علم و تمرین در دوهای نیمه استقامت و استقامت

نویسندگان

ریچارد سی. بلاگرو و فیلیپ آر. هایز

پیشگفتار مترجمان

خدای بزرگ را شاکر هستم که بار دیگر عنایت و لطف او شامل حال خانواده دوومیدانی شد تا کتابی با عنوان علم و تمرین در دوهای نیمه استقامت و استقامت به تلاش جناب آقای دکتر حسین علی سلطانی عزیز و آقای جواد صغادی مربی دوومیدانی ترجمه شود تاحضور جامعه ورزشی کشور قرار گیرد.

بحث استقامت قلبی و عروقی هنوز در نظر برخی شاید اینگونه باشد که ساده و آسان است ، اما در واقع اینچنین نیست و احتیاج است تا با آگاهی و دقت نظر به این مهم توجه شود و لذا از همین رو نیاز به کتابی جامع در این زمینه احساس می شد . همانگونه که همه شما عزیزان خواننده مطلع هستید ، بحث استقامت قلبی و عروقی موردی اساسی و بنیادی در اغلب رشته های ورزشی به حساب می آید .

کتاب حاضر بخوبی تمام نکات و مسایل مربوط به استقامت قلبی و عروقی را پوشش می دهد و هر آنچه لازم است تا یک مربی و ورزشکار در این باره آگاه باشد ،در این کتاب ارائه گردیده است. نسخه اصلی کتاب شامل ۲۱ فصل است که بنا به صلاحدید مترجمان و همچنین میزان کاربردی بودن هر مطلب و فصل، ۱۸ فصل از نسخه اصلی انتخاب و در این کتاب آورده شده است.

بحث هایی از عوامل تعیین کننده فیزیولوژیکی، آسیب های رایج ، نیازهای تغذیه ای ، مباحث روحی و روانی ، حجم وشدت تمرینات ، کاهش تمرینات وبه اوج رساندن آمادگی قبل از یک مسابقه ، راهکار ونکات تاکتیکی در طول مسابقه ،تمرینات قدرتی ،مدیریت برنامه های تمرین ، راهبردهای استراحت ، ملاحظاتی در تمرینات بانوان و تمرین در افراد سالمند برای دوندگان نیمه استقامت و استقامت به نحو شایسته ای در کتاب گنجانده شده است. باشد که این کار قدم کوچکی در پیشبرد ورزش کشور عزیزمان بویژه دوومیدانی باشد.

فدراسیون دوومیدانی جمهوری اسلامی ایران از این عزیزان که در ترجمه این کتاب ارزشمند زحمات زیادی کشیدند، تشکر و قدردانی می کند و برای آنها سلامتی و موفقیت روز افزون از درگاه خداوند متعال خواستار است .

هاشم صیامی

رئیس فدراسیون دوومیدانی جمهوری اسلامی ایران

علم و تمرین دوهای نیمه استقامت و استقامت

محبوبیت دوِهای استقامت[1] به‌عنوان یک ورزش و یک فعالیت تفریحی در بالاترین حد خود قرار دارد. دونده‌های استقامت با انگیزه رسیدن به بهترین وضعیت شخصی، سالم ماندن یا صرفاً شرکت در مسابقات، در هر سنی و با هر میزان توانایی، فعالانه به دنبال مشاوره با مربیان مجرب و پژوهشگران ورزش هستند. این موضوع همچنین در افزایش برنامه‌های آموزشی برای مربیان جوان و دانشمندان مشتاق ورزش در سال‌های اخیر بازتاب یافته است. رویکردهای مختلفی برای آموزش دونده‌های استقامت وجود دارد. بااین‌حال، اصول اولیه و لازم برای موفقیت هر دونده استقامت قابل‌استفاده است. علم زیربنایی آموزش و آمادگی بدنی دونده‌های استقامت در سال‌های اخیر به‌طور قابل‌توجهی توسعه‌یافته است. باتجربه‌ترین و موفق‌ترین مربیان در جامعه دوِهای استقامت به‌ندرت این فرصت را دارند که روش‌های آزموده شده خود را در تمرین به اشتراک بگذارند. به همین ترتیب، آثار بدیع دانشمندان ورزش اغلب فقط برای دونده‌های نخبه، تیم‌های پشتیبانی آن‌ها و دانشگاهیان قابل‌دسترسی است.

کتاب *علم و تمرین در دوهای نیمه استقامت و استقامت*[2]، علم و هنر مربیگری مرتبط با آماده‌سازی دونده‌های استقامت را برای مسابقات از ۸۰۰ متر تا مسافت‌های فوق ماراتن به هم پیوند می‌زند. این کتاب آخرین شواهد علمی انتشاریافته توسط پژوهشگران ورزشی پیشرو در

[1] Long Distance

[2] The Science and Practice of Middle and Long Distance Running

جهان را با اصول و استراتژی‌های درست تمرینی که مربیان مجرب استفاده می‌کنند، ترکیب می‌کند. این کتاب تحقیقات علمی پیشرفته از رشته‌های فیزیولوژی، بیومکانیک، روانشناسی و تغذیه را به توصیه‌های عملی برای دستیابی به موفقیت تبدیل می‌کند. همچنین به مسائل مهم و شیوه‌های امروزی مربوط به سلامت و عملکرد می‌پردازیم. این کتاب یک مکمل ضروری برای کتابخانه هر دونده استقامت، مربی یا پژوهشگر ورزش است.

ریچارد سی. بلاگرو، دارای مدرک دکترا، اس‌اف‌اچ‌ای‌ای، ای‌اس‌سی‌سی، سی‌اس‌سی‌اس[1] مدرس فیزیولوژی و مدیر دوره کارشناسی ارشد تمرینات قدرتی و بدنسازی در دانشگاه لوفبرو[2]، انگلستان است. ریچارد یک مربی معتبر قدرت و بدنسازی [3] و متخصص مجرب قدرت و بدنسازی است و قبلاً مدیر انجمن قدرت و بدنسازی بریتانیا بود. او تقریباً ۱۵ سال مربی دونده‌های نیمه استقامت و استقامت بوده است، از جمله چندین ورزشکار المپیک و ورزشکارانی که در مسابقات مهم بین‌المللی مدال کسب کرده‌اند. او مدرک دکترای خود را از دانشگاه نورتامبریا[4] با تحقیق درباره سودمندی تمرینات قدرتی در دونده‌های استقامت نوجوان دریافت کرد و برای بیش از ده‌ها سخنرانی در زمینه آمادگی جسمانی دونده‌ها دعوت‌شده است.

فیلیپ آر. هایز، دارای مدرک دکترا، سی‌اس‌سی‌آی[5]، مدرس ارشد در دانشگاه نورتامبریا[6] است. او مدرک دکترای خود را از این دانشگاه گرفته است و از سال ۱۹۹۱ استاد آنجا بوده است. در این مدت او ۱۴ سال مدیر دوره کارشناسی ارشد (اچ‌اُن‌اس[7]) علم تمرین و ورزش کاربردی بوده است. علاقه تحقیقاتی اصلی او نقش قدرت عضلانی (حاد و مزمن)[8] و نقش آن در (۱) عملکرد دویدن، (۲) جبران تغییرات مرتبط با خستگی در راه رفتن، (۳) آسیب‌های ناشی از استفاده افراطی است. فیل یک مربی دوهای نیمه استقامت و استقامت دوومیدانی سطح ۴ بریتانیا است که برای یک باشگاه دوومیدانی محلی مربیگری می‌کند. او مربی دونده‌های زیر ۲۳ سال انگلستان، دانشجویان انگلستان، زیر ۲۰ سال انگلستان و زیر ۱۸ سال انگلستان [9]، همراه با مدال‌آوران بین استانی، دانشگاه‌های بریتانیا و مدارس انگلستان بوده است. او قبلاً مربی منطقه‌ای دوومیدانی بریتانیا (شمال شرق انگلستان) برای مسابقات استقامت بوده است. فیل همچنین حامی علمی و ورزشی ورزشکاران محلی متعددی بوده است که برخی از آن‌ها در مسابقات قهرمانی بین‌المللی از جمله المپیک، مسابقات جهانی دو صحرانوردی و بازی‌های مشترک‌المنافع شرکت کرده‌اند.

---

[1] Richard C. Blagrove, PhD, SFHEA, ASCC, CSCS

[2] Loughborough

[3] Strength and Conditioning Coach

[4] Northumbria

[5] Philip R. Hayes, PhD, CSci

[6] Northumbria

[7] Hons

[8] Role of muscular strength (acute and chronically)

[9] GB U23, GB Students, GB U20, and GB U18

فهرست محتوا

فهرست شکل‌ها

فهرست جدول‌ها

درباره مشارکت‌کنندگان

پیشگفتار

بخش اول

مبانی علمی تمرین و عملکرد

۱ عوامل تعیین‌کننده فیزیولوژیکی در دوهای نیمه استقامت و استقامت

فیلیپ آر. هایز و دانیل ای. گوردون

۲ بیومکانیک دوهای استقامت

برایان هانلی

۳ آسیب‌های متداول در استفاده بیش از حد از یک عضله در دونده‌ها و عوامل خطر آسیب

کریستوفر ای. براما

۴ الزامات تغذیه‌ای برای دونده‌های استقامت

متیو کول، ریچارد سی. بلاگرو، مگان ای. براون، جنی کارتر و جاستین دی. رابرتز

۵ روانشناسی دوهای استقامت

استیسی وینتر و کارلا میجن

بخش دوم

تمرین و ملاحظات در مسابقه

۶ ارزیابی فیزیولوژیکی دونده‌های نیمه استقامت و استقامت

اندی گالبریت

۷ آزمون حرکت و ارزیابی ظرفیت فیزیکی

لوئیس پی هاو و پل جی. رید

۸ مدیریت حجم و شدت تمرین در بین دونده‌های نخبه نیمه استقامت و استقامت

آرتورو کاسادو و لیف اینگه تجلتا

۹ کاهش تمرینات و به اوج رساندن آمادگی برای یک رویداد یا مسابقه مهم

کیت ال. اسپیلزبری

۱۰ مطالعه موردی در مربیگری یک دونده و درس‌های آموخته‌شده

استیو مکلین

۱۱ استراتژی تغذیه کوتاه‌مدت برای به حداکثر رساندن عملکرد در روز مسابقه

جاستین دی. رابرتز و متیو کول

۱۲ استراتژی تصمیم‌گیری و تاکتیکی در مسابقات دوهای نیمه استقامت و استقامت

اندی رنفری و برایان هانلی

۱۳ تمرین قدرتی برای تقویت عملکرد و کاهش خطر آسیب

ریچارد سی. بلاگرو و دیوید آر. هوپر

بخش سوم

مسائل و موارد خاص

۱۴ کنترل و نظارت بر تمرین

مارک آر. هومر و چارلز آر. پدلا ر

۱۵ استراتژی برگشت به حالت اولیه و استراحت

گلین هاواتسون و تام کلیفورد

۱۶ پرورش دونده‌های استقامت جوان

ریچارد سی. بلاگرو، فیلیپ ای. کرنی و کارلا ال. درو

۱۷ ملاحظاتی برای دونده‌های زن

جورجی بروینولز، استر گلداسمیت و نیکولا براون

۱۸ افت عملکرد در دونده‌های حرفه‌ای استقامت

چری ایی. دیس و آران پارمار

پیشگفتار

محبوبیت دوهای استقامت به‌عنوان یک ورزش و یک فعالیت تفریحی در بالاترین حد خود قرار دارد. در منتهی‌الیه نخبگان این ورزش، رقابت شدید است و دونده‌ها برای کسب مقام در تیم ملی خود و کسب مدال در مسابقات قهرمانی با اختلاف اندک تلاش می‌کنند. به‌عنوان‌مثال، در فینال ۸۰۰ متر رنان در بازی‌های المپیک آتن در سال ۲۰۰۴، اختلاف مقام اول و مقام چهارم ۰,۱۳ بود. دونده‌های تفریحی دلایل مختلفی از جمله بهبود سلامتی خود، کسب حس موفقیت و رضایت و معاشرت با دوستان برای شرکت در این ورزش را دارند. صرف‌نظر از سطح مشارکت، دونده‌ها دارای اشتیاق متقابل به دویدن و تمایل به مصونیت از آسیب و رسیدن به اهداف خود هستند. برای دونده‌ها در تمام سنین و توانایی‌های آن‌ها معمول است که فعالانه در مورد بهترین روش‌های تمرین، بهینه‌سازی بهبودی و اجتناب از آسیب به دنبال مشاوره باشند. بحث‌های رسانه‌های اجتماعی سؤالات مشابهی دارند که تقریباً هر روز توسط دونده‌هایی سوال می‌شود که به دنبال پاسخی برای سؤالات مربوط به عملکرد و آسیب خود هستند. به عنوان مثال، «بهترین راه برای پیشرفت تمرینات من چیست؟» «آیا باید تمرینات وزنه انجام دهم؟» «آیا پوشیدن لباس‌های فشرده به بهبودی من کمک می‌کند؟» «بهترین چیز برای خوردن بعد از دویدن چیست؟» اینترنت همچنین مملو از «پیشگامان»[1] آنلاین و دونده‌های همکار است که به سرعت توصیه می‌کنند و تجربیات خود را به اشتراک می‌گذارند؛ بااین‌حال، بسیاری از این نکات بر اساس حکایات و نظراتی است که فاقد هرگونه مبنای علمی است. علاوه بر این، در سال‌های اخیر رشد زیادی در ارائه برنامه‌های آموزشی برای مربیان دو و پژوهشگران ورزشی مشتاق وجود داشته است که باید با منابع با کیفیت حمایت شود. انگیزه اصلی ما برای نوشتن این کتاب پرداختن به مرسوم‌ترین موضوعات و سؤالات موردعلاقه دونده‌های استقامت و مربیان از طریق دعوت از پژوهشگران و متخصصان ورزشی پیشرو جهان برای به اشتراک گذاشتن دانش و خرد خود بود.

رویکردهای مختلفی برای تمرین دونده‌های استقامت وجود دارد. بااین‌حال، اصول اولیه و عوامل لازم برای موفقیت برای هر دونده استقامتی قابل‌استفاده است. علاوه بر این، درک ما از علم زیربنایی تمرین و آمادگی جسمانی دونده‌های استقامت به‌طور قابل‌توجهی در طی دهه گذشته توسعه‌یافته است. باتجربه‌ترین و موفق‌ترین مربیان و متخصصانی که با دونده‌های استقامت کار می‌کنند، به‌ندرت این فرصت را دارند که روش‌های آزموده شده خود را به اشتراک بگذارند. به همین ترتیب، آثار بدیع دانشمندان ورزش اغلب فقط برای دونده‌های نخبه و آن‌هایی که در دانشگاه هستند، قابل‌دسترسی است. در این کتاب، ما تصمیم گرفتیم تا علم و هنر مربیگری مرتبط با آماده‌سازی دونده‌ها برای رویدادها/مسابقات نیمه استقامت و استقامت را به هم پیوند دهیم. این کتاب جدیدترین شواهد علمی انتشاریافته توسط صاحب‌نظران ورزشی پیشرو در جهان را با اصول و استراتژی‌های آموزشی درست مربیان و متخصصان با تجربه ترکیب می‌کند. ما تلاش می‌کنیم تا تحقیقات علمی پیشرفته از رشته‌های فیزیولوژی، بیومکانیک، روانشناسی و تغذیه را به پیشنهادهای کاربردی برای دستیابی به موفقیت تبدیل کنیم. همچنین به مسائل مهم و شیوه‌های معاصر مربوط به سلامت و عملکرد می‌پردازیم.

ما این کتاب را به سه بخش تقسیم کرده‌ایم. بخش اول به علم زیربنایی موفقیت در دوِ استقامت از دیدگاه چند رشته‌ای، از جمله فیزیولوژی، بیومکانیک، تغذیه و روانشناسی می‌پردازد. بخش دوم شیوه‌های تمرینی مؤثر و اینکه چگونه دونده‌ها می‌توانند به بهترین شکل خود را برای شرکت/رقابت در رویداد (های) انتخابی خود آماده کنند، بررسی می‌کند. بخش سوم بر چندین موضوع مهم و موجود مرتبط با تمرین دوِ استقامت تمرکز دارد و ملاحظات خاصی را برای گروه‌های فرعی دونده‌ها موردبحث قرار می‌دهد. ما سعی کرده‌ایم خلاصه‌ای از آخرین تحقیقات مرتبط با هر موضوع، مسئله یا جمعیت دونده را به خوانندگان ارائه دهیم و توصیه‌هایی را ارائه کنیم که دونده‌ها و مربیان می‌توانند در آموزش و تمرینات خود پیاده‌سازی کنند. مطالب کتاب مسابقات نیمه استقامت (۸۰۰ متر تا ۳۰۰۰ متر) و استقامت (۵ کیلومتر تا ماراتن) را پوشش می‌دهد و بخش زیادی از محتوا همچنین برای رویدادهای فوق استقامت (بیش از ۴ ساعت) کاربرد دارد. ما گهگاه از اصطلاح «دوِ استقامت» استفاده می‌کنیم که آن را به عنوان رویدادها/مسابقات به طول بیش از ۳۰ دقیقه تعریف می‌کنیم[2].

[1] Gurus

[2] Saris et al., 2003

هدف ما گرد هم آوردن گروهی از صاحب‌نظران ورزش و متخصصان کاربردی بود که هرکدام تجربه زیادی در تحقیق و/یا حمایت مستقیم از دونده‌های نیمه استقامت و استقامت دارند. همان‌طور که در فهرست مشارکت‌کنندگان این کتاب خواهید خواند، ما مطمئناً معتقدیم که به این مهم دست یافته‌ایم. اکثر نویسندگانی که در نگارش این کتاب کمک کرده‌اند، به‌طور گسترده‌ای متخصصان پیشرو جهان در زمینه‌های تخصصی کار خود با دونده‌های استقامت هستند و در بسیاری از موارد حوزه کاری آن‌ها هم تحقیقاتی و هم کاربردی است. ما بسیار سپاسگزاریم که آن‌ها مایل بودند کار و دیدگاه خود را در مورد آماده‌سازی دونده‌های استقامت با ما به اشتراک بگذارند. همکاری با هر یک از آن‌ها در این پروژه یک مزیت بوده است و امیدواریم که شما هم مانند ما از خواندن و استفاده از این مطالب لذت ببرید.

ریچ و فیل

بخش اول

مبانی علمی تمرین و عملکرد

فصل ۱

عوامل تعیین‌کننده فیزیولوژیکی در دو های نیمه استقامت و استقامت

فیلیپ آر. هایز و دانیل ای. گوردون[1]

نکات مهم

- مسابقات در دوهای نیمه استقامت و استقامت بر اساس ترکیب پیچیده‌ای از عوامل تعیین می‌شود.
- بالاترین میزان تولید انرژی که می‌تواند در طول مسابقه حفظ شود و توانایی تبدیل آن به حرکت، تعیین‌کننده عملکرد در دوهای نیمه استقامت و استقامت است.
- سیستم هوازی اصلی‌ترین سیستم انرژی مورداستفاده در دوهای نیمه استقامت و استقامت است.
- سیستم بی‌هوازی برای مسابقات نیمه استقامت و سازگاری با تغییر سرعت در مسابقه مهم است.
- تمرین مناسب می‌تواند تمام عوامل تعیین‌کننده عملکرد در نیمه استقامت و استقامت را بهتر کند.

مقدمه

دویدن یکی از محبوب‌ترین فعالیت‌های ورزشی جهانی و اوقات فراغت است[2]. محبوبیت دویدن در سال‌های اخیر با ایجاد رویدادهایی مانند پارکران، دوِ ۵ کیلومتر هفتگی و آزاد که با ۱۳ دونده در سال ۲۰۰۴ آغاز شد و اکنون ۵ میلیون دونده ثبت‌نام‌شده در سراسر جهان دارد، افزایش‌یافته است. در سرتاسر جهان، دونده‌ها نه‌تنها برای مزایای اجتماعی و سلامتی، هم فیزیولوژیکی و هم روان‌شناختی، می‌دوند، بلکه برای به چالش کشیدن خود، انجام بهترین دویدن شخصی خود و در بالاترین سطح کسب عناوین جهانی و شکستن رکوردهای جهانی

[1] Daniel A. Gordon

[2] Hulteen et al., 2017

می‌دوند. این دونده‌ها در هر سطحی که باشند، عملکرد همه آن‌ها از طریق فرآیندهای فیزیولوژیکی یکسان حاصل می‌شود. این فصل به این فرآیندها می‌پردازد. قبل از ارائه مدلی از عوامل تعیین‌کننده عملکرد دویدن که هرکدام را در ادامه توضیح می‌دهیم، با ارتباط بین عملکرد دویدن و تأمین انرژی آغاز می‌کنیم.

مسیرهای انرژی زیستی (انرژی جانداران)

برای اولین بار نزدیک به ۱۰۰ سال پیش معلوم شد[1] که یک رابطه اغراق‌آمیزی بین مدت‌زمان مسابقه و سرعت دویدن وجود دارد که می‌تواند برای مسافت معینی حفظ شود (شکل ۱–۱ الف). این را غالباً مدل توان–مدت زمان یا در مورد دویدن، مدل سرعت–مدت زمان نامیده می‌شود. این رابطه بازتاب حد بالایی عملکرد انسان است، اما باید به خاطر داشت که از دونده‌های مختلف شکل می‌گیرد که هرکدام مشخصات فردی خاص خود را دارند (شکل ۱–۱ ب). مشخصات فردی شاید تصویر واقعی‌ترِ توانایی دویدن باشد. مدل سرعت–مدت زمان را که گاهی به عنوان یک مدل انرژی زیستی از آن یاد می‌شود، می‌توان بر اساس سرعت تولید انرژی در مسیرهای متابولیک سلولی مختلف توضیح داد. از نظر ظاهری درست است، اما مجموعه پیچیده‌ای از حرکات ماهیچه‌ای هماهنگ و مکرر برای تولید نیروی لازم برای دستیابی و حفظ سرعت مطلوب دویدن لازم است. این انقباض‌های عضلانی، توسط فرآیندهای متابولیک سلولی ایجاد می‌شود که در مورد سیستم هوازی مستلزم ادغام با سیستم قلبی عروقی و ریوی برای تأمین اکسیژن لازم است.

هرچه سرعت دویدن بیشتر باشد، عضلات فعال باید با سرعت بیشتری نیرو تولید کنند و سیستم‌های متابولیک انرژی لازم را تولید می‌کنند. «جریان»[2] لازم برای تولید نیرو در عضله آدنوزین تری فسفات (ای‌تی‌پی)[3] است که در صورت هیدرولیز انرژی مورداستفاده در چرخه پل عرضی آن را آزاد می‌کند. مقدار آدنوزین تری فسفات ذخیره‌شده در عضله اسکلتی بسیار کم است (تقریباً ۲۰–۲۵ میلی مول کیلوگرم عضله)؛ بااین‌حال، مجموعه‌ای از مکانیسم‌های تنظیمی که عموماً به عنوان سیستم‌های انرژی یا مسیرهای متابولیک شناخته می‌شوند، از کاهش فاجعه‌آمیز[4] و تخریب کامل آن جلوگیری می‌کنند. این سه مسیر متابولیک متمایز اما به‌هم‌پیوسته به‌طور هم‌زمان اما با سرعت متفاوت عمل می‌کنند. درمجموع، آن‌ها برای تأمین نیازهای انرژی آنی عضله عمل می‌کنند[5]. سرعت و مدت‌زمان متفاوت این مسیرها در تولید آدنوزین تری فسفات باعث ایجاد رابطه سرعت–مدت زمان می‌شود.

اولین مسیر (آدنوزین تری فسفات –پی‌سی‌آر) شامل بازسازی آدنوزین تری فسفات از طریق تقسیم فسفات پرانرژی، فسفوکراتین (پی‌سی‌آر)[6] است.

[1] Hill and Lupton, 1923

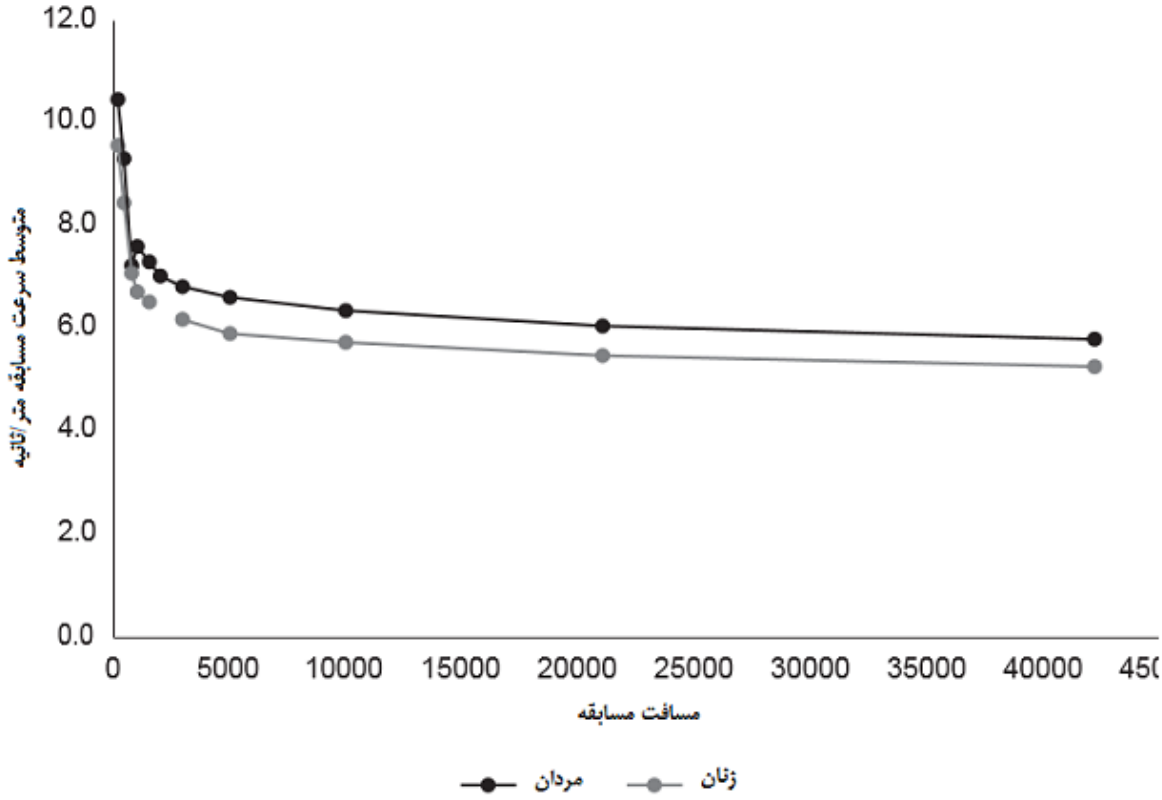
[2] Currency

[3] Adenosine tri-phosphate (ATP)

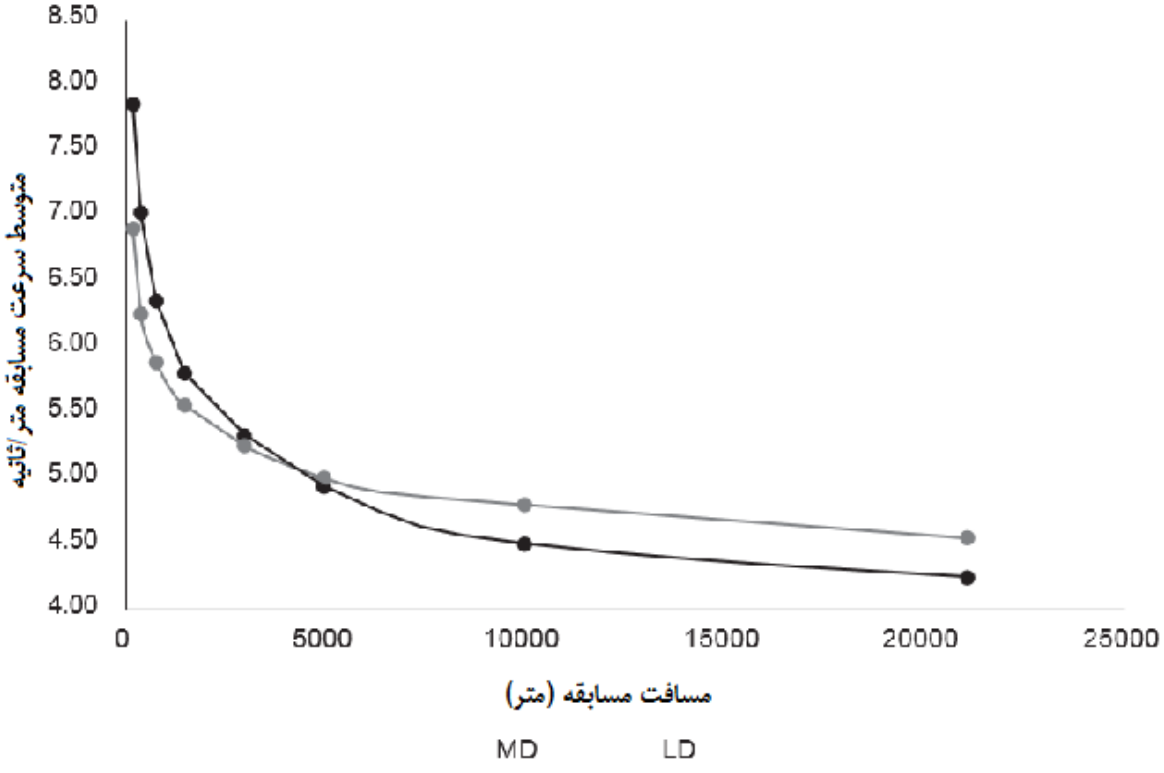
[4] Joyner, 2016

[5] Sahlin et al., 1998; Kang et al., 2014

[6] Phosphate, phosphocreatine (PCr)



شکل ۱-۱ الف رکورد جهانی سرعت دویدن مردان و زنان



شکل ۱-۱ ب مقایسه سرعت دویدن یک دونده نیمه استقامت (امدی) استقامت (الدی)

این منبع فوری انرژی دارای نرخ سریع سنتز مجدد آدنوزین تری فسفات تقریباً (۹ میلی‌مول در کیلوگرم در دسیمل در ثانیه) است و در طول حداکثر تلاش تقریباً در ۱۰ ثانیه به‌طور کامل تخلیه می‌شود[1]. مسیر دوم (گلیکولیتیک یا سیستم اسید لاکتیک[1]) شامل تجزیه

[1] Hirvonen et al., 1987

کربوهیدرات‌های ذخیره‌شده، عمدتاً به شکل گلیکوژن عضلانی[2] و همچنین گلوکز خون، در شرایط «بی‌هوازی»[3] است که منجر به سنتز مجدد آدنوزین تری فسفات و تشکیل پیروات و سپس لاکتات[4] می‌شود. بااین‌حال، سرعت آزادسازی انرژی از گلیکولیز کمی‌کندتر از تجزیه فسفوکراتین است که اوج میزان گردش آن تقریباً ۶–۹ میلی‌مول در کیلوگرم در دسیمل در ثانیه است. در مقایسه با مسیر آدنوزین تری فسفات– پی‌سی‌آر (فسفاژن)، گلیکولیز ظرفیت بیشتری برای سنتز مجدد آدنوزین تری فسفات (فسفاژن) دارد و ذخایر گلیکوژن در حدود ۲۵۰ میلی‌مولار کیلوگرم بر کیلوگرماست. هر دو مسیر پی‌سی‌آر (فسفاژن) و گلیکولیتیک بی‌هوازی هستند، به این معنی که اگرچه اکسیژن در عضله وجود دارد، در واکنش‌های شیمیایی که منجر به سنتز مجدد آدنوزین تری فسفات می‌شود، استفاده نمی‌شود. مسیر متابولیک نهایی، تنفس هوازی (میتوکندری)[5] است که در مقابل، نیاز به استفاده از اکسیژن برای سنتز مجدد آدنوزین تری فسفات از تجزیه کربوهیدرات‌ها، چربی‌ها و در شرایط افراطی پروتئین‌ها دارد. بازده آدنوزین تری فسفات از مسیر هوازی بیشتر است؛ تجزیه یک مولکول گلیکوژن از طریق گلیکولیز منجر به بازده خالص ۳ آدنوزین تری فسفات می‌شود، در مقایسه با ۳۴ آدنوزین تری فسفات بیشتر که از تنفس میتوکندری تولید می‌شود. این افزایش بازده انرژی به قیمت کاهش قابل توجه سرعت تولید آدنوزین تری فسفات در تقریباً ۱,۳۲ میلی‌مول در کیلوگرمدر دسیمل در ثانیه است. اگر سرعت انتشار آدنوزین تری فسفات به صورت گرافیکی ترسیم شود، یک رابطه هذلولی مشاهده می‌شود که تا حد زیادی رابطه اغراق‌آمیزی بین متوسط سرعت مسابقه و زمان را توضیح می‌دهد.

تاکنون این مسیرهای انرژی به طور جداگانه تعریف شده‌اند، اما همان‌طور که قبلاً تأکید شد، آن‌ها هم‌زمان عمل می‌کنند. به عنوان مثال، در طول یک مسابقه دوومیدانی نیمه استقامت، ورزشکار از انرژی حاصل از هر سه مسیر متابولیک استفاده می‌کند. با افزایش مسافت مسابقه، سهم نسبی سیستم هوازی هم افزایش می‌یابد (جدول ۱–۱).

جدول ۱–۱ سهم سیستم انرژی نسبی بر اساس زمان و مسافت مسابقه

مسافت مسابقه (متر)	درصد حداکثر اکسیژن مصرفی	درصد هوازی	درصد بی‌هوازی	مدت‌زمان مسابقه (ثانیه)	درصد هوازی	درصد بی‌هوازی
۸۰۰	۱۳۰–۱۱۵	۷۰–۶۰	۴۰–۳۰	۷۵	۵۱	۴۹
۱۵۰۰	۱۱۵–۱۰۵	۸۵–۸۰	۲۰–۱۵	۹۰	۶۵	۴۴
۳۰۰۰	تقریباً ۱۰۰	۹۰–۸۵	۱۵–۱۰	۱۲۰	۶۳	۳۷
۵۰۰۰	۱۰۰–۹۵	۹۵–۹۰	۱۹–۵	۱۸۰	۷۳	۲۷
۱۰۰۰۰	۹۵–۹۰	۹۷	۳	۲۴۰	۷۹	۲۱
ماراتن	۸۰–۷۵	۹۹,۹	۰,۱			

توجه: این به مدت‌زمان مسابقه بستگی دارد.

منبع: سندفورد و استلینگورف (۲۰۱۹)[6]، ب گاستین (۲۰۰۱)[7].

---

[1] Glycolytic

[2] Muscle glycogen

[3] Anaerobic

[4] Re-synthesis and the formation of pyruvate and then lactate

[5] Final metabolic pathway is aerobic (mitochondrial) respiration

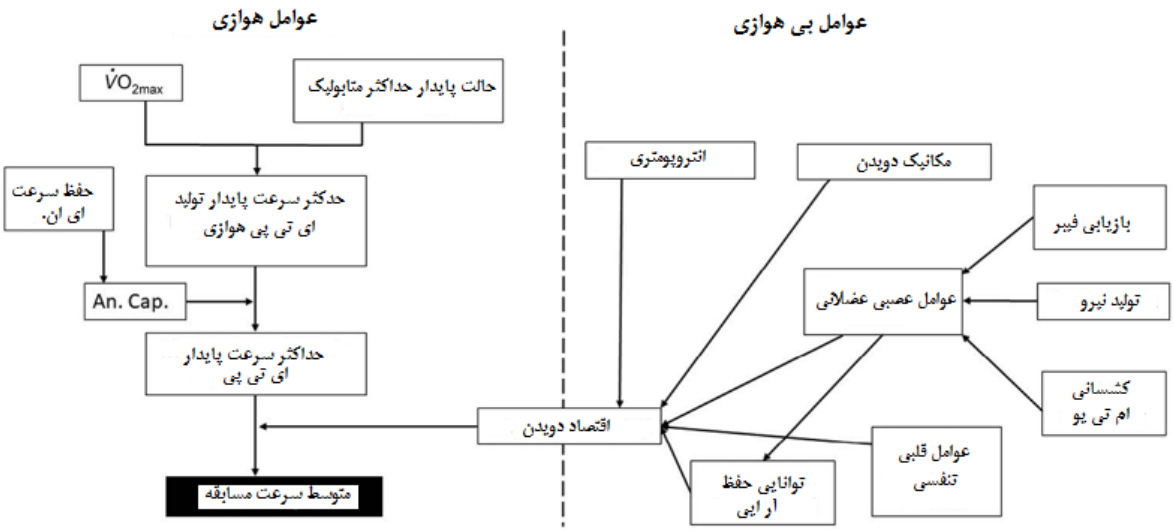
[6] Sandford and Stellingwerf (2019)

[7] Gastin (2001)

بااین‌حال، توجه به این نکته مهم است که مدت‌زمان مسابقه، نه مسافت، سهم نسبی را تعیین می‌کند. برای مثال در دوندههای ۱۵۰۰ متر مرد و زن با استاندارد نسبی مشابه، سهم هوازی به بی‌هوازی به ترتیب ۷۵:۲۵٪ و ۸۳:۱۷٪ بود[1]. نکته دیگری که باید به آن توجه کرد، این است که تمام مسابقات نیمه استقامت و استقامت عمدتاً هوازی هستند، حتی مسابقه ۸۰۰ متر و بنابراین می‌توانند به عنوان رویدادهای «استقامتی» در نظر گرفته شوند.

مدل‌های عملکرد (نمونه‌هایی از اجرا)

چندین مدل برای توضیح عوامل اصلی و تعیین‌کننده در دوِ استقامت توسعه‌یافته است[2]. این نمونه‌ها عموماً بر سه مؤلفه اصلی تمرکز دارند، یعنی حداکثر اکسیژن مصرفی ، اقتصاد دویدن و استفاده کسری از حداکثر اکسیژن مصرفی یا معیارِ حداکثر متابولیک حالت پایدار و یکنواخت. این سه عامل تقریباً ۷۰ تا ۸۰ درصد عملکرد دوِ نیمه استقامت[3] و دوِ استقامت[4] را توضیح می‌دهند. چنین مدل‌هایی را می‌توان مدل‌های متابولیک در نظر گرفت. پااوولاینن و همکاران (۱۹۹۹الف)[5] عوامل عصبی–عضلانی را که شامل کنترل عصبی، نیروی عضلانی و کشسانی و مکانیک دویدن می‌شد، به عوامل متابولیک سنتی اضافه کرد. مدل پیشنهادی در این فصل (شکل ۱–۲) تلفیقی از این مدل‌ها برای توضیح گفته اخیر است. در این مدل، سرعت مسابقه به دو عامل کلیدی بستگی دارد: حداکثر میزان تولید آدنوزین تری فسفات (انرژی متابولیک) که می‌تواند در طول مسابقه پایدار بماند و اقتصادی دویدن، می‌تواند به عنوان توانایی تبدیل انرژی متابولیک به حرکت در نظر گرفته شود. هم اقتصادی دویدن و هم حداکثر سرعت پایدار تولید آدنوزین تری فسفات به صورت چندعاملی هستند. حداکثر سرعت پایدار تولید آدنوزین تری فسفات به مدت‌زمان تمرین بستگی دارد؛ هر چه مدت‌زمان کوتاه‌تر باشد، سرعت که می‌توان حفظ کرد، بیشتر است. در شدت‌های بالاتر از حداکثر متابولیک حالت پایدار، سیستم هوازی نمی‌تواند آدنوزین تری فسفات را با سرعت کافی تولید کند تا نیازهای تمرین را تأمین کند. در این وضعیت، کمبود، یا کسری، با استفاده از ظرفیت بی‌هوازی جبران می‌شود؛ بااین‌حال، این وضعیت پایدار نیست زیرا زمانی که ظرفیت بی‌هوازی کاهش می‌یابد، خستگی رخ می‌دهد و ورزشکار باید سرعت خود را کاهش دهد (برای بحث مفصل در مورد خستگی در شدت‌های مختلف تمرین به برنلی و جونز، ۲۰۱۸ مراجعه کنید). در مسابقات نیمه استقامت، سرعت دویدن به طور قابل‌توجهی بالاتر از حداکثر متابولیک حالت پایدار را می‌توان برای مدت‌زمان مسابقه حفظ کرد. بنابراین، سیستم هوازی نمی‌تواند آدنوزین تری فسفات را با سرعت کافی تولید کند تا انقباض‌های عضلانی را تسریع کند و تولید آدنوزین تری فسفات بی‌هوازی به عامل مهمی تبدیل می‌شود. با افزایش مسافت مسابقه، سرعت دویدن پایدار کاهش می‌یابد، در حداکثر متابولیک حالت پایدار به سرعت نزدیک‌تر می‌شود، درنتیجه اهمیت حداکثر متابولیک حالت پایدار افزایش می‌یابد، درحالی‌که برعکس آن در مورد تولید آدنوزین تری فسفات بی‌هوازی صدق می‌کند.



[1] Hill, 1999

[2] e.g. Joyner, 1991; Bassett and Howley, 2000

[3] Blagrove et al., 2019

[4] McLaughlin et al., 2010

[5] Paavolainen et al. (1999a)

شکل ۱-۲ مدل قطعی عملکرد دوهای نیمه استقامت و استقامت

ای‌ان. = بی‌هوازی، آدنوزین تری فسفات = آدنوزین تری‌فسفات، ای‌وی.= متوسط، سی‌ای‌پی. = ظرفیت، واحد تاندون عضله = واحد عضله-تاندون، پی‌آرأُدی. = تولید، آرایی = اقتصادی دویدن، $\dot{V}O2_{max}$ = حداکثر اکسیژن مصرفی

حداکثر اکسیژن مصرفی ($\dot{V}O2_{max}$)

حداکثر اکسیژن مصرفی اغلب به عنوان حداکثر سرعت دریافت و مصرف اکسیژن توسط بدن تعریف می‌شود[۱]، اما همچنین می‌توان آن را به عنوان حداکثر سرعت تولید آدنوزین تری فسفات از طریق مسیر هوازی در نظر گرفت[۲]. در گروه‌های ناهمگن، یک رابطه منفی قوی بین حداکثر اکسیژن مصرفی و عملکرد مسابقه وجود دارد[۳]، یعنی دونده‌هایی که دارای حداکثر اکسیژن مصرفی بزرگ‌تر هستند زمان سریع‌تری دارند. در مقابل، در گروه‌های همگن دونده‌های تمرین کرده، حداکثر اکسیژن مصرفی یک پیش‌بینی کننده ضعیف در عملکرد است[۴]. این تناقض ظاهری را می‌توان با توجه به این نکته توضیح داد که برای دویدن یک ماراتن ۲ ساعت و ۱۵ دقیقه‌ای، با فرض اقتصادی دویدن با سطح «متوسط»، دونده باید حداکثر اکسیژن مصرفی تقریباً ۶۰ میلی‌لیتر در کیلوگرم در دقیقه را برای کل مسابقه حفظ کند[۵]. این مقدار بالاتر از حداکثر اکسیژن مصرفی بسیاری از دونده‌های تفریحی است. بنابراین، حداکثر اکسیژن مصرفی بالا یک پیش‌نیاز برای دونده‌های نخبه است اما لزوماً یک عامل تعیین‌کننده در دونده‌های نخبه نیست.

گرفتن اکسیژن از آن اتمسفر تا استفاده از آن در میتوکندری یک فرآیند چندمرحله‌ای است. اکسیژن وارد ریه‌ها می‌شود و در جریان خون پخش می‌شود که در آنجا با هموگلوبین پیوند می‌خورد، مقدار اکسیژن منتقل‌شده به مقدار هموگلوبین بستگی دارد. سرعت انتقال اکسیژن در بدن به حداکثر خروجی قلبی (Q_{max})[۶] و مرحله نهایی استخراج و استفاده از اکسیژن توسط عضله فعال بستگی دارد. هر یک از این مراحل به طور بالقوه می‌تواند حداکثر اکسیژن مصرفی را محدود کند و به طور خلاصه بررسی خواهد شد[۷]. توانایی عضله فعال برای استخراج و استفاده از اکسیژن به عنوان یک محدودیت «جانبی» در نظر گرفته می‌شود، درحالی‌که بقیه به عنوان محدودیت‌های «اصلی» در نظر گرفته می‌شوند.

به استثنای بیماری‌های مزمن تنفسی، ریه در سطح دریا عموماً به عنوان یک عامل محدودکننده در تمرین، حتی تمرین حداکثری در نظر گرفته نمی‌شود[۸]. یک استثنای کوچک در اینجا برخی از دونده‌های نخبه هستند که خروجی قلبی فوق‌العاده بالایی دارند. سرعت جریان خون مویرگی ریوی در این ورزشکاران چنان بالاست که زمان کافی برای اشباع مجدد کامل هموگلوبین وجود ندارد و باعث برگشت اشباع شریانی[۹] می‌شود[۱۰]. ارتفاع فشار جزئی اتمسفر اکسیژن (پی‌اُتو)[۱۱] را کاهش می‌دهد، شیب (گرادیان) انتشار را کاهش می‌دهد و درنتیجه اشباع

---

[1] Bassett and Howley, 1997

[2] Medbø et al., 1988

[3] Costill et al., 1973

[4] Conley and Krahenbuhl, 1980

[5] Bassett and Howley, 2000

[6] Maximum cardiac output (Q̇ max)

[7] See reviews: Levine, 2008; Lundby et al., 2017

[8] Dempsey et al., 1984

[9] Re-saturated, causing arterial desaturation

[10] Dempsey et al., 1984

[11] Atmospheric partial pressure of oxygen (PO 2)

هموگلوبین[1] را کاهش می‌دهد[2]. ظرفیت حمل اکسیژن خون (سی‌ای‌اُتو)[3] به مقدار و اشباع هموگلوبین بستگی دارد. معلوم شده است که دست‌کاری محتوای هموگلوبین خون توسط رگ‌گیری با یا بدون تزریق مجدد بعدی به ترتیب باعث کاهش[4] یا افزایش[5] حداکثر اکسیژن مصرفی می‌شود. این مبنای شیوه‌های غیرقانونی (طبق قوانین ورزشی) دوپینگ خون یا مصرف اریتروپویتین (ایی‌پی‌اُ)[6] است. حداکثر برون‌ده قلبی حاصل‌ضرب حداکثر ضربان قلب (HR_{max})[7] و حداکثر حجم ضربه است. یک رابطه خطی تقریباً کامل بین حداکثر برون‌ده قلبی و حداکثر اکسیژن مصرفی وجود دارد. هیچ تفاوتی از لحاظ حداکثر ضربان قلب بین دونده‌های نخبه، دونده‌های تفریحی و افراد تمرین نکرده وجود ندارد، بنابراین تفاوت در حداکثر برون‌ده قلبی به دلیل حجم ضربه بزرگ‌تر دونده‌ها است[8]. در تمرین کل بدن، توانایی قلب برای تأمین خون عضله فعال، به عنوان عامل محدودکننده در حداکثر مصرف اکسیژن تصور می‌شود[9]. حتی در حداکثر اکسیژن مصرفی، ظرفیت میتوکندری برای فسفوریلاسیون اکسیداتیو[10] از توانایی تأمین اکسیژن عضله فعال فراتر می‌رود[11]. در دوهای نیمه استقامت و استقامت، حداکثر خروجی قلبی، به‌ویژه حداکثر حجم ضربه عامل محدودکننده اصلی در حداکثر اکسیژن مصرفی در نظر گرفته می‌شود.

با توجه به اینکه حداکثر اکسیژن مصرفی حد بالا را برای عملکرد استقامتی تعیین می‌کند[12]، جای تعجب نیست که توجه زیادی به نحوه افزایش آن با تمرین شده است. دونده‌های دوهای نیمه استقامت و استقامت، از مقادیر مختلف تمرینات اینتروال و دویدن مداوم به عنوان روش‌های تمرینی استفاده می‌کنند. در افراد بدون تمرین و کم تمرین، ورزش کم شدت برای افزایش حداکثر اکسیژن مصرفی کافی است[13]، که نشان می‌دهد هر دو تمرین مداوم و اینتروال مؤثر هستند. در مقابل در افرادی که به خوبی تمرین کرده‌اند، تمرینات اینتروال مؤثرتر است[14]، با شدت‌های بین ۹۵٪ تا ۱۰۰٪ حداکثر اکسیژن مصرفی توصیه می‌شود[15]. در دهه گذشته، فواصل کوتاه (کمتر از ۳۰ ثانیه) با شدت بالا به روش محبوب و رایج در تمرین برای افزایش حداکثر اکسیژن مصرفی تبدیل‌شده است. بااین‌حال، اثربخشی آن‌ها در ورزشکارانی که به خوبی تمرین کرده‌اند، مبهم است[16]. تکرارهای تمرین در فواصل طولانی‌تر (۳ تا ۵ دقیقه) بیشترین افزایش را در حداکثر اکسیژن مصرفی ایجاد می‌کند[17]، و اخیراً یک فرا تحلیل نشان می‌دهد که فقط حجم نسبتاً بالای (بیش از ۱۵ دقیقه) تکرارهای تمرین در فواصل طولانی

---

[1] Manipulating the haemoglobin

[2] Schoene, 2001

[3] Oxygen carrying capacity of blood (CaO 2)

[4] Gordon et al., 2014

[5] Buick et al., 1980

[6] Erythropoietin (EPO)

[7] Maximum heart rate (HR_{max})

[8] Levine, 2008

[9] Richardson et al., 1999

[10] Oxidative phosphorylation

فرایندی آنزیمی که طی آن مولکول آدنوزین تری فسفات به کمک انتقال الکترون از یک پیش ماده اکسیژن مولکولی، فسفرگیری کرده و آدنوزین تری فسفات تولید می شود (مترجمان).

[11] Lundby et al., 2017

[12] Bassett and Howley, 2000

[13] Midgley et al., 2006a

[14] Milanović et al., 2015

[15] Midgley et al., 2006a

[16] Weston et al., 2014

[17] Bacon et al., 2013

(بیش از ۲ دقیقه) مؤثرتر از تمرین مداوم بود[۱]. توجه به این نکته مهم است که بیشتر این یافته‌ها مربوط به مطالعات انجام‌شده بر روی افرادی است که در بهترین حالت تمرین متعادل کرده‌اند. مطالعات بسیار کمی بر روی دونده‌های خوب تمرین کرده وجود دارد، اما آن‌ها یافته‌های کلی در مورد حجم زیاد تکرارهای طولانی‌تر را تأیید می‌کنند، و بر روی نیاز به‌شدت بیشتر تأکید می‌کنند[۲]. افزایش حداکثر اکسیژن مصرفی ناشی از تمرینات اینتروال عمدتاً به دلیل افزایش $\dot{Q}_{max}$ است که ناشی از حجم ضربه بیشتر است[۳].

اجماع عمومی بر این است که حداکثر اکسیژن مصرفی را می‌توان با تمرین افزایش داد اما به یک حد ژنتیکی می‌رسد، و مطالعات طولی روی دونده‌های بسیار تمرین کرده هیچ تغییری در حداکثر اکسیژن مصرفی، علیرغم بهبود عملکرد، نشان نمی‌دهد[۴]. باوجوداین اتفاق‌نظر، شواهدی از دونده‌های نخبه وجود دارد که حداکثر اکسیژن مصرفی خود را افزایش می‌دهند. به عنوان مثال، یک رکورددار سابق ایالات‌متحده برای ۱۵۰۰ متر و یک مایل حداکثر اکسیژن مصرفی خود را از ۷۴٫۴ میلی‌لیتر در کیلوگرم در دقیقه در شروع مرحله آماده‌سازی به ۸۰٫۱ میلی‌لیتر در کیلوگرم در دقیقه در طول فاز مسابقه افزایش داد[۵]. مایکل ایست،[۶] قهرمان سابق مسابقات ۱۵۰۰ متر بازی‌های مشترک‌المنافع با بهترین رکورد شخصی ۳ دقیقه و ۳۸ ثانیه و ۹ دهم ثانیه به همان اندازه قابل توجه است. پس از یک اقدام دوساله برای تفکیک توزیع شدت تمرین، حداکثر اکسیژن مصرفی او از ۷۲ میلی‌لیتر در کیلوگرم در دقیقه به ۷۹ میلی‌لیتر در کیلوگرم در دقیقه افزایش یافت و زمان ۱۵۰۰ متر او به ۳ دقیقه و ۳۲ ثانیه و ۴ دهم ثانیه افزایش یافت[۷].

حداکثر متابولیک در حالت پایدار و یکنواخت

حداکثر متابولیک **در** حالت پایدار یک آستانه حیاتی در فیزیولوژی استقامت است. در زیر این خط (آستانه بی‌هوازی)، یک حالت پایدار متابولیک به دست می‌آید. در بالای آن، سیستم هوازی نمی‌تواند با سرعت کافی آدنوزین تری فسفات تولید کند تا نیازهای انرژی عضلات اسکلتی را تأمین کند، و سیستم بی‌هوازی را برای رفع کمبود ضروری می‌کند. بنابراین، دویدن درست بالاتر، یا درست پایین‌تر از حداکثر متابولیک حالت پایدار، پاسخ‌های متابولیکی، قلبی تنفسی و خستگی بسیار متفاوتی ایجاد می‌کند (برای بررسی دقیق به جونز و همکاران، ۲۰۱۹ مراجعه کنید[۸]). در شدت‌های بالاتر از حداکثر متابولیک حالت پایدار و یکنواخت، ظرفیت محدود بی‌هوازی محدود شروع به کار می‌کند و مدت‌زمان تمرین طبق دسترسی به آن محدود می‌شود. اصطلاحات مختلفی برای حداکثر متابولیک حالت پایدار ذکرشده است، که رایج‌ترین آن‌ها شروع تجمع لاکتات خون (اُبی‌ال‌ای)[۹]، آستانه لاکتات،[۱۰] نقطه چرخش لاکتات،[۱۱] حالت پایدار لاکتات حداکثری،[۱۲] سرعت بحرانی،[۱۳] آستانه تبادل گاز[۱۴] یا آستانه بی‌هوازی است. این اصطلاحات تا حد زیادی تکنیک اندازه‌گیری به‌کاررفته را نشان می‌دهد[۱].

---

[1] Wen et al., 2019

[2] Midgley et al., 2007

[3] Montero et al., 2015

[4] Daniels et al., 1978; Legaz Arrese et al., 2005

[5] Conley et al., 1984

[6] Michael East

[7] Ingham et al., 2011

[8] Jones et al., 2019

[9] Onset of blood lactate accumulation (OBLA)

[10] Lactate threshold

[11] Lactate turnpoint

[12] Maximum lactate steady state

[13] Critical speed

[14] Gas exchange threshold

بااین‌حال، اجماع عمومی بر آن است که حداکثر متابولیک حالت پایدار به توانایی میتوکندری برای اکسیده سازی پیروات بستگی دارد[۲]. بنابراین، چگالی میتوکندری[۳] و محتوای آنزیم اکسیداتیو یا ظرفیت تنفسی به عوامل کلیدی تبدیل می‌شوند[۴].

صرف‌نظر از اصطلاحات یا پروتکل مورداستفاده، یک رابطه شدید بین معیارهای حداکثر متابولیک حالت پایدار و عملکرد در دوهای نیمه استقامت و استقامت وجود دارد[۵]. بسیاری از مطالعاتی که به عوامل فیزیولوژیکی عملکرد دوِ استقامت پرداخته‌اند، نشان داده‌اند که حالت پایدار متابولیک حداکثر، پیش‌بینی کننده قوی‌تری برای عملکرد نسبت به حداکثر اکسیژن مصرفی است[۶]. در رابطه با سرعت مطلق دویدن، ورزشکارانی که زمان سریع‌تری در مسافت یکسان دارند، سرعت بالاتری را در حداکثر متابولیک حالت پایدار نشان می‌دهند. برای مثال، در گروهی از دونده‌های ماراتن با زمان پایان بین ۲ ساعت و ۳۰ دقیقه و ۳ ساعت و ۰۰ دقیقه، بین ۳ ساعت و ۳۰ دقیقه و ۴ ساعت و ۰۰ دقیقه و بیش از ۴ ساعت و ۳۰ دقیقه، سرعت در نقطه چرخش لاکتات به ترتیب ۰,۷ ± ۱۵,۵ کیلومتر در ساعت، ۱,۶ ± ۱۳,۱ کیلومتر در ساعت و ۱,۲ ± ۱۰,۹ کیلومتر در ساعت بود[۷]. دونده‌های استقامت معمولاً دارای حداکثر متابولیک حالت پایدار بالاتری نسبت به دونده‌های نیمه استقامت هستند[۸] که در برخی از دونده‌های استقامت به ۸۵٪ حداکثر اکسیژن مصرفی می‌رسد[۹]. حداکثر متابولیک حالت پایدار نسبتاً بالا (یعنی درصد بالای حداکثر اکسیژن مصرفی) بهترین پیش‌بینی کننده (r=۰,۸۹) برای مدت‌زمانی بود که دونده‌های تقریباً تمرین کرده می‌توانند هم اندازه با حداکثر اکسیژن مصرفی خود بدوند[۱۰].

داده‌های جمع‌آوری‌شده در یک دوره ۱۰ ساله درباره رکورددار سابق ماراتن زنان جهان، پائولا رادکلیف[۱۱]، نشان داد که سرعت او در آستانه لاکتات از ۱۴,۰ کیلومتر در ساعت به ۱۸ کیلومتر در ساعت افزایش‌یافته است. در این مدت، بهترین عملکرد شخصی او از ۳۰۰۰ متر تا ماراتن به طور هم‌زمان بهبود یافت[۱۲]. این افزایش طولی در حداکثر حالت پایدار، همراه با افزایش نسبتاً بیشتر ظرفیت اکسیداتیو عضلانی در مقایسه با حداکثر اکسیژن مصرفی، منجر به این دیدگاه شده است که حداکثر متابولیک حالت پایدار نسبت به حداکثر اکسیژن مصرفی «قابل تمرین‌تر» است. علیرغم این « تمرین‌پذیری» ظاهری و همبستگی شدید با عملکرد، مطالعات نسبتاً کمی بر روی رویکرد تمرینی بهینه تمرکز کرده‌اند. مروری بر ۵۶ مطالعه، که اکثر آن‌ها بر اساس دوچرخه‌سواری در افراد تمرین نکرده یا نسبتاً فعال بودند، حجم تمرین در افزایش محتوای میتوکندری مهم‌تر از شدت تمرین بود[۱۳].

علاوه بر این، به نظر می‌رسد که با توقف تمرین، دستاوردهای تمرینی میتوکندری به سرعت از بین می‌رود[۱۴]. این دیدگاه که حجم مهم‌تر از شدت است، موردبحث بوده است[۱]، اما حجم بالا و توزیع شدت تمرین در ورزشکاران نخبه (به فصل ۸ مراجعه کنید) و داده‌های تمرینی از

---

[1] Jones et al., 2019

[2] Holloszy and Coyle, 1984

[3] Mitochondrial density

[4] Granata et al., 2018

[5] Faude et al., 2009

[6] e.g. Farrell et al., 1979

[7] Gordon et al., 2017

[8] Svedenhag and Sjödin, 1984

[9] Joyner et al., 2020

[10] Midgley et al., 2006b, 2006c

[11] Paula Radcliffe

[12] Jones, 2006

[13] Bishop et al., 2019

[14] Granata et al., 2018

از دونده‌های ماراتن تفریحی به موازات هم هستند[۲]. ورزشکاران از طیف وسیعی از روش‌های تمرینی، از جمله «دویدن تمپو»[۳] با شدتی کمتر از حداکثر متابولیک حالت پایدار، و هر دو تمرین دویدن یکنواخت و اینتروال در بالاتر از حداکثر حالت پایدار استفاده کرده‌اند[۴]. گنجاندن ۲۰ دقیقه دویدن در هفته با سرعتی که سبب ایجاد لاکتات خون ۴ میلی‌مول در لیتر (یک معیار جایگزین برای حداکثر متابولیک حالت پایدار) به مدت ۱۴ هفته در دونده‌های بسیار تمرین کرده می‌شود، منجر به افزایش این سرعت شد[۵].

ظرفیت بی‌هوازی

ظرفیت بی‌هوازی که به عنوان حداکثر مقدار آدنوزین تری فسفات بازسازی‌شده شده از متابولیسم بی‌هوازی توسط کل ارگانیسم تعریف می شود[۶]، می‌تواند نقش محوری را به‌ویژه درنتیجه عملکرد دونده‌های نیمه استقامت ایفا کند. نسبت انرژی تأمین‌شده توسط سیستم هوازی با افزایش مسافت مسابقه افزایش می‌یابد. بنابراین، سهم ظرفیت بی‌هوازی در مسابقات کوتاه‌تر بیشتر است[۷]. بااین‌حال، این موضوع ارتباط آن را در مسابقات طولانی‌تر که در آن تغییرات ناگهانی در نیاز به انرژی، به دلیل تغییر در سرعت یا زمین کاهش نمی‌دهد و باید فوراً و عمدتاً از طریق سیستم بی‌هوازی انجام شود. مقادیر بالای اوج لاکتات خون (۲٫۱ ± ۱۸٫۶ و ۲٫۱ ± ۲۱٫۹ میلی‌مول در لیتر به ترتیب در زنان و مردان) در دونده‌های نخبه ۸۰۰ متر پس از مسابقه مشاهده‌شده است، در مقایسه با مقادیر معمولی که تقریباً ۳–۵ میلی‌مول در لیتر در حداکثر متابولیک حالت پایدار است. جای تعجب نیست که ظرفیت بی‌هوازی دونده‌های نیمه استقامت تقریباً ۳۰ درصد بیشتر از دونده‌های استقامت است[۸].

با توجه به‌دشواری اندازه‌گیری ظرفیت بی‌هوازی و سهم کمتر متابولیسم بی‌هوازی در تولید کل انرژی، این عامل تعیین‌کننده فیزیولوژیکی توجه تحقیقاتی کمی را به خود جلب کرده است. یافته‌های این تحقیق تا حدودی متفاوت است. روابط ضعیفی ($r \leq$ ۰٫۲۳) بین انواع اندازه‌گیری‌های ظرفیت بی‌هوازی و عملکرد ۸۰۰ متر[۹] در دونده‌های سطح باشگاهی یافت شده است، درحالی‌که همبستگی متوسطی ($r =$ -۰٫۶۱) بین حداکثر کمبود اکسیژن انباشته‌شده و زمان ۸۰۰ متر یافت شد[۱۰]. در مسافت‌های بیش از ۱۵۰۰ متر، در دونده‌های سطح ملی، رابطه شدیدی بین اوج لاکتات خون پس از دویدن تا خستگی و سرعت ۱۵۰۰ متر وجود دارد[۱۱]. هر دو فواصل طولانی (۲ دقیقه) و کوتاه (۲۰ ثانیه) که در شدت‌های بالاتر از حداکثر اکسیژن مصرفی انجام می‌شود، ظرفیت بی‌هوازی را تا حدود ۱۰٪ در افراد تمرین کرده افزایش می‌دهد. در حال حاضر شواهد علمی در مورد رویکرد بهینه برای تمرین ظرفیت بی‌هوازی در دونده‌های به خوب تمرین کرده در نیمه استقامت و استقامت وجود ندارد. بهبود عملکرد در تمرینات شدید هم می‌تواند از طریق روش‌های غیر متابولیک با بهبود تنظیم پتانسیل غشای عضلانی[۱۲] و تمرینات قدرتی[۱۳] به دست آید.

---

[1] MacInnis et al., 2019

[2] Gordon et al., 2017

[3] Tempo runs

[4] Tjelta, 2016; Joyner et al., 2020

[5] Sjödin et al., 1982

[6] Green, 1994

[7] Gastin, 2001

[8] Medbø and Burgers, 1990

[9] Craig and Morgan, 1998; Bosquet et al., 2007a

[10] Ramsbottom et al., 1994

[11] Ferri et al., 2012

[12] Iaia and Bangsbo, 2010

[13] Blagrove et al., 2018a

ذخیره سرعت بی‌هوازی

ذخیره سرعت بی‌هوازی (ای‌اس‌آر)[1] تفاوت بین حداکثر سرعت دویدن و سرعت در حداکثر اکسیژن مصرفی است[2]. رقابت در مسابقات قهرمانی در مسافت‌های متوسط به چیزی بیش از توانایی تولید در سرعت بسیار پایدارِ به تولید آدنوزین تری فسفات به خاطر مدت‌زمان مسابقه نیاز دارد. این مستلزم توانایی تولید سرعت مطلق سریع، به‌ویژه در ۸۰۰ متر[3] و همچنین توانایی مقابله با موج بزرگ ریتم دویدن است[4]. ذخیره سرعت بی‌هوازی به‌اندازه‌ای حساس است که بتواند دونده‌های سطح پایین تر را از دونده‌های نخبه در نیمه استقامت را متمایز کند، که دونده‌های سریع‌تر ۸۰۰ متر دارای ذخیره سرعت بی‌هوازی بزرگ‌تر هستند[5]. از لحاظ نظری، ذخیره سرعت بی‌هوازی را می‌توان با افزایش حداکثر سرعت دویدن یا کاهش سرعت در حداکثر اکسیژن مصرفی افزایش داد. ازآنجاکه سرعت بالاتر در حداکثر اکسیژن مصرفی همچنین با عملکرد بهتر در نیمه استقامت همراه است[6]، بنابراین تنها راه منطقی برای افزایش ذخیره سرعت بی‌هوازی، بهبود حداکثر سرعت است. ذخیره سرعت بی‌هوازی یک مفهوم نوظهور است و هنوز می‌تواند بینش‌های بیشتری در مورد دویدن موفق در مسافت‌های متوسط و استقامت ارائه دهد (نمای دقیق‌تری را می‌توان در سندفورد و همکاران، ۲۰۱۹–سی[7] یافت).

اقتصادی دویدن

اقتصادی دویدن مفهوم ساده‌ای است و به طور سنتی به عنوان اکسیژن حالت پایدار و یکنواخت یا هزینه انرژی برای دویدن با هر سرعتی زیر حداکثر تعریف‌شده است. این روش به دلایل متعددی موردانتقاد قرارگرفته است: (۱) اجازه مقایسه بین دونده‌ها در سرعت‌های مختلف را نمی‌دهد، (۲) بستر استفاده‌شده بر میزان مصرف اکسیژن تأثیر می‌گذارد و (۳) سرعت‌ها مطلق هستند و ارتباطی به حداکثر متابولیک حالت پایدار فرد ندارند[8]. یک روش معتبرتر عبارت از استفاده از هزینه انرژی به ازای هر واحد مسافت طی شده[9] با سرعت‌هایی که به حداکثر متابولیک حالت پایدار فرد مربوط است[10]. این روش امکان مقایسه اقتصادی دویدن در سرعت‌های مختلف دویدن فراهم می‌کند و تغییرات در استفاده از بستر را در نظر می‌گیرد.

از عوامل کلیدی که عملکرد دویدن استقامت را در ورزشکارانی با توانایی مشابه تعیین می‌کند، اقتصادی دویدن[11] شاید متغیرترین باشد، با تفاوت‌های بین افراد که تا ۳۰٪ گزارش‌شده است[12]. مورگان و همکاران (۱۹۹۵) اقتصادی دویدن را در چهار گروه از دونده‌های مرد مقایسه کردند: (۱) کسانی که در مسابقات المپیک (۵ کیلومتر، ۱۰ کیلومتر، ماراتن) شرکت کرده‌اند، (۲) دونده‌های کمتر از نخبه (تقریباً ۳۳ دقیقه برای ۱۰ کیلومتر)، (۳) دونده‌های معمولی (تقریباً ۴۰ دقیقه برای ۱۰ کیلومتر) و (۴) فعال اما تمرین نکرده. به‌طورکلی، دونده‌های سریع‌تر اقتصادی دویدن بهتری داشتند، بااین‌حال تنوع قابل‌توجهی در بین گروه‌ها (تقریباً ۲۰٪) و بین گروه‌ها (تقریباً ۱۰٪) وجود داشت. به‌ویژه شایان توجه بود که اقتصادی دویدن اقتصادی‌ترین دونده تمرین نکرده مشابه میانگین گروه ورزشکاران المپیکی بود (۱۸۲٫۱ در مقابل

---

[1] Anaerobic speed reserve (ASR)

[2] Sandford et al., 2019c

[3] Sandford et al., 2018

[4] Sandford et al., 2019b

[5] Sandford et al., 2019c

[6] Blagrove et al., 2019

[7] Sandford et al., 2019c

[8] Fletcher et al., 2009

[9] Beck et al., 2018; Blagrove et al., 2019

[10] Fletcher et al., 2009; Shaw et al., 2014

[11] Running economy (RE)

[12] Daniels, 1985

۱۸۱٫۹ میلی‌لیتر در یک کیلوگرم در یک دقیقه). باوجوداین، در گروه‌های همگن دونده‌های بسیار تمرین کرده، اقتصادی دویدن، پیش‌بینی کننده بهتری برای عملکرد مسابقه در مسافت‌های طولانی نسبت به حداکثر اکسیژن مصرفی است[۱]. برخی از مطالعات رابطه معکوس بین حداکثر اکسیژن مصرفی و اقتصادی دویدن را در دونده‌هایی با عملکرد یکسان نشان داده‌اند[۲]. بااین‌حال، با توجه به طراحی مطالعه، این امر اجتناب‌ناپذیر است. حداکثر اکسیژن مصرفی پایین باید اقتصادی دویدن بهتر جبران شود تا عملکرد مشابهی حاصل شود. صرف‌نظر از این، یک دونده دارای اقتصادی دویدن عالی انرژی متابولیک کمتری را در هر سرعت مشخصی نسبت به دونده دارای اقتصاد ضعیف تولید می‌کند. فلچر و مک‌اینتاش (۲۰۱۷)[۳] با تجزیه‌وتحلیل فیزیولوژی لازم برای دویدن ماراتن در ۲ ساعت ۰۲ دقیقه و ۵۷ ثانیه، که رکورد جهانی در آن زمان بود، تصویری عالی از اهمیت اقتصادی دویدن ارائه کردند. یک دونده دارای اقتصادی دویدن متوسط (۴٫۳۸ کیلوژول در کیلوگرم در کیلومتر−۱) بهحداکثر اکسیژن مصرفی ۸۵ میلی‌لیتر در کیلوگرم در دقیقه نیاز دارد، درحالی‌که دونده دارای اقتصادی دویدن عالی (۳٫۷۷ کیلوژول در کیلوگرم در کیلومتر)) «فقط» به ۷۷٫۵ میلی‌لیتر در کیلوگرم در دقیقه نیاز دارد.

علیرغم سادگی مفهومی و سهولت اندازه‌گیری، اقتصادی دویدن چندوجهی است و عوامل آنتروپومتری (اندام‌سنجی)، عصبی−عضلانی، قلبی تنفسی و بیومکانیکی[۴] را به‌علاوه توانایی حفظ اقتصادی دویدن در هنگام خستگی (شکل ۱−۲)، در برمی‌گیرد[۵]. علاوه بر این، اقتصادی دویدن اغلب به‌اشتباه «کارایی» نامیده می‌شود.

کارایی، نسبت کار انجام‌شده به انرژی مصرف‌شده است. کار زمانی انجام می‌شود که نقطه اعمال نیرو در مسافت حرکت می‌کند[۶]. در دویدن، بدیهی است که نقطه اعمال نیرو پا است، اما در هنگام اعمال نیرو ثابت می‌ماند و بنابراین کار خالص انجام‌شده صفر است. در مقابل اقتصاد، اندازه‌گیری مصرف انرژی است[۷]، بنابراین در حین دویدن می‌توان اقتصاد را اندازه‌گیری کرد، اما کارایی را نه. در اصل، اقتصاد دویدن توانایی تبدیل انرژی متابولیک به حرکت است.

«تمرین پذیری»[۸] خالص نامشخص است[۹]. بهبود در آن‌هایی که قبلاً تمرین نکرده بودند، تعجب‌آور نیست، اگرچه نتایج در دونده‌های تمرین کرده تا حدودی مبهم است. تعیین مشخصات طولی نتایج متفاوتی را در دونده‌های تمرین کرده نشان داده است[۱۰]، دونده‌هایی در سطح ملی[۱۱] و در سطح جهانی[۱۲] پیشرفت داشته‌اند، که این باور را تقویت می‌کند که اقتصاد خوب محصول تمرین طولانی‌مدت یا پرحجم است. مداخله و فعالیت‌های تمرینی تجربی بیشتر بر روی ورزشکاران تمرین نکرده یا تفریحی انجام می‌شود. دونده‌های بهتر عموماً تمایل کمتری به تغییر برنامه‌های تمرینی خود دارند و اطلاعات کمی در مورد مداخله‌های تمرینی مؤثر در دونده‌های دارای توانایی بالا باقی می‌گذارند. مطابق با این دیدگاه که حجم بیشتر تمرینات مهم است، اخیراً یک فرا تحلیل نشان داد که تمرین و دویدن یکنواخت و پیوسته مؤثرتر از تمرینات اینتروال در افزایش اقتصادی دویدن در دونده‌های تفریحی است[۱۳]. علاوه بر این، فرا تحلیل برخی از عوامل تعدیل‌کننده

---

[1] Conley and Krahenbuhl, 1980; Morgan et al., 1989a

[2] Jones, 2006

[3] Fletcher and MacIntosh (2017)

[4] Incorporating anthropometric, neuromuscular, cardiorespiratory and biomechanical factors

[5] for more detail, see Saunders et al., 2004; Barnes and Kilding, 2015b

[6] Winter and Fowler, 2009

[7] Saunders et al., 2004

[8] Trainability

[9] Joyner et al., 2020

[10] Bragada et al., 2010; Galbraith et al., 2014; Kubo, Miyazaki et al., 2015

[11] Svedenhag and Sjodin, 1985

[12] Conley et al., 1984; Jones, 2006

[13] Gonzalez-Mohino et al., 2020

را، با احتمال افزایش اقتصادی دویدن در برنامه‌های تمرینی طولانی‌تر از ۸ هفته و حجم هفتگی بیش از ۱۰۵ دقیقه دویدن یکنواخت و پیوسته نشان داد. همچنین مزایای تمرین اینتروال وجود داشت، اما فقط در مواردی که تکرارها بیش از دقیقه طول می‌کشید و مجموع زمان تناوب هفتگی بیش از ۲۳,۲ دقیقه بود[1]. تمرینات قدرتی همچنین یک استراتژی مؤثر برای افزایش اقتصادی دویدن در دونده‌های نیمه استقامت و استقامت است[2].

آنتروپومتری (اندام‌سنجی)

در مسابقات نیمه استقامت و استقامت بزرگ‌سالان، قد و وزن شرکت‌کننده می‌تواند به ترتیب تا ۳۰ سانتی‌متر و/یا ۲۵ کیلوگرم متغیر باشد[3]. در صورت برابری همه‌چیز، مصرف اکسیژن مطلق (لیتر در دقیقه) و نمرات مصرف انرژی (کیلوژول در دقیقه) با افزایش توده بدن افزایش می‌یابد. برای امکان مقایسه بین فردی، نمرات معمولاً طبق توده بدن (در هر کیلوگرم) اصلاح می‌شود. بااین‌حال، یک رابطه خطی بین مصرف اکسیژن (یا مصرف انرژی) و توده بدن فرض می‌شود. اعتبار این فرض مدت‌هاست که با رویکردهای جایگزین مانند مقیاس بندی آلومتریک (اندازه‌گیری رشد موجودات)[4] (یعنی غیرخطی) توصیه‌شده[5] به چالش کشیده شده است[6]. در طیف وسیعی از سن، جرم و سطح فعالیت، فقدان خطی بودن بین مصرف اکسیژن و توده بدن وجود دارد[7]. بااین‌حال، در نمونه بزرگی ($N = ۷۱$ زن؛ ۱۰۱ مرد) از دونده‌های به خوبی تمرین کرده، تصحیح نمرات طبق جرم مطلق (کیلوگرم) در حذف تأثیر جرم بر اقتصادی دویدن بهتر از مقیاس غیرخطی بود[8].

فقط جرم دونده نیست که می‌تواند بر اقتصادی دویدن آن‌ها تأثیر بگذارد، بلکه به طور بالقوه توزیع (به عنوان مثال قد، طول اندام، جرم‌ها و حجم و جرم‌های موضعی) و ترکیب (مانند استخوان، چربی و عضله) جرم آن‌ها هم تأثیرگذار است. اثر توزیع‌های مختلف با چسباندن وزنه‌ها به قسمت‌های مختلف بدن مطالعه شده است. بار معینی که به پا متصل می‌شود، اقتصادی دویدن را بیشتر از زمانی که به ران یا تنه اضافه شود، افزایش می‌دهد[9]. این امر به عمومیت این ایده انجامیده است که جرم بیشتر میان پا به دلیل انرژی اضافی لازم برای چرخاندن پا، اقتصاد را مختل می‌کند[10]. دونده‌های نخبه آفریقای شرقی اقتصادی دویدن بهتری دارند[11] در مقایسه با سایر دونده‌های نخبه، که به دلیل تسلط آن‌ها در دوِ مسافت توصیه‌شده است[12]. شکل بدن باریک‌تر و محیط ساق پای آن‌ها در مقایسه با افراد سفید پوست مشابه[13]، اصولاً، انرژی لازم برای چرخاندن پا را کاهش می‌دهد و نشان‌دهنده اقتصادی دویدن بهتر آن‌ها است. شواهد متناقضی در تأیید این موضوع وجود دارد. لوسیا و همکاران (۲۰۰۶)[14] دونده‌های نخبه (کمتر از ۱۳ دقیقه ۵۰ ثانیه برای ۵ کیلومتر) اریتره‌ای و اسپانیایی را مقایسه کردند و دریافتند که اقتصادی دویدن در ۲۱ کیلومتر در ساعت به دور ساق مربوط می‌شود، نه توده بدن یا شاخص توده بدن. در مقابل، مقایسه دونده‌های ۱۰ کیلومتر نخبه اریتره‌ای و اروپایی (تقریباً ۲۸ دقیقه) نشان‌دهنده اقتصادی دویدن بهتر در ورزشکاران اریتره‌ای بود، اما هیچ

---

[1] Gonzalez-Mohino et al., 2020

[2] Blagrove et al., 2018a

[3] Barnes and Kilding, 2015b

[4] Allometric

[5] Lolli et al., 2017

[6] Tanner, 1949

[7] Lolli et al., 2017

[8] Shaw et al., 2014

[9] Frederick, 1984; Martin, 1985; Myers and Steudel, 1985

[10] Barnes and Kilding, 2015b

[11] Saltin et al., 1995; Lucia et al., 2006; Santos-Concejero et al., 2015

[12] Larsen, 2003; Lucia et al., 2006

[13] Saltin et al., 1995; Larsen et al., 2004

[14] Lucia et al. (2006)

رابطه‌ای با طول یا دور اندام‌ها نداشت[1]. در یک گروه همگن از دونده‌های کنیایی دارای توانایی بالا (۹۹۳ امتیاز از فدراسیون جهانی دوومیدانی)، طول یا دور اندام برای توجیه اقتصادی دویدن کافی نبود؛ بلکه تعامل پیچیدهٔ عوامل آنتروپومتریک (اندام‌سنجی)[2] دلیل آن بود[3]. در این مطالعات عموماً از حجم نمونه کوچک استفاده‌شده است، اگرچه بلک و همکاران (۲۰۲۰)[4] یافته‌های مشابهی را در یک نمونه ناهمگن بزرگ از دونده‌ها (N =۷۱ زن؛ ۱۰۱ مرد) داشت و نتیجه گرفت که اقتصادی دویدن برتر با اندام‌های باریک‌تر و هیکل باریک مرتبط است.

یکی از عوامل آنتروپومتریک که به طور مداوم پیوندی با اقتصادی دویدن نشان داده است، طول بازوی لحظه‌ای تاندون آشیل[5] است، که فاصله افقی از مرکز استخوان پاشنه تا تاندون آشیل است، زمانی که فرد با زانو و مچ پا در حالت ۹۰ درجه نشسته است. بازوهای گشتاور تاندون آشیل کوتاه‌تر موجب اقتصادی دویدن برتر از طریق ذخیره و آزادسازی بیشتر انرژی ارتجاعی می‌شوند[6].

متغیرهای قلبی تنفسی

اثر متغیرهای قلبی تنفسی بر اقتصادی دویدن با استفاده از مقایسه بین افراد و درون فردی بررسی‌شده است. در نمونه بزرگی از دونده‌های معمولی (N =۶۹ زن؛ ۱۱۹ مرد)، طبقه‌بندی‌شده بر اساس سن (۲۰–۶۰ سال) و حجم تمرین (۱۰–۵۰ مایل در یک هفته برای زنان؛ ۱۰–۷۰ مایل در یک هفته برای مردان)، هنگام دویدن با سرعت ۹٫۶ کیلومتر در ساعت، فقط $\dot{V}E$ و HR به طور قابل‌توجهی با اقتصادی دویدن همبستگی داشتند[7]. پات و همکاران (۱۹۹۲)[8] تخمین زدند که ۱–۲٪ از اقتصادی دویدن به دلیل تفاوت در کار عضله قلبی[9] است، درحالی‌که تقریباً ۷–۸٪ به دلیل تهویه ریوی است. با توجه به طیف شرکت‌کنندگان در این مطالعه[10]، استفاده از شدت مطلق، تفاوت در شدت نسبی را نادیده می‌گیرد و مقایسه بین فردی را مشکل‌ساز می‌کند[11]. افزایش $\dot{V}E$ از ابتدا تا انتهای دویدن ۵ کیلومتری روی تردمیل تنها متغیر فیزیولوژیکی بود که با اقتصادی دویدن مختل شده در ارتباط بود[12]. در مجموع، این داده‌ها نشان می‌دهند که متغیرهای قلبی تنفسی بخش کوچکی از انرژی مصرف‌شده در طول دویدن را تشکیل می‌دهند، اگرچه شواهد بیشتری موردنیاز است. پس از ۶ هفته افزایش شدت تمرین در دونده‌های تفریحی همیشگی، اقتصادی دویدن در آن‌هایی که تمرین اینتروال طولانی (تکرارهای۴ دقیقه‌ای؛ ۲ دقیقه استراحت) یا دویدن یکنواخت و پیوسته (۲۰ تا ۳۰ دقیقه @ تقریباً ۹۳٪ حداکثر ضربان) انجام می‌دادند، افزایش یافت، اما در آن‌هایی که از فواصل کوتاه استفاده می‌کردند (تکرارهای ۱۵ ثانیه‌ای؛ ۱۵ ثانیه استراحت) افزایش نیافت[13]. بهبود در اقتصادی دویدن به شدت (r = 0.77) با کاهش $\dot{V}E$ در طول دویدن زیر حداکثر استاندارد، همبستگی داشت.

عوامل عصبی عضلانی تعیین‌کننده اقتصادی دویدن

[1] Santos-Concejero et al., 2015

[2] Anthropometric

[3] Mooses et al., 2015

[4] Black et al. (2020)

[5] Achilles tendon moment arm

[6] Scholz et al., 2008; Barnes et al., 2014; Mooses et al., 2015

[7] Pate et al., 1992

[8] Pate et al. (1992)

[9] Myocardial

[10] Pate et al., 1992

[11] Fletcher et al., 2009

[12] Thomas et al., 1999

[13] Franch et al., 1998

دویدن به توالی مکرر انقباض‌های ارادی عضلانی نیاز دارد که انرژی آن توسط فرآیندهای متابولیک درون‌سلولی تأمین می‌شود. اقتصادی دویدن اکسیژن مصرف‌شده و دی‌اکسید کربن تولیدشده در طی بازسازی هوازی آدنوزین تری فسفات مورداستفاده را اندازه‌گیری می‌کند. تعداد پل‌های متقابل اکتین–میوزین[1] لازم برای تولید نیروی لازم برای دستیابی (و حفظ) سرعت دویدن معین، سطح فعال‌سازی عضله و تولید انرژی موردنیاز را تعیین می‌کند[2]. این امر از طریق تعامل عوامل عصبی–عضلانی مختلف، از جمله استراتژی به کار گرفتن تار عضلانی، توانایی عضله برای تولید نیرو و واحد عضله–تاندون (ام‌تی‌یو)[3] برای ایجاد، ذخیره و استفاده از انرژی کشسانی حاصل می‌شود. در ادامه به‌اختصار به این موارد اشاره می‌شود. برای توضیح دقیق‌تر، به بارنز و کیلدینگ (۲۰۱۵ب) و فلچر و مک اینتاش (۲۰۱۷)[4] مراجعه کنید.

به کار گرفتن تار عضلانی

استراتژی به کار گرفتن تار عضلانی، که ترکیبی از تعداد تارهای به کار گرفته‌شده و تعداد دفعات استفاده (میزان کدگذاری) است، وابسته به روابط نیرو–سرعت و طول–کشش است[5]. نه تنها با افزایش سرعت دویدن، فعال‌سازی ارادی عضله افزایش می‌یابد[6]، بلکه همچنین زمان فعال‌سازی افزایش می‌یابد. فعالیت ماهیچه‌نگاری الکتریکی (الکتریکی عضلانی)[7] عضلات کششی پا، افزایش فعال‌سازی را قبل و در طول توقف مرحله ایستادن نشان می‌دهد؛ این امر به‌ویژه در عضلات دو مفصلی (یعنی عضلات گاستروکنمیوس، همسترینگ، رکتوس فموریس)[8] قابل توجه است. هم‌زمان با افزایش استفاده از تار عضلانی، زمان انقباض کاهش می‌یابد، درنتیجه به سرعت بیشتری برای چرخش پل متقابل نیاز دارد. این عوامل در کنار هم باعث افزایش میزان مصرف انرژی خواهند شد. این نشان‌دهنده اهمیت اندازه‌گیری اقتصادی دویدن به عنوان هزینه انرژی (کیلوژول در کیلوگرم در کیلومتر) به‌جای هزینه اکسیژن (میلی‌لیتر در کیلوگرم در کیلومتر) است زیرا مصرف انرژی با افزایش سرعت کار افزایش می‌یابد، درحالی‌که هزینه اکسیژن خطی است[9]. سرعت‌های دویدن سریع‌تر، با زمان‌های انقباض کوتاه‌تر، نیازمند به کار گرفتن الیاف تند انقباض است که از نظر انرژی پرهزینه‌تر هستند و میزان مصرف انرژی را بالا می‌برند. دونده‌های خوب تمرین کرده نسبت به دونده‌های کمتر تمرین کرده، تغییر گام‌به‌گام کاهش ماهیچه‌نگاری الکتریکی را نشان می‌دهند. این تغییر کاهشی به عنوان شاخصی از حرکت ماهرانه‌تر در نظر گرفته می‌شود[10]. مشخص نیست که این ناشی از وضعیت آموزش سطح بالای آن‌ها باشد، اگرچه مطالعات یادگیری حرکتی نشان می‌دهد که با افزایش مهارت افراد، تغییرات کاهش می‌یابد[11].

تولید نیرو

افزایش قدرت، معمولاً به دلیل افزایش سطح مقطع عضله، از لحاظ نظری اجازه می‌دهد تا هر انقباض عضلانی با درصد کمتری از حداکثر قدرت رخ دهد. این امر مستلزم به‌کارگیری تارهای عضلانی کمتر برای تولید نیروی لازم در طول تماس با زمین است و در نتیجه انرژی موردنیاز را کاهش می‌دهد[12]. جامعه دوِ استقامت به دلیل باورهای دیرینه مبنی بر اینکه سازگاری حجیم‌سازی تراکم میتوکندری را کاهش

[1] Actin-myosin cross-bridges

[2] Fletcher and MacIntosh, 2017

[3] Muscle-tendon unit (MTU)

[4] Barnes and Kilding (2015b) and Fletcher and MacIntosh (2017)

[5] Fletcher and MacIntosh, 2017

[6] Kyrolainen et al., 2005

[7] EMG (muscle electrical)

[8] Gastrocnemius, hamstrings, rectus femoris

[9] Shaw et al., 2014; Blagrove et al., 2019c

[10] Osu et al., 2002; Chapman et al., 2008

[11] Osu et al., 2002

[12] Fletcher and MacIntosh, 2017

و مصرف انرژی را افزایش می‌دهد[۲]، در پذیرش تمرینات مقاومتی نسبتاً کم اشتیاق بوده است. در تضاد کامل با این باورها، یک بررسی اخیر شواهد قابل‌توجهی مبنی بر افزایش اقتصادی دویدن از طریق تمرینات مقاومتی (تقریباً ۲ تا ۸٪) ارائه داد، بدون اینکه افزایش وزن قابل‌تشخیص باشد[۳]. توانایی تولید نیرو پس از دویدن تا رسیدن به خستگی[۴] و جلسات تمرینی معمولی[۵] کاهش می‌یابد، اگرچه این موضوع به طور مستقیم به تغییرات در اقتصادی دویدن مرتبط نیست.

خاصیت کشسانی عضله–تاندون

دویدن به مجموعه‌ای از پرش‌های چرخه‌ای تکراری تشبیه شده است، که در طی آن پا مانند فنر عمل می‌کند، برخورد پا با زمین در مراحل توقف و وسط مرحله تکیه‌گاه تحت فشار قرار می‌گیرد. و سپس در حین مرحله فشار به عقب به حالت اول برمی‌گردد[۶]. در این قیاس، وقتی پا تحت فشار قرار می‌گیرد، انرژی کشسانی را در بخش کشسانی مجموعه واحدهای عضله–تاندون[۷] ذخیره می‌کند، که متعاقباً در مرحله بازگشت آزاد می‌شود. این آزاد شدن انرژی کشسانی ذخیره‌شده، مقدار نیروی موردنیاز از انقباض درون‌گرا بعدی برای به حرکت درآوردن دونده را در مقایسه با انقباض فقط درون‌گرا، کاهش می‌دهد و در نتیجه مصرف انرژی را کاهش می‌دهد[۸]. یک تاندون سازگارتر، از لحاظ نظری، قادر به ذخیره و بازگرداندن سطوح بالاتر انرژی خواهد بود؛ بااین‌حال، اقتصادی‌ترین دونده‌ها دارای تاندون‌های سفت‌تر هستند[۹]. بنابراین سفتی «فنر» یک عنصر مهم در ذخیره و بازگشت انرژی کشسانی و تعیین زمان تماس با زمین است. فنر سفت‌تر زمان تماس با زمین کوتاه‌تر و بازگشت انرژی کشسانی ذخیره‌شده بیشتر را امکان‌پذیر می‌کند[۱۰]. جای تعجب نیست که با افزایش سرعت دویدن، سفتی واحد تاندون عضله هم افزایش می‌یابد[۱۱] که زمان تماس کوتاه‌تر با زمین و سرعت بیشتر تولید نیرو را تسهیل می‌کند. افزایش سفتی به دلیل افزایش پیش–فعال‌سازی واحدهای حرکتی قبل از تماس با زمین اتفاق می‌افتد. تصور می‌شود که این امر هم به جذب نیروی برخورد قریب‌الوقوع و هم به تولید نیروی توقف کمک می‌کند[۱۲]. افزایش فعالیت عضله قبل از تماس با زمین می‌تواند باعث افزایش مصرف انرژی شود؛ بااین‌حال، برای حفظ رابطه طول–کشش و نیرو–سرعت بهینه‌تر عمل می‌کند[۱۳]. بهینه‌سازی این روابط فیبرهای عضلانی را قادر می‌سازد تا تحت شرایط (تقریباً) ایزومتریک هم طول[۱۴] نیرو تولید کنند که انرژی کارآمدتر از اقدامات درون‌گرا است[۱۵]. سفتی واحد تاندون عضله در پاسخ به انواع مختلف تمرینات مقاومتی افزایش می‌یابد[۱۶] و بنابراین می‌تواند اقتصادی دویدن را افزایش دهد.

---

[1] Chili- beck et al., 1999

[2] Beattie et al., 2017

[3] Blagrove et al., 2018a

[4] Nicol et al., 1991b; Dierks et al., 2008; Bazett-Jones et al., 2013

[5] Riazati et al., 2020

[6] Farley et al., 1993

[7] Muscle-tendon

[8] Ito et al., 1983

[9] Dalleau et al., 1998; Arampatzis et al., 2006; Dumke et al., 2010; Rogers et al., 2017

[10] McMahon and Cheng, 1990

[11] Kyrolainen et al., 2005

[12] Kyrolainen et al., 2005

[13] Lutz and Rome, 1994

[14] Isometric

[15] Lutz and Rome, 1994; Fletcher et al., 2013

[16] Kubo et al., 2001a, 2001b, 2002; Fletcher et al., 2010

مکانیک دویدن

هنگام تماشای هر مسابقه‌ای در نیمه استقامت یا استقامت، طیف وسیعی از سبک‌های دویدن را می‌توان مشاهده کرد. علیرغم وجود پیوند ذاتی آشکار بین اقتصادی دویدن و مکانیک دویدن[۱] و تحقیقات گسترده در مورد این موضوع، شواهد روشن بسیار کمی در تأیید از آن وجود دارد. بررسی عوامل بیومکانیکی مؤثر در اقتصادی دویدن به این نتیجه رسید که شناسایی قطعی هیچ متغیری ممکن نیست[۲]. اکثر تحقیقات در مورد این موضوع بر روی نمونه‌های کوچک ($N < ۲۵$) و اغلب همگن انجام‌شده است که طیف محدودی از متغیرها را ثبت می‌کنند. نکته استثنا در این مورد، مطالعه اخیری است که فولاند و همکاران (۲۰۱۷)[۳] انجام داده‌اند، و ۲۴ متغیر مختلف را در نمونه ناهمگنی از ۹۷ دونده (۴۷ زن، ۵۰ مرد) بررسی کردند. آن‌ها دریافتند که نوسان عمودی لگن در طول تماس با زمین نسبت به ارتفاع معمول شده است، حداقل زاویه مفصل زانو در مرحله تکیه‌گاه و حداقل سرعت افقی لگن ۳۹ درصد از تغییرات اقتصادی دویدن را به خود اختصاص می‌دهد. فصل ۱۳ در مورد بازآموزی راه رفتن به تأثیر تمرین بر مکانیک دویدن می‌پردازد.

توانایی حفظ اقتصادی دویدن

اگرچه به صراحت بیان‌نشده است، اما فرض می‌شود که سه عوامل مدل کلاسیک دوِ استقامت (حداکثر اکسیژن مصرفی، استفاده کسری از حداکثر اکسیژن مصرفی و اقتصادی دویدن) باوجود قابلیت تمرین، در روز به روز نسبتاً پایدار هستند. بااین‌حال، این فرض برای اقتصادی دویدن صدق نمی‌کند که می‌تواند با خستگی بدتر شود. افزایش اقتصادی دویدن در پایان دوهای استقامت و یکنواخت و پیوسته، از ۶۰ دقیقه تا ماراتن[۴] در طول یک دوره دو ۵ کیلومتری[۵]، پس از یک تلاش ۴ دقیقه‌ای با سرعت مرتبط با حداکثر اکسیژن مصرفی [۶] و پس از تمرینات اینتروال[۷] رخ می‌دهد.

ماهیت چندعاملی اقتصادی دویدن برای تعیین مکانیسم (های) اصلی افزایش اقتصادی دویدن را دشوار می‌کند. از نظر یک فرد معمولی که مسابقات نیمه استقامت یا استقامت را تماشا می‌کند، خستگی ظاهری ناشی از تغییرات در گام برداشتن برخی از دونده‌ها آشکارا دلیل آن است. تغییرات جنبشی در گام برداشتن در پایان دوِ نیمه استقامت و استقامت[۸] و همچنین تمرینات اینتروال[۹] رخ می‌دهد. بااین‌حال، به نظر نمی‌رسد که آن‌ها به تغییرات در اقتصادی دویدن مرتبط باشند[۱۰]. این احتمالاً به دلیل تفاوت فردی در تغییرات جنبشی است که از تغییرات بزرگ تا عدم‌تغییر متغیر است[۱۱]. وزن شواهد به عوامل عصبی عضلانی اشاره دارد که باعث ایجاد اختلال در اقتصادی دویدن با افزایش استفاده از فیبر عضلانی در طول مراحل توقف و فشار[۱۲]، کاهش نسبت ماهیچه‌نگاری الکتریکی برون‌گرا: درون‌گرا – نشان‌دهنده کاهش در انرژی کشسانی ذخیره‌شده[۱۳]، کاهش سفتی واحد تاندون و عضله[۱]، و کاهش در تولید نیروی عضلانی[۲] می‌شود. علاوه بر این، یک رابطه

---

[1] Anderson, 1996

[2] Moore, 2016

[3] Folland et al. (2017)

[4] e.g. Brueckner et al., 1991; Hunter and Smith, 2007; Garcia- Pinillos et al., 2020

[5] Thomas et al., 1999

[6] Hayes et al., 2011

[7] James and Doust, 1998

[8] e.g. Nicol et al., 1991a

[9] e.g. Riazati et al., 2020

[10] e.g. Nicol et al., 1991a

[11] Nicol et al., 1991a; Hunter and Smith, 2007

[12] Nicol et al., 1991a

[13] Abe et al., 2007

منفی بین افزایش اقتصادی دویدن پس از دویدن ۴ دقیقه‌ای با سرعت حداکثر اکسیژن مصرفی و استقامت عضلانی برون‌گرا خم کننده‌های زانو (کی‌اف)[3] وجود دارد، یعنی استقامت خم کننده‌های زانو درون‌گرا بهتر منجر به افزایش کمتر در اقتصادی دویدن می‌شود[4]. در مجموع، این تغییرات نشان‌دهنده کاهش توانایی برای تحمل نیروهای ضربه‌ای مکرر است و از دست دادن عملکرد چرخه کوتاه کننده کشش به‌احتمال‌زیاد افزایش اقتصادی دویدن در نتیجه خستگی را توضیح می‌دهد[5]. ارتباط بین توانایی حفظ اقتصادی دویدن و عملکرد مسابقه بررسی نشده است، اما می‌تواند یک عامل تعیین‌کننده مهم برای عملکرد در نیمه استقامت و استقامت باشد.

خلاصه

دویدن، بااینکه یک فعالیت به‌ظاهر ساده است، اما تعامل پیچیدهٔ سیستم‌های فیزیولوژیکی مختلف است. عملکرد در مسابقات نیمه استقامت و استقامت طبق بالاترین سرعت بازسازی آدنوزین تری فسفات در طول مسابقه و توانایی تبدیل این انرژی به حرکت تعیین می‌شود. همه مسابقات دوِ نیمه استقامت و استقامت عمدتاً به سیستم هوازی برای بازسازی آدنوزین تری فسفات بستگی دارد و این وابستگی با افزایش مسافت افزایش می‌یابد. باوجوداین، سیستم بی‌هوازی نقش مهمی در موقعیت‌های مسابقه ایفا می‌کند و به ورزشکار اجازه می‌دهد تا با تغییرات سرعت، به‌ویژه در مسابقات نیمه استقامت سازگار شود. اقتصاد دویدن، یا توانایی تبدیل این انرژی به حرکت، یک عامل کلیدی است که دونده‌ها را متمایز می‌کند و حاصل تعامل پیچیدهٔ عوامل عصبی عضلانی است. همه عوامل تعیین‌کنندهٔ عملکرد در نیمه استقامت و استقامت، کم‌وبیش قابل‌تمرین هستند و موجب پیشرفت ورزشکاران در همه سطوح می‌شوند.

---

[1] Girard et al., 2013; Garcia-Pinillos et al., 2020

[2] Riazati et al., 2020

[3] knee flexors (KF)

[4] Hayes et al., 2011

[5] Nicol et al., 1991a