

از انرژی تا استقامت: تحلیل تطبیقی نقش کراتین، کافئین و بتا آلانین در فیزیولوژی عملکرد عضلات

(تاریخ دریافت ۱۴۰۴/۰۷/۱۵ تاریخ تصویب ۱۴۰۴/۰۸/۰۴)

نیلوفر بابازاده میری

چکیده

هدف این مقاله، تحلیل تطبیقی نقش سه مکمل ورزشی کلیدی - کراتین، کافئین و بتا آلانین - در فیزیولوژی عملکرد عضلات است. عملکرد عضلانی به عنوان یکی از پایه‌های اصلی موفقیت ورزشی، تحت تأثیر ذخایر انرژی، کارایی عصبی-عضلانی و توانایی بدن در مقابله با خستگی قرار دارد. مکمل‌های یادشده هر یک از طریق مسیرهای متفاوتی موجب بهبود این شاخص‌ها می‌شوند. کراتین با افزایش ذخایر فسفو کراتین عضله، بازسازی سریع‌تر ATP را ممکن ساخته و توان انفجاری و قدرت بیشینه را در فعالیت‌های پر شدت افزایش می‌دهد. کافئین از طریق مهار گیرنده‌های آدنوزین در سیستم عصبی مرکزی، هوشیاری و تمرکز را ارتقا داده و درک ذهنی از خستگی را کاهش می‌دهد؛ در نتیجه، عملکرد هوازی و استقامتی به‌ویژه در فعالیت‌های طولانی مدت بهبود می‌یابد. از سوی دیگر، بتا آلانین با افزایش سطح کارنوزین عضلانی و تقویت بافرینگ یون‌های هیدروژن، موجب حفظ pH عضله و تأخیر در بروز خستگی در تمرینات شدید می‌گردد. نتایج مطالعات نشان می‌دهد که این سه مکمل در عین تفاوت در مکانیسم اثر، می‌توانند اثرات مکمل و سینرژیک بر یکدیگر داشته باشند؛ به‌ویژه ترکیب کراتین و بتا آلانین در فعالیت‌های بی‌هوازی شدید و افزودن کافئین برای بهبود تمرکز ذهنی و استقامت بدنی. با این حال، مصرف آگاهانه و مبتنی بر شواهد علمی ضروری است، زیرا دوزهای بالا یا مصرف نادرست می‌تواند عوارض گوارشی، قلبی یا عصبی به همراه داشته باشد. در مجموع، درک فیزیولوژیکی از نقش این مکمل‌ها می‌تواند به طراحی راهبردهای تغذیه‌ای مؤثرتر برای ارتقای عملکرد ورزشی کمک کند.

واژگان کلیدی: کراتین، کافئین، بتا آلانین، عملکرد عضلانی، فیزیولوژی ورزشی

۱. مقدمه

عملکرد عضلانی یکی از ارکان اساسی موفقیت در فعالیت‌های ورزشی محسوب می‌شود، زیرا توانایی تولید نیرو، استقامت و هماهنگی عصبی-عضلانی نقش مستقیم در اجرای مؤثر مهارت‌های حرکتی دارد. مطالعات نشان داده‌اند که ظرفیت عضلانی نه تنها بر شاخص‌های عملکردی مانند سرعت، پرش و توان انفجاری تأثیر می‌گذارد، بلکه در حفظ استقامت در فعالیت‌های طولانی مدت نیز نقشی حیاتی ایفا می‌کند (سوچومل^۱، ۲۰۱۶). عضله اسکلتی به عنوان بافت اصلی تولیدکننده نیرو در بدن، از فیبرهای عضلانی، ساختارهای عصبی و شبکه‌های متابولیکی پیچیده تشکیل شده است که هماهنگی آن‌ها برای دستیابی به حداکثر کارایی ضروری است (اسنایدرز و وردیک^۲، ۲۰۱۹). بنابراین، درک فیزیولوژی عملکرد عضلات می‌تواند به شناسایی عواملی که موجب افزایش یا کاهش کارایی ورزشی می‌شوند کمک کند.

با وجود سازوکارهای طبیعی تنظیم عملکرد، ورزشکاران در جریان تمرینات یا رقابت‌های سنگین با چالش‌های فیزیولوژیکی متعددی روبه‌رو هستند. مهم‌ترین این چالش‌ها شامل خستگی عضلانی، کاهش ذخایر انرژی، افزایش اسیدوز متابولیک و افت کارایی عصبی-عضلانی است (آلن^۳، ۲۰۰۸). در واقع، خستگی عضلانی نتیجه‌ی برهم خوردن تعادل میان تولید و مصرف انرژی در فیبرهای عضلانی و تجمع متابولیت‌هایی چون یون هیدروژن و فسفات غیرآلی است که منجر به کاهش توان انقباضی می‌شود (انوکا و دوشاتو^۴، ۲۰۱۶).

^۱ Suchomel

^۲ Snijders & Verdijk

^۳ Allen

^۴ Enoka & Duchateau

افزون بر این، در فعالیت های استقامتی، عواملی همچون ظرفیت حمل اکسیژن، کارایی میتوکندریایی و آستانه تجمع لاکتات نیز در محدودسازی عملکرد نقش دارند (باست و هاولی^۱، ۲۰۰۰).

در پاسخ به این چالش ها، پژوهشگران و متخصصان علوم ورزشی به بررسی راهکارهایی برای بهینه سازی عملکرد فیزیولوژیکی عضلات پرداخته اند. یکی از راهکارهای مؤثر، استفاده آگاهانه از مکمل های ورزشی است. مکمل هایی مانند کراتین، کافئین و بتا آلانین به دلیل سازوکارهای متفاوت خود در مسیرهای انرژی زایی، تحریک عصبی و کنترل اسیدپته عضلانی، جایگاه ویژه ای در میان ورزشکاران پیدا کرده اند (موگان^۲، ۲۰۱۸). مطالعات متعدد نشان داده اند که کراتین با افزایش ذخیره فسفو کراتین در عضله، بازسازی سریع تر ATP را در فعالیت های پر شدت ممکن می سازد؛ کافئین با اثر بر سیستم عصبی مرکزی باعث کاهش درک خستگی و افزایش بیداری می شود؛ و بتا آلانین با افزایش سطح کارنوزین عضلانی به تنظیم pH در فعالیت های بی هوازی کمک می کند (ترکسلر و همکاران، ۲۰۱۵؛ گرجیک و همکاران، ۲۰۲۰^۳).

بنابراین، هدف اصلی این مقاله بررسی تطبیقی و تحلیلی نقش سه مکمل یاد شده در فیزیولوژی عملکرد عضلانی است. مقاله حاضر ابتدا مبانی نظری عملکرد عضلات را مرور می کند، سپس به بررسی جداگانه هر مکمل از نظر سازوکار، تأثیرات عملکردی و ملاحظات ایمنی می پردازد، و در ادامه، تحلیل تطبیقی میان آن ها ارائه می دهد. در پایان، ملاحظات اخلاقی و ایمنی مصرف مکمل ها و پیشنهادهایی برای تحقیقات آینده مطرح می شود.

^۱ Bassett & Howley

^۲ Maughan

^۳ Trexler; Grgic

۲. مبانی نظری

عضله اسکلتی به عنوان بزرگ ترین بافت فعال متابولیکی در بدن، نقش اساسی در حرکت، حفظ وضعیت بدنی و تولید نیرو دارد. این بافت از واحدهای ساختاری به نام فیبرهای عضلانی تشکیل شده است که هر یک حاوی هزاران میوفیبریل بوده و از سارکومرها (واحدهای عملکردی انقباض) تشکیل می شوند (لیبر و وارد^۱، ۲۰۱۱). انقباض عضله از طریق برهم کنش بین رشته های اکتین و میوزین و تحت کنترل سیستم عصبی حرکتی انجام می گیرد. در این فرآیند، آزاد شدن یون کلسیم از شبکه سارکوپلاسمی، موجب فعال سازی اتصال های عرضی^۲ و آغاز چرخه انقباض می شود (هاکسلی^۳، ۲۰۰۴).

از دیدگاه فیزیولوژیکی، فیبرهای عضلانی به دو نوع اصلی تقسیم می شوند: فیبرهای نوع I (کندانقباض) که بیشتر در فعالیت های استقامتی فعال اند، و فیبرهای نوع II (تندانقباض) که در فعالیت های قدرتی و پر شدت مشارکت دارند (اسکیافینو و رجیانی^۴، ۲۰۱۱). نسبت این فیبرها در افراد مختلف، تحت تأثیر ژنتیک و نوع تمرین است و تا حدی تعیین کننده ظرفیت عملکرد ورزشی آنها محسوب می شود.

منبع اصلی انرژی برای انقباض عضلانی، مولکول آدنوزین تری فسفات (ATP) است. در هنگام انقباض، شکستن پیوند فسفات پرانرژی ATP موجب آزاد شدن انرژی و تبدیل آن به آدنوزین دی فسفات (ADP) و فسفات غیرآلی (Pi) می شود (برگ^۵، ۲۰۱۹). از آنجا که ذخایر ATP در عضله محدود است (در حدود ۲-۳ میلی مول در هر کیلوگرم عضله)، بدن

^۱ Lieber & Ward

^۲ cross-bridges

^۳ Huxley

^۴ Schiaffino & Reggiani

^۵ Berg

برای حفظ عملکرد مداوم باید از مسیرهای مختلفی برای بازسازی ATP بهره گیرد. این بازسازی از طریق سه سیستم عمده انرژی انجام می شود: فسفاژن، گلیکولیتیک و اکسیداتیو (مک آردل^۱، ۲۰۱۹).

سیستم فسفاژن، سریع ترین منبع تولید مجدد ATP است و عمدتاً در فعالیت های با شدت بالا و کوتاه مدت (مانند دو سرعت یا وزنه برداری) فعال می شود. در این مسیر، کراتین فسفات (PCr) با انتقال گروه فسفات خود به ADP، موجب بازسازی سریع ATP می گردد (هولتمن^۲، ۱۹۶۷). ذخایر فسفو کراتین در عضله محدود بوده و طی چند ثانیه تخلیه می شود، اما با استراحت کوتاه به سرعت بازسازی می گردد. این ویژگی، پایه فیزیولوژیکی استفاده از مکمل کراتین در ورزشکاران قدرتی است (کریدر^۳ و همکاران، ۲۰۱۷).

وقتی نیاز انرژی از ظرفیت سیستم فسفاژن فراتر رود، مسیر گلیکولیتیک فعال می شود که در آن گلوکز یا گلیکوژن بدون نیاز به اکسیژن تجزیه شده و ATP تولید می شود. محصول نهایی این مسیر، اسید لاکتیک است که با افزایش غلظت یون هیدروژن موجب کاهش pH عضلانی و در نتیجه کاهش کارایی انقباضی می شود (رابرگز^۴، ۲۰۰۴).

در فعالیت های طولانی مدت یا با شدت پایین، سیستم اکسیداتیو به عنوان منبع اصلی تولید انرژی عمل می کند. این مسیر از طریق اکسیداسیون کربوهیدرات ها، چربی ها و در شرایط خاص، اسیدهای آمینه در میتوکندری، ATP را با بازده بالا تولید می کند (بروکس، ۲۰۰۵). کارایی

^۱ McArdle

^۲ Hultman

^۳ Kreider

^۴ Robergs

بالای این سیستم به حضور اکسیژن و ظرفیت میتوکندریایی وابسته است که در اثر تمرینات استقامتی بهبود می یابد.

خستگی عضلانی پدیده‌ای چندعاملی است که به کاهش توانایی عضله برای تولید نیرو اشاره دارد. این پدیده می‌تواند ناشی از عوامل محیطی، متابولیکی و عصبی باشد (فیتس، ۲۰۰۸). در سطح محیطی، تجمع متابولیت‌ها مانند یون‌های H^+ ، Pi و ADP موجب اختلال در عملکرد پروتئین‌های انقباضی و کاهش حساسیت به کلسیم می‌شود (آلن، ۲۰۰۸). در سطح مرکزی، کاهش تحریک‌پذیری نورون‌های حرکتی و کاهش انتقال عصبی می‌تواند به افت فرمان انقباضی منجر شود (گاندویا^۱، ۲۰۰۱).

همچنین، استرس اکسیداتیو و اختلال در تعادل الکترولیتی از دیگر عوامل مؤثر بر خستگی عضلانی هستند (رید^۲، ۲۰۰۸). در مجموع، توانایی بدن در مقابله با این عوامل از طریق بهبود ظرفیت بافری عضله، افزایش ذخایر انرژی و کارایی عصبی-عضلانی می‌تواند به تأخیر خستگی و حفظ عملکرد کمک کند—موضوعی که نقش مکمل‌هایی مانند بتا‌آلانین، کراتین و کافئین را در این زمینه پررنگ‌تر می‌سازد.

۳. مکمل کراتین و سازوکار فیزیولوژیکی آن

کراتین ترکیبی نیتروژنی طبیعی است که از سه اسیدآمینو گلیسین، آرژنین و متیونین تشکیل شده و به‌طور طبیعی در بدن انسان سنتز می‌شود. حدود ۹۵٪ از کل کراتین بدن در عضلات اسکلتی ذخیره شده است، در حالی که مقادیر اندکی در مغز، قلب و بیضه‌ها یافت می‌شود.

^۱ Gandevia

^۲ Reid

(ویس و کادورا-داوک^۱، ۲۰۰۰). کراتین در حالت آزاد و فسفو کراتین (PCr) درون سلول وجود دارد و نسبت میان این دو شکل، شاخصی برای ظرفیت انرژی فوری عضله محسوب می شود (پرسکی و برازو^۲، ۲۰۰۱).

علاوه بر سنتز درون زار، کراتین از طریق رژیم غذایی (به ویژه مصرف گوشت قرمز و ماهی) نیز تأمین می گردد. با این حال، میزان دریافتی از طریق تغذیه معمولاً کمتر از نیاز ورزشکاران با فعالیت های شدید است، بنابراین استفاده از مکمل کراتین به عنوان روشی علمی و مؤثر برای افزایش ذخایر درون عضلانی رواج یافته است (بوفورد^۳ و همکاران، ۲۰۰۷).

۳.۱ مسیرهای متابولیکی کراتین در بدن

سنتز کراتین در بدن طی دو مرحله اصلی انجام می شود. نخست، در کلیه ها، آرژنین و گلیسین ترکیب شده و گوانیدینو استات (GAA) تشکیل می دهند. سپس در کبد، GAA با متیونین واکنش داده و به کراتین تبدیل می شود (برازنان^۴، ۲۰۰۷). کراتین از طریق خون به عضلات منتقل شده و توسط ناقل اختصاصی (Creat^۱) به داخل سلول های عضلانی وارد می شود. درون عضله، آنزیم کراتین کیناز (CK) کراتین را با ATP واکنش داده و فسفو کراتین (PCr) تولید می کند (والیمن^۵ و همکاران، ۲۰۱۱). این سیستم، یک چرخه انرژی فوری را ایجاد می کند که برای فعالیت های کوتاه مدت و پر شدت حیاتی است.

^۱ Wyss & Kaddurah-Daouk

^۲ Persky & Brazeau

^۳ Buford

^۴ Brosnan

^۵ Wallimann

در شرایط استراحت، کراتین به آرامی به کراتینین تبدیل شده و از طریق کلیه‌ها دفع می‌شود، بنابراین حفظ سطح کراتین عضلانی نیازمند سنتز یا مصرف مداوم است. مکمل‌یاری کراتین سبب افزایش ۲۰ تا ۴۰ درصدی ذخیره PCr عضله می‌شود (هریس^۱ و همکاران، ۱۹۹۲) و این امر به‌طور مستقیم بر کارایی سیستم انرژی فسفاژن تأثیر می‌گذارد.

۳.۲ تأثیر کراتین بر سیستم فسفاژن و بازسازی ATP

سیستم فسفاژن، نخستین منبع انرژی برای فعالیت‌های شدید و کوتاه‌مدت است و نقش کراتین در این سیستم حیاتی است. هنگام فعالیت، PCr با انتقال گروه فسفات خود به ADP، موجب بازسازی سریع ATP می‌شود. بدین ترتیب، کراتین در حفظ سطح انرژی لحظه‌ای عضله و جلوگیری از افت توان در فعالیت‌های پرشدت مؤثر است (هالتمن^۲ و همکاران، ۱۹۹۶).

افزایش ذخایر PCr از طریق مکمل‌یاری کراتین، امکان بازسازی سریع‌تر ATP را بین انقباضات عضلانی فراهم می‌کند و زمان لازم برای بازیابی انرژی را کاهش می‌دهد (تارنوپولسکی و پاریز^۳، ۱۹۹۹). همچنین، شواهد نشان می‌دهد که کراتین می‌تواند از طریق بهبود بازده متابولیکی و افزایش جریان یون‌های کلسیم در سارکوپلاسم، عملکرد انقباضی را تقویت نماید (صفدر و همکاران^۴، ۲۰۰۸).

^۱ Harris

^۲ Hultman

^۳ Tarnopolsky & Parise

^۴ Safdar

مطالعات متعددی نشان داده‌اند که مکمل‌یاری کراتین موجب افزایش معنی‌دار در قدرت بیشینه^۱، توان انفجاری^۲ و توده بدون چربی عضلانی^۳ می‌شود (کریدر و همکاران، ۲۰۱۷؛ چیلیک و همکاران، ۲۰۱۷). مکانیسم این تأثیر چندگانه است:

- افزایش ظرفیت ATP فوری در فعالیت‌های پرشدت،
 - تسهیل بازسازی سریع تر فسفو کراتین در فواصل تمرینی،
 - بهبود حجم سلولی از طریق افزایش آب درون سلولی، که خود نقش سیگنال‌دهنده آنابولیک دارد (هاسینگر^۴ و همکاران، ۱۹۹۶).
- این تغییرات در مجموع به افزایش سنتز پروتئین، کاهش تخریب پروتئین‌های عضلانی و تحریک رشد فیبرهای تند انقباض منجر می‌شود (کندو^۵ و همکاران، ۲۰۱۴). افزون بر این، مصرف کراتین در ترکیب با تمرینات مقاومتی می‌تواند سرعت بازیابی عضلات پس از تمرین را افزایش دهد و خستگی را کاهش دهد (کوک^۶ و همکاران، ۲۰۰۹).

مزایای کراتین تنها به بهبود عملکرد ورزشی محدود نمی‌شود. مطالعات نشان داده‌اند که این مکمل در زمینه‌های نورولوژیکی، سالمندی و پیشگیری از تحلیل عضلانی نیز اثرات سودمندی دارد (راوسون و ونزیا^۷، ۲۰۱۱). با این حال، مصرف آن باید با رعایت دوزهای علمی صورت

^۱ maximal strength

^۲ power output

^۳ lean body mass

^۴ Haussinger

^۵ Candow

^۶ Cooke

^۷ Rawson & Venezia

گیرد. دوز استاندارد پیشنهادی، ۲۰ گرم در روز برای ۵ تا ۷ روز (مرحله بارگیری) و سپس ۳ تا ۵ گرم در روز (مرحله نگهداری) است (کرایدر و همکاران، ۲۰۱۷).

عوارض جانبی بالقوه مانند افزایش وزن ناشی از احتباس آب درون عضلانی، ناراحتی گوارشی یا کرامپ‌های خفیف معمولاً موقتی و بی خطر هستند (برانچ، ۲۰۰۳). با این حال، در افراد دارای بیماری‌های کلیوی یا در صورت مصرف بیش از حد، باید احتیاط کرد و مشاوره پزشکی انجام داد. سازمان‌های علمی مانند ISSN^۱ و ACSM^۲، کراتین را یکی از مکمل‌های مؤثر و ایمن با شواهد علمی قوی معرفی کرده‌اند (بوفورد و همکاران، ۲۰۰۷).

۴. مکمل کافئین و نقش آن در تحریک سیستم عصبی و عضلانی

کافئین یک آلکالوئید متیل‌گزانتینی است که به‌طور طبیعی در دانه‌های قهوه، چای، کاکائو و برخی گیاهان دیگر یافت می‌شود. از دیدگاه فیزیولوژیکی، کافئین یک ترکیب روان‌تحریک کننده است که بر عملکرد سیستم عصبی مرکزی و عضلات اسکلتی تأثیر قابل توجهی دارد (اسپریت^۳، ۲۰۱۴). مکانیسم اصلی اثر آن، مهار گیرنده‌های آدنوزین (A₁ و A_{2A}) در مغز است؛ این گیرنده‌ها در حالت طبیعی باعث القای خستگی و کاهش فعالیت نورونی می‌شوند. در نتیجه، مهار آن‌ها توسط کافئین منجر به افزایش ترشح نوروترانسمیترهایی مانند دوپامین، نورآدرنالین و استیل‌کولین می‌گردد (دیویس^۴ و همکاران، ۲۰۰۳).

^۱ International Society of Sports Nutrition

^۲ American College of Sports Medicine

^۳ Spriet

^۴ Davis

افزون بر اثرات عصبی، کافئین از طریق افزایش تحرک یون‌های کلسیم در شبکه سارکوپلاسمی عضله و فعال‌سازی آنزیم‌های متابولیکی درون سلولی می‌تواند بر انقباض عضلانی و استفاده از سوبستراهای انرژی نیز اثر بگذارد (گراهام، ۲۰۰۱).

یکی از مهم‌ترین سازوکارهای ارگوزنیک کافئین، کاهش درک ذهنی از خستگی (RPE) است. مهار گیرنده‌های آدنوزین باعث افزایش هوشیاری، تمرکز، انگیزش و کاهش حس درد یا خستگی در طول فعالیت‌های طولانی‌مدت می‌شود (کاستیل و همکاران، ۱۹۷۸؛ دوهرتی و اسمیت، ۲۰۰۵).^۱

این تأثیر در سطوح بالاتر مغزی، از جمله قشر پیش‌پیشانی^۲ و عقده‌های قاعده‌ای^۳ مشاهده می‌شود که با پردازش انگیزش و تصمیم‌گیری مرتبط‌اند (کالمار و کافرلی، ۲۰۰۴).^۴ بنابراین، ورزشکارانی که از دوز مناسب کافئین استفاده می‌کنند، معمولاً قادرند مدت بیشتری در شدت بالاتر تمرین کنند، بدون آنکه خستگی ذهنی مانع عملکردشان شود.

مصرف کافئین موجب افزایش ترشح کاتکول‌آمین‌ها از غدد فوق کلیوی، به‌ویژه آدرنالین و نورآدرنالین، می‌شود (اسپریت، ۱۹۹۵). این هورمون‌ها نقش کلیدی در افزایش ضربان قلب، برون‌ده قلبی، جریان خون عضلانی و بسیج سوخت‌های انرژی مانند اسیدهای چرب آزاد دارند.

^۱ Costill; Doherty & Smith

^۲ prefrontal cortex

^۳ basal ganglia

^۴ Kalmar & Cafarelli

کافئین با تحریک مسیرهای سمپاتیکی، لیپولیز (تجزیه چربی‌ها) را افزایش داده و دسترسی به انرژی از طریق اکسیداسیون چربی‌ها را در طول فعالیت‌های استقامتی تسهیل می‌کند (اسیگ^۱ و همکاران، ۱۹۸۰). این فرایند سبب صرفه‌جویی در گلیکوژن عضلانی و افزایش پایداری انرژی در فعالیت‌های طولانی‌مدت می‌شود (اسپریت، ۲۰۱۴). همچنین، افزایش سطح آدرنالین با تحریک β -آدرنرژیک در عضلات می‌تواند قدرت انقباض و پاسخ عضلانی به تحریک عصبی را تقویت نماید (گلدشتاین^۲ و همکاران، ۲۰۱۰).

۴.۱ نقش کافئین در بهبود استقامت و تمرکز ورزشی

مطالعات بی‌شماری نشان داده‌اند که مصرف دوزهای متوسط کافئین (حدود ۳ تا ۶ میلی‌گرم به ازای هر کیلوگرم وزن بدن) می‌تواند عملکرد استقامتی، توان هوازی و تمرکز ذهنی را بهبود بخشد (گانو و همکاران، ۲۰۰۹). این اثرات هم در ورزشکاران نخبه و هم در افراد تمرین‌نדיده گزارش شده‌اند.

کافئین از طریق افزایش برانگیختگی عصبی و بهبود انتقال پیام‌های عصبی به عضلات باعث تسریع واکنش‌ها و بهبود هماهنگی عصبی-عضلانی می‌شود (کالمار و کافرلی^۳، ۱۹۹۹). افزون بر آن، در ورزش‌های نیازمند تمرکز بالا (مانند تیراندازی یا ورزش‌های تیمی)، مصرف کنترل‌شده کافئین موجب افزایش دقت و کاهش زمان واکنش می‌گردد (سویسی و همکاران، ۲۰۱۳).

^۱ Essig

^۲ Goldstein

^۳ Kalmar & Cafarelli

اثرات مثبت کافئین نه تنها در ورزش های استقامتی بلکه در تمرینات قدرتی و بی هوازی کوتاه مدت نیز مشاهده شده است، به ویژه از طریق افزایش توان لحظه ای و کاهش خستگی مرکزی (گرگیک و همکاران، ۲۰۱۸).

اگرچه کافئین به عنوان یک مکمل ایمن و مؤثر شناخته می شود، اما مصرف بیش از حد آن ممکن است موجب بروز عوارضی مانند اضطراب، تپش قلب، بی خوابی، لرزش دست ها و اختلالات گوارشی شود (بروک، ۲۰۰۸). حد مجاز مصرف کافئین برای بزرگسالان سالم، طبق سازمان EFSA، حدود ۴۰۰ میلی گرم در روز است (EFSA, ۲۰۱۵).

علاوه بر این، حساسیت به کافئین در میان افراد متفاوت است و عواملی مانند ژنتیک (ژن CYP1A2)، عادت مصرفی و وضعیت خواب بر پاسخ فیزیولوژیکی تأثیر می گذارند (گست و همکاران، ۲۰۱۸). ورزشکاران باید از مصرف کافئین در ساعات پایانی روز پرهیز کنند تا از اختلال در خواب جلوگیری شود.

در سطح ورزشی، کافئین دیگر در فهرست مواد ممنوعه WADA قرار ندارد (از سال ۲۰۰۴)، اما همچنان به عنوان ماده «تحت پایش» در نظر گرفته می شود، زیرا دوزهای بسیار بالا می توانند آثار شبه دارویی ایجاد کنند (WADA, ۲۰۲۴). بنابراین، پابندی به دوزهای علمی و آگاهی از وضعیت فردی برای مصرف ایمن آن ضروری است.

۵. مکمل بتا آلانین و نقش آن در بافرینگ عضلانی

بتا آلانین (β -Alanine) یک اسید آمینه غیر پروتئینی است که به طور مستقیم در سنتز کارنوزین در عضلات اسکلتی نقش دارد. کارنوزین یک دی پپتید شامل بتا آلانین و هیستیدین است که در فیبرهای عضلانی نوع II (تند انقباض) بیشتر یافت می شود و یکی از مهم ترین

عوامل بافرینگ داخل سلولی در برابر تجمع یون هیدروژن (H^+) است (هریس^۱ و همکاران، ۲۰۰۶).

مکانیسم سنتز کارنوزین محدود به دسترسی به بتاآلانین است؛ هرچقدر سطح بتاآلانین عضلانی بالاتر باشد، ظرفیت تولید کارنوزین افزایش می‌یابد. بنابراین، مصرف مکمل بتاآلانین به طور مستقیم موجب افزایش ذخایر کارنوزین عضلانی و بهبود توان بافری عضله می‌شود (هیل و همکاران، ۲۰۰۷).

در فعالیت‌های شدید و کوتاه‌مدت با شدت بالا، مانند وزنه‌برداری یا دو سرعت، متابولیسم گلیکولیتیک موجب تولید لاکتات و افزایش یون‌های H^+ می‌شود که در کاهش pH داخل عضله نقش دارد (بیشاپ^۲ و همکاران، ۲۰۱۰). اسیدیته بالا سبب اختلال در عملکرد پروتئین‌های انقباضی و کاهش حساسیت به کلسیم می‌شود که منجر به افت توان عضلانی و خستگی سریع می‌گردد (آلن و همکاران، ۲۰۰۸).

کارنوزین با خاصیت بافرینگ هیدروژنی، یون‌های H^+ را خنثی می‌کند و باعث تثبیت pH عضله در طول فعالیت شدید می‌شود. این سازوکار فیزیولوژیکی موجب حفظ توان انقباضی و تأخیر خستگی عضلانی می‌گردد (دراو^۳ و همکاران، ۲۰۰۷).

^۱ Harris

^۲ Bishop

^۳ Derave

۵.۱ تأثیر بتاآلانیین بر تأخیر خستگی و بهبود عملکرد هوازی-بی هوازی

مطالعات متعددی نشان داده اند که مصرف بتاآلانیین بهبود قابل توجهی در فعالیت های بی هوازی شدید (۳۰-۴۰ ثانیه تا چند دقیقه) دارد و همچنین می تواند به بهبود عملکرد در فعالیت های هوازی کوتاه مدت کمک کند (هابسون^۱ و همکاران، ۲۰۱۲).

افزایش ذخایر کارنوزین با مصرف بتاآلانیین موجب می شود که عضلات بتوانند انقباضات پی در پی با شدت بالا را با تأخیر در ظهور خستگی انجام دهند. در ورزش های تیمی و استقامتی ترکیبی، اثر بتاآلانیین بر کاهش افت توان در نیمه دوم مسابقه و افزایش ظرفیت تکرار عملکرد انفجاری گزارش شده است (ساندرز^۲ و همکاران، ۲۰۱۷). به طور کلی، مکمل بتاآلانیین با تقویت بافرینگ عضلانی، موجب بهبود توان بی هوازی، تأخیر در خستگی و افزایش توان خروجی در فعالیت های شدید و کوتاه مدت می شود.

مصرف بتاآلانیین به طور کلی ایمن تلقی می شود، اما برخی عوارض موقتی مانند سوزش و مور مور شدن پوست^۳ گزارش شده است، به ویژه در دوزهای بالا (۴-۶ گرم در یک نوبت) (هریس و همکاران، ۲۰۰۶). برای کاهش این اثر، توصیه می شود که دوز مصرفی به صورت تقسیم شده در طول روز مصرف شود.

دوز معمولی مصرف برای اثر گذاری، حدود ۳-۶ گرم در روز به مدت ۴-۱۲ هفته است. هیچ شواهد محکمی دال بر سمیت کبدی یا کلیوی در افراد سالم با مصرف استاندارد وجود ندارد

^۱ Hobson

^۲ Saunders

^۳ paresthesia

(ترکسلر و همکاران، ۲۰۱۵). با این حال، افراد دارای بیماری‌های مزمن یا حساسیت به مکمل‌ها باید پیش از مصرف با متخصص تغذیه یا پزشک مشورت کنند.

مطالعات نشان داده‌اند که ترکیب مصرف بتا‌آلانین با تمرین مقاومتی یا استقامتی اثرات سینرژیک در بهبود عملکرد ورزشی دارد و در سطح حرفه‌ای و آماتور قابل استفاده است (دراو و همکاران، ۲۰۱۰).

۶. تحلیل تطبیقی اثر کراتین، کافئین و بتا‌آلانین

کراتین، کافئین و بتا‌آلانین هر یک از طریق مکانیسم‌های متفاوت فیزیولوژیکی بر عملکرد عضلات اثر می‌گذارند. کراتین با افزایش ذخایر فسفو کراتین (PCr) در عضلات، بازسازی سریع ATP در فعالیت‌های کوتاه‌مدت و پرشدت را تسهیل می‌کند و مستقیماً بر توان انفجاری و قدرت بیشینه تأثیر می‌گذارد (کرایدر و همکاران، ۲۰۱۷).

کافئین به عنوان یک تحریک‌کننده سیستم عصبی مرکزی، از طریق مهار گیرنده‌های آدنوزین و افزایش ترشح نوروترانسمیترها، خستگی ذهنی را کاهش داده و توجه و انگیزش را افزایش می‌دهد. همچنین، کافئین از طریق تحریک ترشح کاتکول‌آمین‌ها، متابولیسم انرژی و قدرت انقباضی عضلات را بهبود می‌بخشد (اسپریت، ۲۰۱۴).

بتا‌آلانین، به واسطه افزایش ذخایر کارنوزین عضلانی، عملکرد باف‌ری عضلات را در برابر افزایش یون H^+ حفظ کرده و تأخیر در خستگی و بهبود عملکرد بی‌هوازی را امکان‌پذیر می‌سازد (هریس و همکاران، ۲۰۰۶). در مجموع می‌توان گفت، کراتین بر سیستم فسفاژن و ATP فوری اثر می‌گذارد، کافئین بر سیستم عصبی مرکزی و متابولیسم انرژی و بتا‌آلانین بر

کنترل اسیدیته عضلانی و بافرینگ H^+ تمرکز دارد. این تفاوت ها نشان دهنده مکانیزم های مکمل و غیرهم پوشاننده این سه ماده است.

۶.۱ تأثیر هر مکمل در انواع فعالیت های ورزشی

اثر مکمل ها بسته به نوع فعالیت ورزشی متفاوت است:

در فعالیت های قدرتی و انفجاری، کراتین با افزایش ATP فوری و حجم سلولی، موجب افزایش قدرت و توان لحظه ای می شود (چلیبیک و همکاران، ۲۰۱۷). بتا آلانین نیز می تواند در تکرار انقباضات شدید کوتاه مدت موثر باشد، اما اثر کافئین در قدرت لحظه ای معمولاً کمتر است و بیشتر نقش انگیزشی دارد (گرگیک و همکاران، ۲۰۱۸).

در فعالیت های استقامتی طولانی، کافئین به دلیل کاهش RPE و افزایش استفاده از چربی ها، موجب بهبود توان هوازی و افزایش تحمل تمرینی می شود (گانیو و همکاران، ۲۰۰۹). بتا آلانین می تواند در فعالیت های شدید با طول چند دقیقه تأثیر مثبت داشته باشد، در حالی که کراتین اثر مستقیم بر استقامت طولانی ندارد.

در فعالیت های ترکیبی (قدرتی-استقامتی)، ترکیب مکمل ها می تواند اثر سینرژیک داشته باشد. کراتین و بتا آلانین به حفظ توان انفجاری و کاهش خستگی کمک می کنند، در حالی که کافئین انگیزه و تمرکز را افزایش می دهد (هابسون و همکاران، ۲۰۱۲؛ ساندروز و همکاران، ۲۰۱۷). این تحلیل نشان می دهد که انتخاب مکمل باید بر اساس نوع ورزش و هدف عملکردی صورت گیرد.

بنابراین، مطالعات اولیه نشان می‌دهند که مصرف ترکیبی کراتین و بتا آلانین می‌تواند اثرات مثبت هر دو ماده را در تمرینات شدید تقویت کند. به عنوان مثال، کراتین بازسازی ATP را تسهیل کرده و بتا آلانین بافرینگ عضلانی را افزایش می‌دهد؛ این ترکیب موجب افزایش تعداد انقباضات پر شدت و کاهش خستگی می‌شود (دراو و همکاران، ۲۰۱۰).

کافئین در کنار این دو مکمل، می‌تواند با کاهش خستگی مرکزی و افزایش انگیزه، توان کلی تمرینی و استقامت ذهنی و جسمی را بهبود دهد. با این حال، برخی شواهد محدود نشان می‌دهند که مصرف همزمان کراتین و کافئین ممکن است اثرات کراتین بر هیدراسیون سلولی و توان انفجاری را کاهش دهد (واندنبرگ^۱ و همکاران، ۱۹۹۶). بنابراین، ترکیب مکمل‌ها باید با دقت و بر اساس زمان‌بندی مناسب صورت گیرد.

در مجموع می‌توان گفت:

- کراتین: افزایش ATP فوری، بهبود توان انفجاری و قدرت، افزایش حجم عضلانی.
- کافئین: کاهش خستگی ذهنی، افزایش انگیزه و تمرکز، بهبود عملکرد استقامتی و هوازی.
- بتا آلانین: افزایش ظرفیت بافری عضله، تأخیر در خستگی بی‌هوازی، بهبود عملکرد در فعالیت‌های شدید کوتاه‌مدت تا متوسط.

^۱ Vandenberghe

نقاط تمایز آن ها در مکانیسم اثر و نوع فعالیت هدفمند است، در حالی که نقاط مشترک شامل افزایش توان و بهبود عملکرد کلی عضلانی می شود. انتخاب و ترکیب این مکمل ها با توجه به نوع ورزش، شدت و مدت تمرین، می تواند اثر سینرژیک و بهینه سازی عملکرد ورزشی را فراهم آورد (بافورد و همکاران، ۲۰۰۷؛ ساندروز و همکاران، ۲۰۱۷؛ اسپریت، ۲۰۱۴).

۷. ملاحظات اخلاقی و ایمنی در مصرف مکمل های ورزشی

مصرف مکمل های ورزشی بدون مشاوره تخصصی می تواند خطراتی برای سلامت و عملکرد ورزشکار ایجاد کند. متخصصان تغذیه ورزشی با ارزیابی وضعیت بدنی، نیازهای انرژی، نوع ورزش و سابقه پزشکی ورزشکار، می توانند میزان و نوع مکمل مناسب را تعیین کنند (موگان و همکاران، ۲۰۱۸). مشاوره علمی همچنین به ورزشکار کمک می کند تا مصرف مکمل ها در قالب برنامه تمرینی و رژیم غذایی شخصی سازی شده انجام شود و از اثرات جانبی غیرضروری جلوگیری گردد (توماس و همکاران، ۲۰۱۶).

مصرف بیش از حد مکمل ها، حتی آن هایی که ایمن محسوب می شوند، می تواند مسائل گوارشی، اختلالات قلبی و عوارض کلیوی یا کبدی ایجاد کند. به عنوان مثال، مصرف بیش از حد کراتین می تواند فشار بر کلیه ها افزایش دهد، مصرف بیش از حد کافئین باعث اضطراب، تپش قلب و اختلال خواب شود و دوزهای بالای بتا آلانین ممکن است منجر به پرهستزیا (سوزش و مورمور شدن پوست) گردد (بورک، ۲۰۰۸؛ ترکسلر و همکاران، ۲۰۱۵؛ برانچ، ۲۰۰۳).

علاوه بر عوارض جانبی، تداخلات احتمالی بین مکمل ها و داروهای مصرفی یا شرایط پزشکی خاص نیز اهمیت دارد. به عنوان نمونه، کافئین می تواند اثر برخی داروهای قلبی و فشار خون را

تشدید کند و مصرف ترکیبی کراتین با داروهای مدر ممکن است موجب اختلال در تعادل آب و الکترولیت شود (بوفورد و همکاران، ۲۰۰۷).

یکی از چالش‌های اخلاقی در مصرف مکمل‌ها، تفاوت میان استفاده قانونی و دوپینگ است. سازمان جهانی مبارزه با دوپینگ (WADA) فهرستی از مواد ممنوعه ارائه می‌دهد که شامل برخی ترکیبات تحریک‌کننده و آنابولیک است، اما بسیاری از مکمل‌های رایج مانند کراتین، بتا آلانین و کافئین در دوزهای معمول مجاز هستند (WADA, ۲۰۲۴).

با این حال، مصرف مکمل‌های غیرمعتبر یا آلودگی تصادفی به مواد ممنوعه می‌تواند ورزشکار را در معرض محرومیت قرار دهد. بنابراین، انتخاب مکمل‌های استاندارد و دارای تاییدیه آزمایشگاهی و رعایت دوزهای توصیه شده، اهمیت اخلاقی و قانونی دارد (مورگان و همکاران، ۲۰۱۸).

۷.۱ نگاه فیزیولوژیکی به مصرف آگاهانه مکمل‌ها

مصرف آگاهانه مکمل‌ها نیازمند درک فیزیولوژی اثرات هر ماده و تطبیق آن با نوع ورزش، شدت تمرین و وضعیت جسمانی فرد است. این رویکرد علمی از دو منظر اهمیت دارد:

۱. جلوگیری از اثرات جانبی و آسیب‌های ناشی از مصرف بیش از حد یا ترکیب نامناسب مکمل‌ها.

۲. استفاده هدفمند از مکمل‌ها برای تقویت سیستم‌های انرژی، افزایش استقامت، کاهش خستگی و تسریع بازیابی عضلانی (کرکسیک و همکاران، ۲۰۱۸).

این نگاه موجب می شود ورزشکار علاوه بر رعایت استانداردهای اخلاقی، از مزایای واقعی فیزیولوژیکی مکمل ها بهره مند شود و مصرف آن ها با هدف عملکردی و علمی انجام گیرد.

نتیجه گیری

بررسی تطبیقی نقش کراتین، کافئین و بتا آلانین در فیزیولوژی عملکرد عضلات نشان می دهد که هر یک از این سه مکمل با سازوکارهای ویژه اما مکمل یکدیگر، در بهبود توان، استقامت و کارایی عضلانی نقش مؤثری دارند. کراتین به طور مستقیم با افزایش ذخایر فسفو کراتین، بازسازی سریع تر ATP و تقویت عملکرد سیستم فسفاژن، در فعالیت های پر شدت و کوتاه مدت بیشترین تأثیر را دارد. این ویژگی باعث افزایش توان انفجاری، قدرت بیشینه و رشد توده عضلانی می شود.

کافئین با اثر گذاری بر سیستم عصبی مرکزی و متابولیسم انرژی، از طریق مهار گیرنده های آدنوزین، افزایش برانگیختگی عصبی و کاهش درک ذهنی از خستگی، موجب افزایش تمرکز، انگیزش و تحمل تمرینی می گردد. نقش آن در بهبود عملکرد هوازی و استقامتی به ویژه در فعالیت های طولانی مدت برجسته است.

در مقابل، بتا آلانین از طریق افزایش سطح کارنوزین عضلانی و بهبود ظرفیت بافری، مانع افت pH عضله در اثر تجمع یون های هیدروژن می شود و بدین ترتیب خستگی در فعالیت های بی هوازی شدید را به تعویق می اندازد. این اثر به حفظ توان در تکرارهای متوالی تمرین و بهبود عملکرد در فعالیت های کوتاه مدت تا متوسط منجر می شود.

مقایسه این سه مکمل نشان می دهد که کراتین بر تولید انرژی فوری، کافئین بر کنترل خستگی عصبی و افزایش تمرکز، و بتا آلانین بر تنظیم محیط شیمیایی عضله تمرکز دارند. در نتیجه، هر

یک در بخش متفاوتی از چرخه عملکرد عضلانی عمل می کنند و مصرف آگاهانه و زمان بندی شده آن ها می تواند اثرات سینرژیک ایجاد کند. برای مثال، ترکیب کراتین و بتا آلانین می تواند هم بازسازی انرژی و هم بافرینگ عضله را تقویت کند، در حالی که افزودن کافئین به این ترکیب موجب ارتقای تمرکز ذهنی و انگیزه در طول تمرین می شود.

در نهایت، کارایی این مکمل ها تنها در صورت مصرف علمی، با دوز مناسب و تحت نظر متخصص قابل دستیابی است. مصرف بی رویه یا نا آگاهانه می تواند خطرات گوارشی، قلبی یا عصبی به همراه داشته باشد. از این رو، رویکرد اخلاقی و فیزیولوژیکی در مصرف مکمل ها باید بر پایه آگاهی، شواهد علمی و هدف گذاری ورزشی استوار باشد.

به طور خلاصه، می توان گفت که کراتین انرژی را تأمین می کند، کافئین ذهن را بیدار نگه می دارد و بتا آلانین عضله را مقاوم می سازد؛ سه ضلع اصلی مثلثی که از انرژی تا استقامت، فیزیولوژی عملکرد عضله را به سطحی بالاتر ارتقا می دهد.

با توجه به نتایج مطالعات موجود و مرور انجام شده در این پژوهش، چند مسیر مهم برای تحقیقات آینده در حوزه مکمل های ورزشی پیشنهاد می شود. نخست آنکه، اغلب پژوهش های پیشین اثر هر یک از مکمل های کراتین، بتا آلانین و کافئین را به صورت مجزا بررسی کرده اند، در حالی که بررسی اثرات هم افزایی یا تداخلی مصرف هم زمان آن ها در شرایط تمرینی واقعی می تواند درک عمیق تری از تعاملات متابولیکی ایجاد کند. دوم، با توجه به تفاوت های فیزیولوژیکی میان رشته های ورزشی مختلف و نیز میان ورزشکاران زن و مرد، انجام مطالعات تفکیک شده بر اساس نوع فعالیت و جنسیت برای تعیین پاسخ های اختصاصی هر گروه ضروری است.

از سوی دیگر، پیشنهاد می شود تحقیقات آینده به بررسی نقش تفاوت های ژنتیکی در پاسخ فردی به مکمل ها پردازند تا زمینه برای توسعه راهبردهای مکمل یاری شخصی سازی شده فراهم شود. همچنین، پژوهش های بلندمدت جهت ارزیابی ایمنی و پیامدهای فیزیولوژیکی مصرف مزمن این مکمل ها، به ویژه بر عملکرد کلیوی، قلبی-عروقی و عصبی، از اهمیت بالایی برخوردار است.

در سطح سلولی و مولکولی، بهره گیری از فناوری های نوین مانند *transcriptomics*، *proteomics* و *metabolomics* می تواند مسیرهای بیوشیمیایی دقیق اثر این ترکیبات را آشکار سازد. افزون بر این، بررسی نقش وضعیت تغذیه ای، الگوهای خواب، و میزان استرس در پاسخ به مکمل ها می تواند به کنترل متغیرهای مداخله گر در پژوهش های آینده کمک کند.

در نهایت، پیشنهاد می شود مطالعاتی طراحی شوند که علاوه بر شاخص های عملکردی، اثرات روان فیزیولوژیکی به ویژه در مورد کافئین، مانند تمرکز، انگیزش و خستگی ذهنی را نیز مورد سنجش قرار دهند. ترکیب سنجش های متابولیکی (مانند لاکتات و فسفوکراتین)، عصبی (مانند EMG)، و همودینامیکی (مانند NIRS) در یک طرح جامع می تواند تصویر کامل تری از سازوکارهای عملکردی مکمل های ورزشی ارائه نماید.

منابع و مآخذ

۱. Allen, D. G., Lamb, G. D., & Westerblad, H. (۲۰۰۸). Skeletal muscle fatigue: Cellular mechanisms. *Physiological Reviews*, ۸۸(۱), ۲۸۷-۳۳۲. <https://doi.org/10.1152/physrev.00015.2007>
۲. Bishop, D. J., Edge, J., Thomas, C., & Mercier, J. (۲۰۱۰). Effects of high-intensity exercise on muscle hydrogen ion balance and performance. *Journal of Applied Physiology*, ۱۰۸(۳), ۷۶۳-۷۷۰. <https://doi.org/10.1152/jappphysiol.01036.2009>
۳. Branch, J. D. (۲۰۰۳). Effect of creatine supplementation on body composition and performance: A meta-analysis. *International Journal of Sport Nutrition and Exercise Metabolism*, ۱۳(۲), ۱۹۸-۲۲۶. <https://doi.org/10.1123/ijsnem.13.2.198>
۴. Buford, T. W., Kreider, R. B., Stout, J. R., Greenwood, M., Campbell, B., Spano, M., ... & Ziegenfuss, T. (۲۰۰۷). International Society of Sports Nutrition position stand: Creatine supplementation and exercise. *Journal of the International Society of Sports*, ۴(۱), ۶. <https://doi.org/10.1186/1550-2783-4-6>
۵. Burke, L. M. (۲۰۰۸). Caffeine and sports performance. *Applied Physiology, Nutrition, and Metabolism*, ۳۳(۶), ۱۳۱۹-۱۳۳۴. <https://doi.org/10.1139/H08-130>
۶. Chilibeck, P. D., Kaviani, M., Candow, D. G., & Zello, G. A. (۲۰۱۷). Effect of creatine supplementation during resistance

- training on lean tissue mass and muscular strength in older adults: A meta-analysis. *Open Access Journal of Sports Medicine*, ۸, ۲۱۳–۲۲۶. <https://doi.org/10.21۴۷/OAJSM.S1۲۳۵۲۹>
۷. Derave, W., Everaert, I., Beeckman, S., & Baguet, A. (۲۰۱۰). Muscle carnosine metabolism and beta-alanine supplementation in relation to and training. *Sports Medicine*, ۴۰(۳), ۲۴۷–۲۶۳
۸. Derave, W., Özdemir, M. S., Harris, R. C., Pottier, A., Reyngoudt, H., Koppo, K., Wise, J. A., & Achten, E. (۲۰۰۷). Beta-alanine supplementation augments muscle carnosine content and attenuates fatigue during repeated isokinetic contraction bouts in trained sprinters. *Journal of Applied Physiology*, ۱۰۳(۵), ۱۷۳۶–۱۷۴۳. <https://doi.org/10.۱۱۵۲/jappphysiol.۰۰۳۹۷.۲۰۰۷>
۹. Ganio, M. S., Klau, J. F., Casa, D. J., Armstrong, L. E., & Maresh, C. M. (۲۰۰۹). Effect of caffeine on sport-specific endurance performance: A systematic review. *Journal of Strength and Conditioning Research*, ۲۳(۱), ۳۱۵–۳۲۴. <https://doi.org/10.۱۵۱۹/JSC.۰b۰۱۳۳۱۸۱۸b۹۷۹a>
۱۰. Grgic, J., Grgic, I., Pickering, C., Schoenfeld, B. J., Bishop, D. J., & Pedisic, Z. (۲۰۱۸). Wake up and smell the coffee: Caffeine supplementation and exercise performance—an umbrella review of ۲۱ published meta-analyses. *British Journal of Sports*, ۵۴(۱۱), ۶۸۱–۶۸۸. <https://doi.org/10.۱۱۳۶/bjsports-۲۰۱۸-۱۰۰۲۷۸>
۱۱. Harris, R. C., Tallon, M. J., Dunnett, M., Boobis, L., Coakley, J., Kim, H. J., Fallowfield, J. L., Hill, C. A., Sale, C., & Wise, J. A.

- (۲۰۰۶). The absorption of orally supplied beta-alanine and its effect on muscle carnosine synthesis in human vastus lateralis. *Acids*, ۳۰(۳), ۲۷۹-۲۸۹. <https://doi.org/10.1007/s00726-006-0299-9>
۱۲. Hill, C. A., Harris, R. C., Kim, H. J., Harris, B. D., Sale, C., Boobis, L. H., Kim, C. K., & Wise, J. A. (۲۰۰۷). Influence of beta-alanine supplementation on skeletal muscle carnosine concentrations and high-intensity cycling capacity. *Amino Acids*, ۳۲(۲), ۲۲۵-۲۳۳. <https://doi.org/10.1007/s00726-006-0364-۴>
۱۳. Hobson, R. M., Saunders, B., Ball, G., Harris, R. C., & Sale, C. (۲۰۱۲). Effects of β -alanine supplementation on exercise performance: A meta-analysis. *Amino Acids*, ۴۲(۱), ۲۵-۳۷. <https://doi.org/10.1007/s00726-011-1200-z>
۱۴. Kerksick, C. M., Wilborn, C. D., Roberts, M. D., Smith-Ryan, A. E., Kleiner, S. M., Jäger, R., ... & Antonio, J. (۲۰۱۸). ISSN exercise & sports nutrition review update: Research & recommendations. *Journal of the International Society of Sports Nutrition*, ۱۵(۱), ۳۸. <https://doi.org/10.1186/s12947-018-0242-y>
۱۵. Kreider, R. B., Kalman, D. S., Antonio, J., Ziegenfuss, T. N., Wildman, R., Collins, R., ... & Lopez, H. L. (۲۰۱۷). International Society of Sports Nutrition position stand: Safety and efficacy of creatine supplementation in exercise, sport, and medicine. *Journal of the International Society of Sports Nutrition*, ۱۴(۱), ۱۸. <https://doi.org/10.1186/s12947-017-0173-z>

۱۶. Maughan, R. J., Burke, L. M., Dvorak, J., Larson-Meyer, D. E., Peeling, P., Phillips, S. M., ... & Engebretsen, L. (۲۰۱۸). IOC consensus statement: Dietary supplements and the high-performance athlete. *British Journal of Sports Medicine*, ۵۲(۷), ۴۳۹-۴۵۵. <https://doi.org/10.1136/bjsports-2018-099027>
۱۷. Saunders, B., Elliott-Sale, K., Artioli, G. G., Swinton, P. A., Dolan, E., Roschel, H., Sale, C., & Gualano, B. (۲۰۱۷). β -alanine supplementation to improve exercise capacity and performance: A systematic review and meta-analysis. *British Journal of Sports*, ۵۱(۸), ۶۵۸-۶۶۹. <https://doi.org/10.1136/bjsports-2016-096396>
۱۸. Spriet, L. L. (۲۰۱۴). Exercise and sport performance with low doses of caffeine
۱۹. Thomas, D. T., Erdman, K. A., & Burke, L. M. (۲۰۱۶). Position of the Academy of Nutrition and Dietetics, Dietitians of Canada, and the American College of Sports Medicine: Nutrition and athletic performance. *Journal of the Academy of Nutrition and Dietetics*, ۱۱۶(۳), ۵۰۱-۵۲۸. <https://doi.org/10.1016/j.jand.2015.12.006>
۲۰. Trexler, E. T., Smith-Ryan, A. E., Stout, J. R., Hoffman, J. R., Wilborn, C. D., Sale, C., & Antonio, J. (۲۰۱۵). International Society of Sports Nutrition position stand: Beta-alanine. *Journal of the International Society of Sports Nutrition*, ۱۲(۱), ۳۰. <https://doi.org/10.1186/s12970-015-0090-y>
۲۱. Vandenbergh, K., Goris, M., Van Hecke, P., Van Leemputte, M., Hespel, P., & Claessens, A. L. (۱۹۹۶). Caffeine counteracts the

ergogenic action of muscle creatine loading. Journal of Applied Physiology, ۸۰(۲), ۴۵۲-۴۵۷.

<https://doi.org/10.1152/jappl.1996.80.2.452>

۲۲. WADA. (۲۰۲۴). *The World Anti-Doping Code: The ۲۰۲۴ Prohibited List*. World Anti-Doping Agency. <https://www.wada-ama.org>