتوکندری و افزایش مصرف انرژی می‌شود. مهار AMPK موجب کاهش مصرف چربی و افزایش ذخیره آن شده و این موضوع به‌ویژه در افراد دارای اضافه‌وزن قابل مشاهده است (Putera et al., ۲۰۲۳). التهاب سیستمیک نیز حساسیت انسولینی را کاهش داده و سبب می‌شود سلول‌ها در دریافت گلوکز دچار مشکل شوند، وضعیتی که بدن را به سمت تولید بیشتر انسولین و ذخیره چربی بیشتر سوق می‌دهد. از طرفی، آدیپوکاین‌هایی مثل لپتین در افراد چاق به میزان زیادی ترشح می‌شوند، اما افزایش مزمن آن موجب مقاومت لپتینی شده و پیام سیری را مختل می‌کند، درحالی که کاهش آدیپونکتین نیز سبب افزایش التهاب و کاهش اکسیداسیون چربی می‌شود (Bonetti et al., ۲۰۲۲). ترکیب این فرآیندها نشان می‌دهد که چاقی چگونه از مسیرهای هورمونی، سلولی و مولکولی تعادل انرژی را مختل می‌کند.

در مجموع، بررسی مکانیسم‌های استرس اکسیداتیو و التهاب در افراد دارای اضافه‌وزن اهمیت زیادی دارد، زیرا نه تنها توضیح می‌دهد چرا چاقی منجر به مشکلات متابولیک گسترده می‌شود، بلکه نشان می‌دهد چرا مداخلاتی مانند ورزش و مکمل‌های تغذیه‌ای می‌توانند اثرات درمانی قوی داشته باشند. برای مثال، بسیاری از مکمل‌های آنتی‌اکسیدانی دقیقاً مسیر Nrf2 را هدف قرار می‌دهند و بسیاری از انواع ورزش با بهبود عملکرد میتوکندری، کاهش التهابات سیستمیک و افزایش ظرفیت آنتی‌اکسیدانی، این چرخه معیوب را اصلاح می‌کنند (Kalogerakou & Antoniadou, ۲۰۲۴). درک این مسیرها مبنایی برای طراحی پروتکل‌های ترکیبی ورزش-مکمل است که می‌تواند با دقت بیشتری بر نقاط کلیدی اثر گذاشته و نتیجه بالینی بهتری برای مدیریت اضافه‌وزن فراهم کند.



شکل ۲. مکانیسم‌های ارتباطی استرس اکسیداتیو و التهاب مزمن در افراد دارای اضافه‌وزن

شکل ۲ به صورت شماتیک مکانیسم‌های اصلی ارتباط میان استرس اکسیداتیو و التهاب مزمن در افراد دارای اضافه‌وزن را نشان می‌دهد. افزایش حجم بافت چربی، به‌ویژه چربی احشایی، موجب هیپرتروفی آدیپوسیت‌ها و کاهش جریان خون در بافت چربی

می شود که در آخر منجر به ایجاد هیپوکسی موضعی و فعال شدن فاکتور $HIF-1\alpha$ می گردد. این وضعیت سبب افزایش تولید گونه های فعال اکسیژن (ROS) در سلول ها و میتوکندری ها شده و آسیب اکسیداتیو به لیپیدها، پروتئین ها و DNA را افزایش می دهد. در ادامه، افزایش ROS مسیرهای التهابی مهمی مانند NF- κ B و JNK را فعال می کند. همزمان با این فرایندها، بافت چربی بزرگ شده موجب جذب ماکروفاژهای نوع M1 و افزایش ترشح آدیپوکاین های پیش التهابی نظیر TNF- α ، IL-6 و MCP-1 می شود که سرانجام به بروز التهاب مزمن در جبهه پایین در بدن منجر می گردد. این التهاب سیستمیک همراه با استرس اکسیداتیو باعث اختلال در سیگنالینگ انسولین، کاهش حساسیت انسولینی و بروز اختلالات متابولیک می شود. علاوه بر این، کاهش فعالیت مسیر آنتی اکسیدانی Nrf2 موجب تضعیف سیستم دفاع آنتی اکسیدانی بدن و کاهش فعالیت آنزیم هایی مانند SOD، GPx و CAT می شود. در مجموع، این فرایندها یک چرخه معیوب از استرس اکسیداتیو و التهاب ایجاد می کنند که نقش مهمی در بروز و تداوم اختلالات متابولیکی مرتبط با اضافه وزن دارند.

۳. اثر ورزش بر استرس اکسیداتیو، التهاب و عملکرد متابولیک در افراد دارای اضافه وزن

ورزش به عنوان یکی از مؤثرترین مداخلات غیردارویی در بهبود سلامت متابولیک افراد دارای اضافه وزن شناخته می شود، زیرا قادر است همزمان چندین مسیر فیزیولوژیک را که در چاقی مختل شده اند اصلاح کند. تمرینات ورزشی، چه از نوع هوازی، چه مقاومتی و چه تناوبی شدید، تأثیر چشمگیری بر ظرفیت آنتی اکسیدانی بدن، کاهش التهاب سیستمیک و بهبود عملکرد میتوکندری دارند. در افراد دارای اضافه وزن، فعالیت بدنی با تحریک مسیرهای زیستی نظیر AMPK، PGC-1 α و SIRT1 موجب افزایش بیوزن میتوکندری، بهبود ظرفیت اکسیداسیون چربی و کاهش تولید گونه های فعال اکسیژن (ROS) می شود (Verhaegen et al., 2022). این تأثیرات به ویژه در بافت عضله اسکلتی و چربی احشایی بسیار مشهود است، زیرا ورزش باعث انتقال چربی ها به سمت اکسیداسیون و کاهش تجمع لیپیدهای سمی داخل سلولی شده و از این طریق مقاومت انسولینی را کاهش می دهد (Shamsnia et al., 2023). علاوه بر آن، بهبود جریان خون ناشی از ورزش نیز خود منجر به کاهش هیپوکسی بافتی و در نتیجه کاهش تولید ROS می شود. ورزش همچنین با افزایش فعالیت آنزیم های آنتی اکسیدانی مانند SOD، GPx و CAT، سیستم دفاعی بدن را تقویت می کند و در درازمدت تعادل اکسیدانی را به حالت طبیعی نزدیک تر می سازد (Taherkhani et al., 2021). افزون بر اثرات آنتی اکسیدانی، ورزش نقش مهمی در کاهش التهاب مزمن در جبهه پایین مرتبط با چاقی دارد. تمرینات هوازی با شدت متوسط می توانند سطوح سایتوکاین های ضدالتهابی مانند IL-10 را افزایش داده و همزمان غلظت سایتوکاین های پیش التهابی مانند TNF- α و IL-6 را که به صورت مزمن در افراد دارای اضافه وزن بالا هستند، کاهش دهند (Meuffels et al., 2022). هر چند IL-6 در حین ورزش افزایش می یابد، اما این افزایش ماهیتی ضدالتهابی دارد زیرا IL-6 عضله زاد تحریک کننده IL-10 و مهارکننده TNF- α است و این تفاوت با افزایش IL-6 ناشی از التهاب مزمن چاقی کاملاً متمایز است. ورزش با افزایش حساسیت انسولینی، کاهش چربی احشایی و بهبود عملکرد اندوتلیال، زمینه التهاب سیستمیک را کاهش می دهد، زیرا چربی احشایی یکی از اصلی ترین

منابع ترشح سایتوکاین های مخرب متابولیک است (Putera et al., ۲۰۲۳). در همین راستا، شواهد نشان می دهد که ورزش می تواند نسبت ماکروفاژهای M۱ به M۲ را در بافت چربی تغییر دهد و این تغییر به تعدیل التهاب کمک می کند (Valaei et al., ۲۰۲۱). این اثرات ضدالتهابی ورزش در طولانی مدت موجب کاهش CRP، کاهش سطوح استرس اکسیداتیو و بهبود کامل تر ظرفیت متابولیکی می شود، به طوری که افراد دارای اضافه وزن پس از دوره های تمرینی هم در سلامت سلولی و هم در شاخص های بالینی مانند حساسیت انسولین و پروفایل لیپیدی بهبود چشمگیری نشان می دهند (Montazer et al., ۲۰۲۱). تمرینات هوازی به طور ویژه یکی از مهم ترین انواع فعالیت های بدنی در کاهش وزن و بهبود عملکرد متابولیک افراد دارای اضافه وزن محسوب می شوند. این نوع تمرینات با افزایش مصرف اکسیژن، تقویت ظرفیت میتوکندریایی و افزایش اکسیداسیون اسیدهای چرب، نقش کلیدی در مدیریت چاقی دارند. تمرینات هوازی متوسط تا شدید می توانند میزان MDA (شاخص پراکسیداسیون لیپیدی) را کاهش داده و سطوح آنتی اکسیدانی مانند GSH را افزایش دهند (Shamsnia et al., ۲۰۲۳). علاوه بر این، یافته ها نشان می دهد که تمرینات هوازی منظم می توانند فعالیت مسیر Nrf۲ را افزایش دهند، مسیری که نقش مهمی در پاسخ آنتی اکسیدانی دارد (Shamsnia et al., ۲۰۲۳). در افراد دارای اضافه وزن، تمرین هوازی با کاهش التهاب عضلانی و کاهش تجمع چربی های بین ماهیچه ای، ظرفیت متابولیک عضلات را بهبود می بخشد. مطالعات نشان داده اند که حتی دوره های کوتاه تمرینات هوازی نیز می توانند موجب بهبود شاخص های حساسیت انسولینی و کاهش مقاومت انسولین شوند. تمرین هوازی همچنین به دلیل نقش در بهبود جریان خون محیطی موجب کاهش آسیب اکسیداتیو ناشی از هیپوکسی بافتی می شود (Rojano-Ortega, ۲۰۲۱). در کنار تمرینات هوازی، تمرینات مقاومتی نیز نقش قابل توجهی در بهبود وضعیت متابولیک دارند. تمرینات مقاومتی علاوه بر افزایش توده عضلانی، ظرفیت بافت ها را برای مصرف گلوکز افزایش می دهند و این امر موجب کاهش مقاومت انسولینی می شود. از آن جا که عضله اسکلتی مهم ترین عضو مصرف کننده گلوکز است، افزایش توده عضلانی می تواند تأثیر چشمگیری بر تعادل گلوکز و چربی داشته باشد. مطالعات نیز نشان داده اند که تمرینات مقاومتی می توانند سطوح سایتوکاین های التهابی را کاهش دهند و همزمان سطوح هورمون های ضدالتهابی را افزایش دهند (Bonetti et al., ۲۰۲۲). همچنین، تمرینات مقاومتی موجب افزایش تولید آنتی اکسیدان های درون زوا و کاهش استرس اکسیداتیو می شوند زیرا تحریک مکانیکی عضله باعث فعال سازی مسیرهای ترمیم سلولی و متابولیک شده و ظرفیت آن را برای مقابله با ROS افزایش می دهد (Capozzi et al., ۲۰۲۲).

در سال های اخیر، تمرینات تناوبی با شدت بالا (HIIT) به عنوان یکی از کارآمدترین روش های ورزشی برای افراد دارای اضافه وزن شناخته شده اند. HIIT با دوره های کوتاه فعالیت های بسیار شدید و فواصل استراحت یا فعالیت سبک، موجب تحریک شدید مسیرهای متابولیک و افزایش چشمگیر ظرفیت میتوکندریایی می شود. مطالعات نشان داده اند که HIIT حتی در مدت زمان های کوتاه تر نسبت به تمرینات هوازی مداوم، تأثیر بیشتری بر کاهش چربی بدن و بهبود حساسیت انسولینی دارد (Gawel et al., ۲۰۲۴). همچنین موجب فعال سازی شدید مسیر PGC-۱ α می شود که این مسیر عامل اصلی بیوژنز میتوکندری است. بهبود عملکرد میتوکندری در آخر منجر به کاهش تولید ROS و افزایش ظرفیت بدن برای خنثی سازی رادیکال های آزاد می شود. افزون بر این،

HIIT ظرفیت آنتی اکسیدانی عضله را افزایش داده و باعث می شود بدن در مواجهه با استرس های متابولیک روزانه مقاوم تر شود. HIIT همچنین با کاهش چربی احشایی، یکی از عوامل کلیدی التهاب مزمن را کاهش می دهد و از این طریق اثرات ترکیبی قابل توجهی بر کاهش التهاب سیستمیک دارد. به طور کلی، ورزش یکی از مؤثرترین مداخلات برای بهبود عملکرد متابولیک، کاهش التهاب و کنترل استرس اکسیداتیو در افراد دارای اضافه وزن است و نوع تمرین می تواند بسته به هدف مداخله انتخاب شود. تمرینات هوازی برای کاهش وزن و بهبود ظرفیت قلبی-تنفسی، تمرینات مقاومتی برای افزایش توده عضلانی و حساسیت انسولینی، و HIIT برای بهبود سریع تر شاخص های متابولیک بسیار مؤثر هستند. نتایج حاصل از پژوهش ها نشان می دهد که ترکیب انواع تمرینات بهترین تأثیر را بر کاهش استرس اکسیداتیو و التهاب دارد (Meuffels et al., ۲۰۲۲). این یافته ها تأکید می کنند که ورزش نه تنها یک ابزار کاهش وزن، بلکه یک مداخله جامع برای بهبود سلامت سلولی و عملکرد متابولیکی بدن است.

۴. نقش مکمل های تغذیه ای در بهبود وضعیت اکسیداتیو و متابولیک افراد دارای اضافه وزن

مکمل های تغذیه ای در سال های اخیر به عنوان یکی از ابزارهای مهم در کاهش استرس اکسیداتیو، التهاب و بهبود عملکرد متابولیک در افراد دارای اضافه وزن مورد توجه قرار گرفته اند. افزایش تولید رادیکال های آزاد، اختلال در عملکرد میتوکندری و التهاب مزمن درجه پایین از شاخص ترین پیامدهای فیزیولوژیکی چاقی هستند و بسیاری از مکمل های تغذیه ای با هدف مداخله در این مسیرها طراحی شده اند. مکمل های آنتی اکسیدانی مانند ویتامین C، ویتامین E، سلنیوم و کوآنزیم Q10 برای مدت طولانی به عنوان حمایت کننده های اصلی دفاع آنتی اکسیدانی بدن مطرح بوده اند و مطالعات متعددی نشان داده اند که مصرف این ترکیبات می تواند ظرفیت خنثی سازی ROS را افزایش داده و سطح آسیب های اکسیداتیو مانند پراکسیداسیون لیپیدها را کاهش دهد (Taherkhani et al., ۲۰۲۱). همچنین مشخص شده است که آنتی اکسیدان ها می توانند با تعدیل پاسخ های التهابی، کاهش فعالیت NF-κB و کاهش ترشح TNF-α و IL-6 در بدن، اثرات مخرب چاقی بر سیستم ایمنی و متابولیک را کاهش دهند (Valaei et al., ۲۰۲۱). اگرچه اثر آنتی اکسیدان ها بسته به وضعیت تغذیه ای فرد، دوز مصرفی و مدت مصرف متفاوت است، اما شواهد موجود نشان می دهد که در افراد دارای اضافه وزن که معمولاً دچار کاهش ظرفیت آنتی اکسیدانی هستند، مصرف مکمل های آنتی اکسیدانی می تواند نقش معناداری در بهبود وضعیت دفاعی بدن داشته باشد.

یکی از رایج ترین مکمل های مورد استفاده در حوزه کاهش وزن و کنترل استرس اکسیداتیو، عصاره چای سبز است. این عصاره سرشار از پلی فنول ها به ویژه اپی گالوکتشین گالات (EGCG) بوده که یکی از قوی ترین آنتی اکسیدان های طبیعی به شمار می رود. مطالعات سیستماتیک و متاآنالیزها نشان داده اند که مصرف چای سبز می تواند موجب کاهش معنی دار وزن بدن، افزایش آنتی اکسیدان های درون زار، کاهش MDA و کاهش هورمون های مرتبط با چاقی مانند لپتین شود (Asbaghi et al., ۲۰۲۴). چای سبز همچنین به دلیل اثراتش بر افزایش فعالیت AMPK، بهبود عملکرد میتوکندری و افزایش اکسیداسیون چربی، یک مکمل مؤثر برای افرادی است که دچار اضافه وزن هستند. علاوه بر این، شواهد نشان می دهد مصرف منظم چای سبز می تواند ظرفیت آنتی اکسیدانی کل بدن را

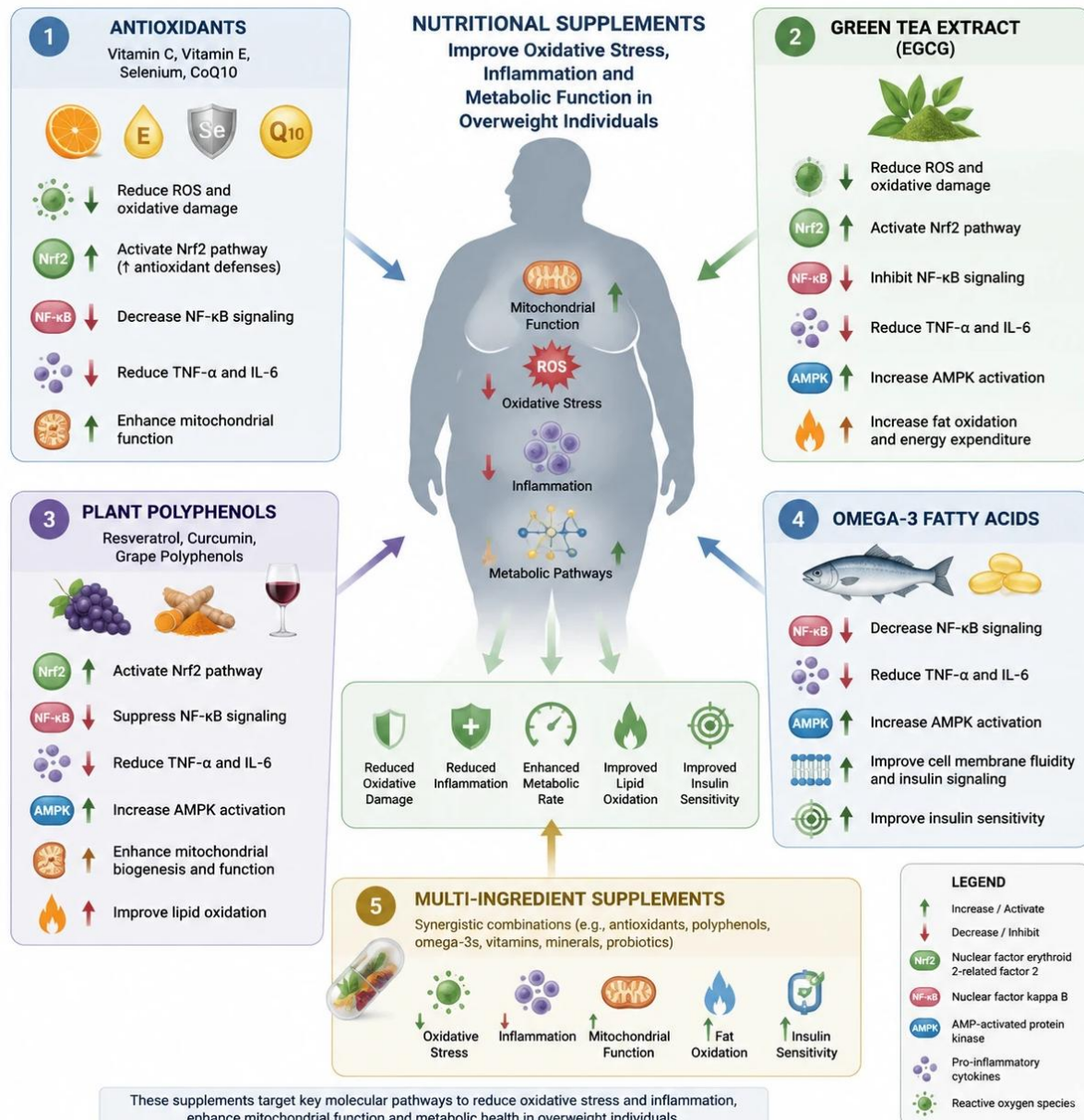
افزایش دهد و سطح آسیب های اکسیداتیو ناشی از ورزش را نیز کاهش دهد (Rojano-Ortega, ۲۰۲۱). این یافته ها نشان می دهد که چای سبز نه تنها پاسخ های التهابی مرتبط با چاقی را تعدیل می کند، بلکه یک محافظ قوی در برابر استرس های ناشی از فعالیت بدنی است که بسیار برای افراد دارای اضافه وزن مفید خواهد بود.

مکمل های شامل پلی فنول های گیاهی مانند رزوراترول، کورکومین، پلی فنول های انگور و فلاونوئیدها نیز در سال های اخیر توجه بیشتری را به خود جلب کرده اند. این ترکیبات قادرند مسیر Nrf2-Keap1 را فعال کنند، سیستمی که نقش کلیدی در تنظیم دفاع آنتی اکسیدانی دارد و در افراد چاق معمولاً دچار اختلال است (Shamsnia et al., ۲۰۲۳). پلی فنول ها همچنین با کاهش التهاب عضلانی، بهبود جریان خون، تقویت عملکرد میتوکندری و افزایش تولید آنزیم های آنتی اکسیدانی، اثرات قابل توجهی در بهبود کیفیت عملکرد عضلات افراد دارای اضافه وزن نشان داده اند (Capozzi et al., ۲۰۲۲). برای مثال پلی فنول های انگور علاوه بر اثرات آنتی اکسیدانی، نقش مهمی در کاهش آسیب عضلانی ناشی از التهاب داشته و می توانند ظرفیت تمرینی افراد چاق را افزایش دهند، به ویژه افرادی که ورزش های شدید را آغاز می کنند و نیاز به یک حمایت آنتی اکسیدانی قوی دارند. این ترکیبات همچنین قادرند مسیرهای مرتبط با بیان ژن های آنتی اکسیدانی را تقویت کرده و از تخریب سلولی ناشی از چاقی جلوگیری کنند.

در کنار آنتی اکسیدان ها، اسیدهای چرب امگا ۳ یکی از مهم ترین مکمل های مورد استفاده برای کاهش التهاب سیستمیک هستند. امگا ۳ با تنظیم سنتز ایکوزانوئیدها و پروستاگلاندین های ضد التهابی، می تواند سطوح CRP، TNF- α و سایر شاخص های التهابی را به طور قابل توجهی کاهش دهد (Montazer et al., ۲۰۲۱). افزون بر این، امگا ۳ قادر است حساسیت انسولینی را افزایش داده و عملکرد متابولیک بدن را بهبود بخشد. مطالعات نشان داده اند که ترکیب تمرینات هوازی با مصرف امگا ۳ می تواند اثرات ضد التهابی قوی تری نسبت به هر کدام به تنهایی ایجاد کند، زیرا امگا ۳ التهاب زمینه ای را کاهش می دهد و ورزش می تواند پاسخ های سلولی و متابولیکی را بهبود بخشد. مکمل های امگا ۳ همچنین در کاهش چربی کبد، بهبود ترکیب بدنی و کاهش مقاومت انسولینی افراد چاق مؤثر بوده اند، موضوعی که اهمیت آن در مدیریت سندرم متابولیک بسیار حیاتی است (Putera et al., ۲۰۲۳).

یکی از مکمل هایی که در حوزه کاهش چربی بدن و بهبود التهاب مورد توجه قرار گرفته، اسید لینولئیک کونژوگه (CLA) است. این ترکیب با افزایش اکسیداسیون چربی، کاهش ذخیره چربی و تنظیم مسیرهای التهابی، یکی از مکمل های متداول برای کاهش وزن محسوب می شود. مطالعات نشان داده اند CLA قادر است با کاهش TNF- α ، کاهش ROS و کاهش تجمع چربی در بافت های محیطی، اثرات محافظتی قابل توجهی در افراد دارای اضافه وزن داشته باشد (Putera et al., ۲۰۲۳). این مکمل همچنین ممکن است با بهبود عملکرد میتوکندری و افزایش مصرف انرژی، فرآیند کاهش وزن را تسهیل کند. با این حال، برخی نتایج در مورد اثربخشی CLA متناقض بوده اند که احتمالاً به دلیل تفاوت در ایزومرهای مصرفی، دوز و مدت مداخله است. در سال های اخیر مکمل های چندجزئی (multi-ingredient) به دلیل اثرات ترکیبی و هم افزای آن ها بسیار مطرح شده اند. این مکمل ها معمولاً شامل ترکیبی از محرک های متابولیک، آنتی اکسیدان ها، عصاره های گیاهی و مواد مؤثر بر انرژی هستند. مطالعات کارآزمایی بالینی نشان داده اند که مصرف مکمل های چند ترکیبی می تواند کاهش وزن، کاهش چربی بدن و بهبود ترکیب بدنی را در مدت زمان کوتاه تری نسبت به

سایر مکملها ایجاد کند، زیرا ترکیبات موجود در آنها از چند مسیر مختلف بر تنظیم انرژی اثر می گذارند (Nederveen et al., ۲۰۲۳). این مکملها علاوه بر تأثیرات آنتی اکسیدانی و ضدالتهابی، می توانند سطح انرژی را افزایش دهند، متابولیسم پایه را بالا ببرند و از طریق تحریک لیپولیز به کاهش چربی کمک کنند.



شکل ۳. نقش انواع مکمل های تغذیه ای در بهبود استرس اکسیداتیو، التهاب و عملکرد متابولیک در افراد دارای اضافه وزن

شکل ۳ به صورت شماتیک نقش مهم ترین مکمل های تغذیه ای مؤثر بر استرس اکسیداتیو، التهاب و عملکرد متابولیک در افراد دارای اضافه وزن را نشان می دهد. در این مدل، انواع مختلف مکمل ها شامل آنتی اکسیدان ها (ویتامین C، ویتامین E، سلنیوم و کوآنزیم Q10)، عصاره چای سبز حاوی EGCG، پلی فنول های گیاهی مانند رزوراترول و کورکومین، اسیدهای چرب امگا-۳، اسید لینولئیک کونژوگه (CLA) و مکمل های چند ترکیبی نمایش داده شده اند. این ترکیبات از طریق مکانیسم های مختلفی مانند کاهش تولید گونه های فعال اکسیژن (ROS)، مهار مسیرهای التهابی نظیر NF-KB، فعال سازی مسیر آنتی اکسیدانی Nrf2، بهبود عملکرد میتوکندری، افزایش اکسیداسیون اسیدهای چرب و بهبود حساسیت انسولینی عمل می کنند. در نتیجه این اثرات، سطح استرس اکسیداتیو و التهاب کاهش یافته و عملکرد متابولیک بدن در افراد دارای اضافه وزن بهبود می یابد. همچنین در این شکل نشان داده شده است که ترکیب مصرف مکمل های تغذیه ای با فعالیت بدنی منظم می تواند اثرات هم افزای قابل توجهی در بهبود سلامت متابولیک ایجاد کند.

نتایج نشان می دهد که مکمل های چند ترکیبی برای افرادی که تمرینات شدید یا HIIT انجام می دهند می توانند گزینه مناسبی برای افزایش بازده تمرینی باشند. به طور کلی، مکمل های تغذیه ای نقش مهمی در بهبود وضعیت اکسیداتیو و متابولیک افراد دارای اضافه وزن دارند، اما انتخاب نوع مکمل، دوز مناسب و ترکیب آن با ورزش اهمیت زیادی دارد. اگرچه مکمل ها به تنهایی قادر به ایجاد یک تغییر بنیادین نیستند، اما می توانند در کنار ورزش و رژیم غذایی سالم اثرات درمانی قدرتمندی داشته باشند (Bonetti et al., 2022). درک مکانیسم های اثرگذاری مکمل ها و شناسایی ترکیبات مؤثر در کاهش التهاب و استرس اکسیداتیو کمک می کند تا پروتکل های دقیق تری برای افراد دارای اضافه وزن طراحی شود و نتایج پایدارتر و مؤثرتری به دست آید.

۵. اثرات ترکیبی ورزش و مکمل های تغذیه ای در افراد دارای اضافه وزن

ترکیب ورزش با مکمل های تغذیه ای در سال های اخیر به عنوان یکی از راهبردهای نوین و چندبعدی برای مدیریت اختلالات متابولیک، استرس اکسیداتیو و التهاب مزمن در افراد دارای اضافه وزن مورد توجه فراوان قرار گرفته است. اگرچه ورزش به تنهایی قادر است بسیاری از شاخص های فیزیولوژیک مرتبط با چاقی را بهبود بخشد و مکمل های تغذیه ای نیز به طور مستقل می توانند در تعدیل برخی مسیرهای اکسیداتیو و التهابی مؤثر باشند، اما شواهد فزاینده نشان می دهد که ترکیب این دو مداخله در بسیاری از موارد اثراتی هم افزا و کامل تر از مداخلات منفرد ایجاد می کند. منطق این اثر هم افزا در آن است که ورزش از طریق تحریک مسیرهای پیام رسان سلولی مانند AMPK، PGC-1α و SIRT1، بیوژنز میتوکندری، حساسیت انسولینی و اکسیداسیون چربی را افزایش می دهد، در حالی که مکمل های تغذیه ای می توانند هم زمان با کاهش رادیکال های آزاد، تقویت دفاع آنتی اکسیدانی، مهار التهاب و حمایت از بازسازی سلولی، شرایط مناسب تری برای پاسخ انطباقی به ورزش فراهم کنند (Verhaegen et al., 2022).

Shamsnia et al., ۲۰۲۳). در افراد دارای اضافه وزن که معمولاً با اختلال در عملکرد میتوکندری، التهاب مزمن درجه پایین، هیپوکسی بافت چربی و کاهش ظرفیت آنتی اکسیدانی مواجه اند، این مداخلات ترکیبی می توانند نه تنها آثار مکمل، بلکه در برخی موارد آثار افزایشی داشته باشند، به گونه ای که هم کیفیت پاسخ به ورزش و هم پایداری تغییرات متابولیک بهبود یابد. یکی از مهم ترین حوزه های اثرگذاری مداخلات ترکیبی، کاهش استرس اکسیداتیو است. ورزش منظم با وجود آن که در مراحل حاد می تواند تولید ROS را افزایش دهد، در بلندمدت موجب افزایش ظرفیت آنتی اکسیدانی درون زوا و بهبود تعادل ردوکس می شود؛ با این حال، در افراد دارای اضافه وزن که سطح پایه استرس اکسیداتیو در آن ها بالاست، ممکن است فشار اکسیداتیو اولیه ناشی از شروع برنامه تمرینی، خود به یک مانع برای سازگاری مطلوب تبدیل شود. در این شرایط، استفاده از مکمل هایی مانند چای سبز، زورراترول، کورکومین، ویتامین C، ویتامین E یا CoQ10 می تواند از طریق کاهش پراکسیداسیون لیپیدی، افزایش فعالیت آنزیم های آنتی اکسیدانی و فعال سازی مسیر Nrf2، محیط سلولی را برای پاسخ بهتر به ورزش آماده کند (Taherkhani et al., ۲۰۲۱). برای مثال، گزارش شده است که مصرف پلی فنول های گیاهی در کنار برنامه های تمرینی می تواند کاهش بیشتری در MDA و افزایش بیشتری در TAC و آنزیم های آنتی اکسیدانی نسبت به تمرین تنها ایجاد کند، زیرا این ترکیبات با خنثی سازی ROS اضافی و تقویت مسیرهای دفاعی، از فرسودگی آنتی اکسیدانی جلوگیری می کنند (Shamsnia et al., ۲۰۲۳). از این منظر، مکمل ها در مداخلات ترکیبی صرفاً نقش خنثی کننده رادیکال های آزاد را ندارند، بلکه می توانند فرآیند سازگاری به ورزش را در بافت هایی که از قبل دچار اختلال متابولیک بوده اند، تسهیل کنند. جنبه مهم دیگر مداخلات ترکیبی، تأثیر آن ها بر التهاب مزمن درجه پایین است که از بارزترین مشخصه های اضافه وزن و چاقی به شمار می رود. ورزش، به ویژه تمرینات هوازی و HIIT، با کاهش توده چربی احشایی، بهبود ترشح مایوکاین ها و تعدیل فعالیت ماکروفازها در بافت چربی، در کاهش سطوح TNF- α ، IL-6 التهابی و CRP مؤثر است (Meuffels et al., ۲۰۲۲). با این حال، ترکیب آن با مکمل های ضدالتهابی مانند امگا ۳، کورکومین و پلی فنول های گیاهی می تواند این اثرات را تقویت کند. امگا ۳ از طریق تنظیم مسیرهای ایکوزانوئیدی و کاهش تولید واسطه های التهابی، و کورکومین از طریق مهار NF-KB و کاهش بیان سایتوکاین های التهابی، می توانند التهاب زمینه ای را کاهش داده و پاسخ التهابی ناشی از بافت چربی را مهار کنند (Montazer et al., ۲۰۲۱; Putera et al., ۲۰۲۳). در چنین شرایطی، ورزش نه تنها بر کاهش منبع التهاب یعنی چربی احشایی اثر می گذارد، بلکه مکمل نیز شدت پاسخ التهابی را از درون تعدیل می کند. این تعامل دوگانه، به ویژه در افراد دارای اضافه وزن که معمولاً هم زمان با التهاب سیستمیک و مقاومت انسولینی مواجه اند، می تواند به بهبود عمیق تر وضعیت متابولیک منجر شود. برخی شواهد نیز نشان می دهد که ترکیب تمرین با مکمل های ضدالتهابی، نسبت به هر کدام به تنهایی، کاهش بیشتری در CRP و بهبود بیشتری در شاخص های ایمنی-التهابی ایجاد می کند (Montazer et al., ۲۰۲۱).

در زمینه عملکرد متابولیک، مداخلات ترکیبی از اهمیت ویژه ای برخوردارند، زیرا هم بر مصرف انرژی و اکسیداسیون چربی اثر می گذارند و هم بر تنظیم هورمونی و عملکرد انسولین. ورزش با افزایش برداشت گلوکز توسط عضله، فعال سازی GLUT4، افزایش

حساسیت انسولینی و کاهش چربی احشایی، یکی از قوی ترین ابزارها برای بهبود عملکرد متابولیک است. زمانی که این مداخله با مکمل هایی مانند چای سبز، CLA، امگا ۳ یا مکمل های چندجزئی همراه می شود، اثرات آن می تواند تقویت شود، زیرا بسیاری از این مکمل ها بر افزایش اکسیداسیون چربی، کاهش اشتها، بهبود عملکرد میتوکندری و تعدیل آدیپوکاین ها اثر دارند (Rojano- ۲۰۲۳، Ortega, ۲۰۲۱; Putera et al., ۲۰۲۳; Nederveen et al., ۲۰۲۳). برای مثال، چای سبز از طریق فعال سازی AMPK و افزایش ترموژنز، می تواند کاهش وزن ناشی از ورزش را تشدید کند، در حالی که CLA ممکن است از طریق بهبود لیپولیز و کاهش ذخیره چربی، به فرآیند کاهش توده چربی کمک نماید. مکمل های چندجزئی نیز که معمولاً ترکیبی از مواد محرک متابولیسم، آنتی اکسیدان ها و عصاره های گیاهی هستند، می توانند همراه با تمرین باعث افزایش بیشتر هزینه انرژی و بهبود ترکیب بدنی شوند (Nederveen et al., ۲۰۲۳). بنابراین، در سطح متابولیک، هم افزایی ورزش و مکمل ها به ویژه زمانی بیشتر نمایان می شود که هدف کاهش توده چربی، حفظ یا افزایش توده بدون چربی و بهبود شاخص هایی مانند HOMA-IR، گلوکز ناشتا و پروفایل لیپیدی باشد.

یکی از نکات مهم در بررسی اثرات ترکیبی ورزش و مکمل، تفاوت نوع تمرین و نوع مکمل در تعیین نتیجه نهایی است. برای نمونه، در افرادی که تمرینات HIIT انجام می دهند، استفاده از مکمل های آنتی اکسیدانی و پلی فنولی ممکن است به کاهش آسیب اکسیداتیو و تسریع بازسازی کمک کند، در حالی که در تمرینات استقامتی طولانی مدت، مکمل هایی مانند امگا ۳ یا CoQ10 می توانند نقش بیشتری در حمایت از عملکرد میتوکندری و کاهش التهاب عضلانی داشته باشند (Gawet et al., ۲۰۲۴; Capozzi et al., ۲۰۲۲). همچنین در تمرینات مقاومتی، استفاده از برخی مکمل های ضدالتهابی یا ترکیبات آنتی اکسیدانی می تواند بازسازی بهتر بافت عضلانی و بهبود پاسخ تمرینی را به دنبال داشته باشد. با این حال، باید توجه داشت که مصرف بیش از حد برخی آنتی اکسیدان ها ممکن است در برخی شرایط، سیگنال های فیزیولوژیک ناشی از ROS را که برای سازگاری تمرینی لازم هستند، تضعیف کند؛ بنابراین، استفاده از مکمل ها باید هدفمند، با دوز مناسب و متناسب با نوع برنامه تمرینی باشد (Bonetti et al., ۲۰۲۲). این مسئله اهمیت طراحی پروتکل های فردمحور را نشان می دهد، زیرا افراد دارای اضافه وزن از نظر شدت التهاب، سطح آمادگی جسمانی، الگوی تغذیه ای و پاسخ به مکمل ها تفاوت های قابل توجهی دارند. در مجموع، شواهد نشان می دهد که اثرات ترکیبی ورزش و مکمل های تغذیه ای در افراد دارای اضافه وزن، فراتر از جمع ساده دو مداخله است و می تواند به بهبود هم زمان وضعیت اکسیداتیو، التهاب و عملکرد متابولیک منجر شود. ورزش از طریق فعال سازی سازوکارهای فیزیولوژیک و متابولیکی، زمینه اصلاح اختلالات ناشی از اضافه وزن را فراهم می کند و مکمل ها با تقویت سیستم آنتی اکسیدانی، کاهش التهاب و حمایت از بازسازی سلولی، این پاسخ ها را پایدارتر و مؤثرتر می سازند (Verhaegen et al., ۲۰۲۲; Asbaghi et al., ۲۰۲۴; Putera et al., ۲۰۲۳). با این حال، هنوز برای تعیین بهترین ترکیب نوع تمرین، شدت، مدت زمان و نوع مکمل، به مطالعات مداخله ای بیشتری نیاز است؛ به ویژه پژوهش هایی که به طور اختصاصی در جمعیت های دارای اضافه وزن و با کنترل دقیق متغیرهای

تغذیه‌ای و تمرینی انجام شوند. با وجود این محدودیت‌ها، شواهد فعلی به‌وضوح از این ایده حمایت می‌کنند که رویکرد ترکیبی ورزش و مکمل‌های تغذیه‌ای می‌تواند یکی از مؤثرترین راهبردها برای کنترل پیامدهای متابولیک و التهابی اضافه‌وزن باشد.

جدول ۱. خلاصه اثرات ترکیبی ورزش و مکمل‌های تغذیه‌ای در افراد دارای اضافه‌وزن

نوع مداخله	مکانیسم‌های اصلی اثرگذاری	پیامدهای فیزیولوژیک
ورزش هوازی + پلی‌فنول‌ها	افزایش ظرفیت آنتی‌اکسیدانی، فعال‌سازی AMPK، کاهش MDA، تقویت Nrf2، بهبود اکسیداسیون چربی	کاهش استرس اکسیداتیو، افزایش TAC، بهبود حساسیت انسولینی
ورزش هوازی/ HIIT + امگا ۳	کاهش واسطه‌های التهابی، تنظیم ایکوزانوئیدها، بهبود غشاء سلولی، بهبود پاسخ میتوکندری	کاهش CRP، IL-6 و TNF- α ، کاهش چربی احشایی
تمرین مقاومتی + کورکومین	مهار مسیر NF-KB، کاهش التهاب عضلانی، تسریع بازسازی بافت عضله، کاهش آسیب‌های ناشی از ROS	کاهش التهاب سیستمیک، بهبود قدرت و عملکرد عضلانی
تمرینات HIIT + آنتی‌اکسیدان‌ها	کاهش آسیب اکسیداتیو ناشی از تمرین شدید، تقویت فعالیت آنزیم‌های آنتی‌اکسیدانی، حفظ تعادل ردوکس	کاهش پراکسیداسیون لیپیدی، بهبود آمادگی قلبی-تنفسی
تمرینات هوازی + CLA	افزایش لیپولیز، کاهش تجمع چربی، بهبود اکسیداسیون چربی و فعالیت متابولیک میتوکندری	کاهش درصد چربی بدن، بهبود ترکیب بدنی
تمرینات هوازی + CoQ10	بهبود عملکرد زنجیره تنفسی میتوکندری، کاهش ROS، حمایت از باز یافت آنتی‌اکسیدانی	افزایش انرژی، کاهش خستگی، بهبود عملکرد ورزشی
مداخلات ورزشی + مکمل‌های چندجزئی	ترکیب اثرات آنتی‌اکسیدانی، ضدالتهابی و افزایش متابولیسم چربی، افزایش هزینه انرژی	بهبود وضعیت متابولیک و کاهش هم‌زمان استرس اکسیداتیو و التهاب
همه انواع ورزش + مکمل‌های آنتی‌اکسیدانی	کاهش ROS اضافی، تقویت آنزیم‌های آنتی‌اکسیدانی، حمایت از سیگنالینگ ناشی از تمرین	افزایش پاسخ سازگاری و پایداری بیشتر تغییرات متابولیک

جدول ارائه‌شده خلاصه‌ای از مهم‌ترین شواهد مربوط به اثرات هم‌افزایی ورزش و مکمل‌های تغذیه‌ای بر کاهش استرس اکسیداتیو، تعدیل التهاب و بهبود عملکرد متابولیک در افراد دارای اضافه‌وزن است. این جدول نشان می‌دهد که ترکیب انواع مختلف تمرینات ورزشی با مکمل‌های هدفمند، می‌تواند موجب ارتقای پاسخ‌های سازگاری در سطح سلولی و متابولیک شود. برای مثال، تلفیق تمرینات هوازی با پلی‌فنول‌ها یا آنتی‌اکسیدان‌های طبیعی می‌تواند ظرفیت آنتی‌اکسیدانی بدن را از طریق فعال‌سازی مسیرهایی

مانند AMPK و Nrf2 افزایش دهد و در نتیجه موجب کاهش پراکسیداسیون لیپیدی شود. همچنین ترکیب تمرینات هوازی یا HIIT با اسیدهای چرب امگا ۳ معمولاً با کاهش مارکرهای التهابی سیستمیک نظیر CRP، IL-6 و TNF- α همراه است که این امر احتمالاً از طریق تنظیم متابولیسم ایکوزانوئیدها و بهبود عملکرد غشای سلولی رخ می دهد.

تمرین مقاومتی زمانی که با مکمل هایی مانند کورکومین همراه شود، علاوه بر کاهش التهاب عضلانی ناشی از تمرین، می تواند فرآیند بازسازی بافتی و عملکرد عضلات را نیز تسهیل کند. ترکیب مکمل هایی مانند CoQ10 با فعالیت ورزشی نیز ممکن است از طریق تقویت عملکرد میتوکندری و کاهش تولید ROS، به افزایش انرژی و کاهش خستگی کمک کند. در نتیجه، مکمل های چندجزئی که حاوی ترکیبی از آنتی اکسیدان ها، اسیدهای چرب و ترکیبات ضدالتهابی هستند، معمولاً در کنار فعالیت ورزشی باعث کاهش همزمان التهاب و استرس اکسیداتیو و بهبود شاخص های متابولیک می شوند. به طور کلی، جدول نشان می دهد که انتخاب نوع مکمل باید با توجه به نوع ورزش، شدت تمرین و هدف مداخله انجام شود و مصرف بیش از حد آنتی اکسیدان ها ممکن است با مهار سیگنالینگ وابسته به ROS، برخی سازگاری های مفید تمرینی را کاهش دهد. بنابراین، رویکرد ترکیبی ورزش و مکمل باید بر اساس اصول دوز مناسب، زمان بندی صحیح و هدف گذاری متابولیک انجام شود.

۶. نتیجه گیری و پیشنهادات پژوهشی

در مجموع، شواهد موجود نشان می دهد که اضافه وزن با افزایش استرس اکسیداتیو، التهاب مزمن درجه پایین و اختلال در عملکرد متابولیک همراه است و این سه مؤلفه در یک چرخه معیوب، زمینه را برای پیشرفت مقاومت انسولینی، اختلالات لیپیدی و بیماری های مزمن فراهم می کنند. در این میان، ورزش به عنوان یک مداخله پایه و مؤثر می تواند از طریق بهبود عملکرد میتوکندری، افزایش اکسیداسیون چربی، تقویت سیستم آنتی اکسیدانی و کاهش شاخص های التهابی، بخش مهمی از این اختلالات را تعدیل کند. از سوی دیگر، مکمل های تغذیه ای نیز به ویژه در شرایطی که با رویکردی هدفمند و در کنار ورزش استفاده شوند، قادرند با کاهش آسیب اکسیداتیو، تنظیم مسیرهای التهابی و حمایت از پاسخ های متابولیک، اثربخشی مداخلات ورزشی را افزایش دهند. بنابراین، می توان گفت که رویکرد ترکیبی ورزش و مکمل های تغذیه ای، به ویژه در افراد دارای اضافه وزن، یک راهبرد چندبعدی و امیدوارکننده برای بهبود سلامت متابولیک و سلولی محسوب می شود.

با این حال، با وجود نتایج امیدوارکننده، هنوز ابهاماتی در این حوزه وجود دارد. تفاوت در نوع مکمل، دوز مصرف، مدت مداخله، ویژگی های آزمودنی ها، نوع برنامه تمرینی و شاخص های اندازه گیری شده باعث شده است که نتایج برخی مطالعات کاملاً همسو نباشد. به همین دلیل، پیشنهاد می شود پژوهش های آینده به سمت طراحی مطالعات مداخله ای دقیق تر با حجم نمونه بالاتر، دوره های پیگیری طولانی تر و مقایسه مستقیم انواع مکمل ها در کنار انواع مختلف تمرینات ورزشی حرکت کنند. همچنین بررسی پاسخ های اختصاصی زنان و مردان، گروه های سنی مختلف و افراد دارای سطوح متفاوت اضافه وزن می تواند به تدوین پروتکل های فردمحور کمک کند. بنابراین، به نظر می رسد آینده این حوزه در طراحی مداخلات ترکیبی شخصی سازی شده نهفته است؛ مداخلاتی که بر

اساس وضعیت متابولیک، سطح التهاب، الگوی تغذیه‌ای و توانایی ورزشی هر فرد تنظیم شوند تا بیشترین اثربخشی و پایداری را در کنترل عوارض اضافه‌وزن ایجاد کنند.

منابع

۱. Gaweł, E., Hall, B., Siatkowski, S., Grabowska, A., & Zwierzchowska, A. (۲۰۲۴). The combined effects of high-intensity interval exercise training and dietary supplementation on reduction of body fat in adults with overweight and obesity: a systematic review. *Nutrients*, ۱۶(۳), ۳۵۵.
۲. Nederveen, J. P., Mastrodonato, A. J., Xhuti, D., Di Carlo, A., Manta, K., Fuda, M. R., & Tarnopolsky, M. A. (۲۰۲۳). Novel multi-ingredient supplement facilitates weight loss and improves body composition in overweight and obese individuals: a randomized, double-blind, placebo-controlled clinical trial. *Nutrients*, ۱۵(۱۷), ۳۶۹۳.
۳. Taherkhani, S., Suzuki, K., & Ruhee, R. T. (۲۰۲۱). A brief overview of oxidative stress in adipose tissue with a therapeutic approach to taking antioxidant supplements. *Antioxidants*, ۱۰(۴), ۵۹۴.
۴. Valaei, K., Taherkhani, S., Arazi, H., & Suzuki, K. (۲۰۲۱). Cardiac oxidative stress and the therapeutic approaches to the intake of antioxidant supplements and physical activity. *Nutrients*, ۱۳(۱۰), ۳۴۸۳.
۵. Asbaghi, O., Kelishadi, M. R., Larky, D. A., Bagheri, R., Amirani, N., Goudarzi, K., ... & Zamani, M. (۲۰۲۴). The effects of green tea extract supplementation on body composition, obesity-related hormones and oxidative stress markers: a grade-assessed systematic review and dose-response meta-analysis of randomised controlled trials. *British Journal of Nutrition*, ۱۳۱(۷), ۱۱۲۵-۱۱۵۷.
۶. Shamsnia, E., Matinhomae, H., Azarbayjani, M. A., & Peeri, M. (۲۰۲۳). The effect of aerobic exercise and bitter orange peel extract on oxidative biomarkers and the Nrf^۲-Keap^۱ signaling pathway in the quadriceps tissue of male rats fed a high-fat diet. *Gene, Cell and Tissue*, ۱۱(۱۱).
۷. Putera, H. D., Doewes, R. I., Shalaby, M. N., Ramírez-Coronel, A. A., Clayton, Z. S., Abdelbasset, W. K., ... & Pahlavani, N. (۲۰۲۳). The effect of conjugated linoleic acids on inflammation, oxidative stress, body composition and physical performance: a comprehensive review of putative molecular mechanisms. *Nutrition & Metabolism*, ۲۰(۱), ۳۵.
۸. Bonetti, G., Herbst, K. L., Donato, K., Dhuli, K., Kiani, A. K., Aquilanti, B., ... & Bertelli, M. (۲۰۲۲). Dietary supplements for obesity. *Journal of preventive medicine and hygiene*, ۶۳(۲ Suppl ۳), E۱۶۰.
۹. Montazer, S., Gholami, M., Azarbayjani, M. A., & Abed Natanzi, H. (۲۰۲۱). Effects of aerobic training and omega-۳ supplementation on the levels of CRP, MDA and lipid profile in overweight and obese women. *J Bas Res Med Sci*, ۸(۴), ۶۰-۷۰.
۱۰. Meuffels, F. M., Isenmann, E., Strube, M., Lesch, A., Oberste, M., & Brinkmann, C. (۲۰۲۲). Exercise interventions combined with dietary supplements in type ۲ diabetes mellitus patients—a systematic review of relevant health outcomes. *Frontiers in Nutrition*, ۹, ۸۱۷۷۲۴.
۱۱. Capozzi, A., Saucier, C., Bisbal, C., & Lambert, K. (۲۰۲۲). Grape polyphenols in the treatment of human skeletal muscle damage due to inflammation and oxidative stress during obesity and aging: Early outcomes and promises. *Molecules*, ۲۷(۱۹), ۶۵۹۴.
۱۲. Rojano-Ortega, D. (۲۰۲۱). Regular, but not acute, green tea supplementation increases total antioxidant status and reduces exercise-induced oxidative stress: a systematic review. *Nutrition Research*, ۹۴, ۳۴-۴۳.

۱۳. Shamsnia, E., Matinhomae, H., Azarbayjani, M. A., & Peeri, M. (۲۰۲۳). The effect of aerobic exercise on oxidative stress in skeletal muscle tissue: A narrative review. *Gene Cell Tissue*, ۱۰(۴), e۱۳۱۹۶۴.
۱۴. Wojcik-Grzybek, D., Hubalewska-Mazgaj, M., Surmiak, M., Sliwowski, Z., Dobrut, A., Mlodzinska, A., ... & Brzozowski, T. (۲۰۲۲). The combination of intestinal alkaline phosphatase treatment with moderate physical activity alleviates the severity of experimental colitis in obese mice via modulation of gut microbiota, attenuation of proinflammatory cytokines, oxidative stress biomarkers and DNA oxidative damage in colonic mucosa. *International journal of molecular sciences*, ۲۳(۶), ۲۹۶۴.
۱۵. Kalogerakou, T., & Antoniadou, M. (۲۰۲۴). The role of dietary antioxidants, food supplements and functional foods for energy enhancement in healthcare professionals. *Antioxidants*, ۱۳(۱۲), ۱۵۰۸.
۱۶. Verhaegen, D., Smits, K., Osório, N., & Caseiro, A. (۲۰۲۲). Oxidative stress in relation to aging and exercise. *Encyclopedia*, ۲(۳), ۱۵۴۵-۱۵۵۸.
۱۷. Cauci, S., Xodo, S., Buligan, C., Colaninno, C., Barbina, M., Barbina, G., & Francescato, M. P. (۲۰۲۱). Oxidative stress is increased in combined oral contraceptives users and is positively associated with high-sensitivity C-reactive protein. *Molecules*, ۲۶(۴), ۱۰۷۰.
۱۸. Bhattacharya, K., Dey, R., Sen, D., Paul, N., Basak, A. K., Purkait, M. P., ... & Syamal, A. K. (۲۰۲۴). Polycystic ovary syndrome and its management: In view of oxidative stress. *Biomolecular Concepts*, ۱۵(۱), ۲۰۲۲۰۰۳۸.