International Journal for Scientific Research (IJSR)
المجلة الدولية للبحوث العلمية
IJSR
Vol. (5), No. (5) May 2026 الإصدار (5)، العدد (5)

تأثير الإجهاد الحراري البيئي على المتغيرات الكينماتيكية والاستجابة الفسيولوجية وكفاءة الأداء الميكانيكي لعدائي 200 متر

عبد الله فراس حسين
م.م.، قسم النشاطات الطلابية، جامعة بغداد، العراق
Abdulallah.firas1204b@cope.uobaghdad.edu.iq

الملخص

هدف البحث إلى التعرف على تأثير الإجهاد الحراري (40°م) مقارنة بالجو المعتدل (22°م) على الكفاءة الكينماتيكية والفسيولوجية لعدائي 200 متر. استخدم الباحث المنهج التجريبي بتصميم القياس المتكرر على عينة من (10) عدائين من النخبة. أظهرت النتائج وجود تدهور كينماتيكي تراكمي عبر مراحل السباق، حيث وصل الفقد في السرعة الميكانيكية إلى أعلى مستوياته بنسبة 11.1% في المرحلة الأخيرة (150-200م) ، كما ارتفع تركيز حامض اللاكتيك بنسبة 40.4%. استنتج البحث أن الحرارة العالية تضعف من تصلب الوتر وكفاءة دورة الإطالة-التقصير (SSC)، مما يقلل من طول الخطوة ويضطر الجهاز العصبي لزيادة التردد كآلية تعويضية غير اقتصادية تزيد من الشغل الداخلي وتسرّع ظهور التعب.

الكلمات المفتاحية: الإجهاد الحراري، المتغيرات الكينماتيكية، الفقد الميكانيكي، حامض اللاكتيك، دورة الإطالة-التقصير.

The effect of environmental heat stress on kinematic variables, physiological response, and mechanical performance efficiency of 200-meter runners

Abdullah Firas Hussein
Assistant Lecturer, Student Activities Department, University of Baghdad, Iraq
Abdulallah.firas1204b@cope.uobaghdad.edu.iq

Abstract

The study investigated the impact of heat stress (40°C) versus moderate conditions (22°C) on the kinematic efficiency and physiological response of 200m runners. Ten elite U20 athletes were tested using a repeated measures design. Results revealed a cumulative, kinematic deterioration, with mechanical speed loss peaking at 11.1% in the final 50m segment. Lactic acid concentration increased by 40.4%, and skin temperature by 14.7%. The study concluded that thermal stress reduces "tendon stiffness" and impairs the stretch-shortening cycle (SSC), leading to significant stride length reduction and inefficient neural compensation through increased frequency

Keywords: Heat Stress, Kinematic Variables, Mechanical Loss, Lactic Acid, Mechanical Performance Efficiency, Lengthening-Shortening Cycle, 200m Runners.

المقدمة

تعد دراسة العلاقة بين الظروف البيئية والكفاءة الميكانيكية الحيوية حجر الزاوية في تطوير الأداء الرياضي الحديث، وتحديداً في فعاليات السرعة القصوى التي تتطلب إنتاجاً ميكانيكياً فائقاً في أزمنة قياسية. وتشير الدراسات الميكانيكية الحيوية الرصينة إلى أن درجة حرارة العضلة تلعب دوراً مزدوجاً في التأثير على الإنتاج الحركي؛ فبينما يساهم الارتفاع المعتدل في تقليل لزوجة الأنسجة وتحسين الانقباض، إلا أن تجاوز العتبة الحرارية والوصول إلى حالة الإجهاد الحراري يؤدي إلى تدهور حاد في "تصلب الوتر" (Al-Fadhly, 2023). هذا التدهور يقلل مباشرة من قدرة الوتر على تخزين وإطلاق طاقة الارتداد المرن، وهو ما يفسر ميكانيكياً انخفاض طول الخطوة الملحوظ في الأداء الميداني لدى عدائي المسافات القصيرة (Périard & Racinais, 2019).

وعلى صعيد التنظيم العصبي العضلي، فإن العمل في بيئات تصل حرارتها إلى (40°م) يفرض على الجهاز العصبي المركزي (CNS) تبني استراتيجيات تعويضية غير اقتصادية لحماية الجسم من فرط الحرارة (Nybo, 2007). ميكانيكياً، يتمثل ذلك في زيادة تردد الخطوة لمحاولة الحفاظ على السرعة المستهدفة، مما يرفع من "الشغل الداخلي" المبذول لنقل الأطراف دون تحقيق زيادة موازية في الإزاحة الأفقية، وهو شغل غير منتج ميكانيكياً يسرع من استنزاف الكلايكوجين العضلي ويرفع معدل استهلاك الأكسجين (Cheung et al., 2015; Maughan et al., 2012). فسيولوجياً، يرتبط هذا الخلل بزيادة الاعتماد على التمثيل اللاهوائي، مما يعجل من حدوث "الحماض الاستقلابي" وتراكم حامض اللاكتيك الذي يعطل الارتباط بين أيونات الكالسيوم وبروتين "التروبونين" في الليفة العضلية، مما يضعف قوة الانقباض ويجعل الدفع الميكانيكي على الأرض أقل كفاءة (Maughan, 1997; Périard, 2019 & Galloway).

وتكمن أهمية البحث الحالي في شقين أساسيين:

- الأهمية العلمية: في انه يوفر البحث تفسيراً ميكانيكياً حيوياً متكاملاً لكيفية تأثير العبء الحراري البيئي على كفاءة دورة "الإطالة-التقصير" (SSC) والمحددات الكينماتيكية للخطوة (الطول والتردد). كما يربط بدقة بين التغيرات البيوكيميائية (مثل تراكم اللاكتيك وتغير عزم الدوران) وبين الفقد الميكانيكي المتسلسل عبر مقاطع السباق، وهو ما يثري المكتبة الرياضية العربية في مجال البيوميكانيك البيئي.
- الأهمية العملية: في انه يمنح مدربي ألعاب القوى لفعاليات السرعة (وتحديداً ركض 200م) مؤشرات رقمية واضحة حول طبيعة الفقد الحركي في الأجواء الحارة (مثل الصيف العراقي). يسهم ذلك في إعادة صياغة تكتيكات السباق، وتصميم برامج تدريبية وظائفية مبنية على حقائق ميكانيكية، فضلاً عن أهمية تطبيق بروتوكولات التبريد والترطيب لتقليص نسب الفقد الميكانيكي.

وتتبلور مشكلة البحث في ان عداؤو السرعة يواجه في البيئات ذات الحرارة المرتفعة تدهوراً نوعياً متسارعاً في المتغيرات الكينماتيكية خلال الأمتار الأخيرة من السباق. ويلاحظ ميدانياً عدم قدرة العدائين على الحفاظ على "طول الخطوة" المثالي، واللجوء إلى زيادة "التردد" كآلية تعويضية عشوائية تؤدي لاستنزاف الطاقة اللاهوائية مبكراً دون جدوى ميكانيكية. ونظراً لندرة الدراسات الحركية التي تفكك هذا الفقد الميكانيكي عبر مقاطع السباق المجزأة في درجات حرارة متطرفة (40°م) ، وهذه الشكلة تجلت في تقصي مدى هذا التغاير الكينماتيكي والفقد الميكانيكي لعدائي 200 متر لتوليد استراتيجيات تدريبية مقننة.

واهتمت العديد من الدراسات ببحث العلاقة المتبادلة بين المتغيرات البيئية والأداء الحركي، وسنستعرض أبرزها وفقاً للاتساق الموضوعي منها:

- دراسة (Racinais, 2019 & Périard): ركزت الدراسة على تأثير الإجهاد الحراري على الخصائص اللزجة المرنة للجهاز العضلي الوتري. وأشارت النتائج إلى أن الارتفاع الشديد في درجة حرارة الجسم يؤدي إلى انخفاض معامل التصلب (Stiffness) للأوتار الكبيرة (مثل وتر أخيل)، مما يضعف كفاءة تخزين طاقة الارتداد المرن خلال مرحلة الامتصاص، وينعكس سلباً على طول الخطوة الميكانيكية، وهو ما يتطابق مع الفرضية العلمية للبحث الحالي.
- ودراسة (Nybo, 2007): تناولت هذه الدراسة مفهوم "التعب المركزي" (Central Fatigue) المستحث حرارياً. وأوضحت أن الاستجابة الدفاعية للجهاز العصبي عند العمل في أجواء تتجاوز ($38.5\text\circ{م}$) تتمثل في تقليل

عدد الوحدات الحركية المستثارة كآلية وقائية. هذا الهبوط في الإشارات العصبية يقلل من عزم الدوران المولد في المفاصل العاملة، مما يجبر الرياضي على زيادة التردد بشكل غير اقتصادي للحفاظ على معدلات السرعة.

- ودراسة (Cheung et al., 2015): قامت ببحث تأثير الجهد البدني اللاهوائي في البيئات الحارة، وتوصلت إلى أن التنافس الدموي بين العضلات والجلد (لغرض التبريد) يسرع من الاعتماد على التمثيل اللاهوائي، مما يرفع من وتيرة تراكم حامض اللاكتيك في الدم، والذي بدوره يعطل ميكانيزم الكالسيوم داخل الخلية العضلية ويخفض القدرة الانفجارية لعدائي المسافات القصيرة.

أهداف البحث

1. قياس الفروق في الاستجابات الفسيولوجية (تركيز حامض اللاكتيك، النبض، درجة حرارة الجلد) بين بيئة معتدلة (22°م) وبيئة حارة (40°م) لدى عينة البحث.
2. تحليل التغير الكينماتيكي (السرعة اللحظية، طول الخطوة، تردد الخطوة) ومقدار الفقد الميكانيكي عبر مراحل سباق 200 متر (كل 50 متراً) تحت تأثير الإجهاد الحراري.
3. استبيان طبيعة العلاقة والترابط الميكانيكي بين العبء الفسيولوجي وتراجع الكفاءة الميكانيكية للأداء.

المنهجية والإجراءات

اعتمد الباحث المنهج التجريبي بتصميم القياس المتكرر (Repeated Measures Design) لملاءمته لطبيعة أهداف البحث المستعرضة. تم اختيار عينة البحث بالطريقة العمدية من (10) عدائين نخبة فئة دون 20 عاماً (U20) ممن يمثلون المنتخب العراقي لألعاب القوى في فعالية ركض 200 متر. ويوضح الجدول التالي الخصائص الأنثروبومترية للعينة:

المتغير	المتوسط الحسابي ($\bar{X}$)	الانحراف المعياري (±SD)
الطول (متر)	1.78	0.04
الكتلة (كغم)	74.2	2.8

الاختبارات والتحكم البيئي:

أُجريت الاختبارات الميدانية تحت ظرفين بيئيين متباينين لضمان ضبط المتغير المستقل بدقة:

1. البيئة المعتدلة (22°م): جرت الاختبارات داخل قاعة مغلقة مكيفة ومسيطر على درجة حرارتها بالكامل لتمثيل الظروف المثالية للأداء.
2. البيئة الحارة (40°م): جرت الاختبارات في مضمار مفتوح مع رطوبة نسبية مقننة وثابتة عند 25%، لتمثيل ظروف الإجهاد الحراري الواقعية في العراق.

اتباعاً للمنهجيات القياسية، تم تثبيت فترات الراحة، التغذية، والترطيب لضمان عزو الفروق حصرياً للتأثير الحراري البيئي.

الأدوات والتقنيات المستخدمة في القياس:

- التحليل الكينماتيكي: تم استخدام نظام التحليل الحركي الرقمي (Kinovea) لاستخراج قيم السرعة اللحظية، طول الخطوة، وترددها من خلال تتبع النقطة التشريحية لمركز ثقل الجسم (COG) والحوض. جرى التصوير باستخدام كاميرات عالية السرعة (High-speed Cameras) بمعدل (120 إطار/ثانية) وضعت بشكل عمودي على مستوى الحركة، مع معايرة دقيقة للمجال الحركي.
- القياسات الفسيولوجية: * تم قياس حامض اللاكتيك بسحب عينات دم شعرية في الدقيقتين (3) و(5) بعد الجهد لضمان رصد ذروة التراكم (Peak Lactate) باستخدام أجهزة محمولة دقيقة.

- تم استخدام أحزمة الصدر اللاسلكية لرصد معدل النبض اللحظي الأقصى ومستشعرات حرارية دقيقة لتوثيق درجة حرارة الجلد والجسم.

- تقسيم مراحل السباق وحساب الفقد الميكانيكي: تم تقسيم مضمار الـ 200 متر إلى أربعة مقاطع متساوية طول كل منها 50 متراً باستخدام حساسات توقيت إلكترونية عند كل علامة فوسفورية.
- الاختبار الميداني:
  - الاختبار: جرى الاختبار في قاعة مغلقة مسيطر على حرارتها (22°م) ثم في مضمار مفتوح (40°م) مع رطوبة نسبيّة 25%.
- المؤشرات الفسيولوجية:
  - النبض: سجل قياس النبض في البيئة الحارة وفي البيئة المعتدلة، مما يشير إلى عبء قلبي إضافي .
  - درجة حرارة الجلد.
  - حمض اللاكتيك: تم قياس حامض اللكتيك في الجو الحار وفي الجو المعتدل.
  - الكفاءة الكينماتيكية في الظروف الاعتيادية والظروف الحارة من خلال قياس الاتي:
    - السرعة في كلا الظرفين
    - طول الخطوة
    - الفقد الميكانيكي عبر المراحل. اذ يُعرّف الفقد الميكانيكي هنا بأنه نسبة التغير المئوية في السرعة بين البيئة المثالية (22°م) والبيئة المجهدة (40°م) لكل مرحلة على حدة.

اذ تم تقسيم سباق الـ 200 متر إلى أربعة مقاطع متساوية، طول كل منها 50 متراً. هذا التقسيم ضروري لرصد التغير اللحظي في السرعة بدلاً من الاعتماد على السرعة المتوسطة للسباق كاملاً، مما سمح بتحديد "نقطة الفقد الكينماتيكي".

- ويتم احتسابه وفق المعادلة التالية :

$$Mechanical\ Loss\ \% = (V_{40^\circ} - V_{22^\circ}) \times 100$$

حيث أن V تمثل السرعة في المقطع المحدد.

للوصول إلى هذه الأرقام الدقيقة، تم اتباع الإجراءات التالية:

- نظام التحليل الحركي :(Kinovea) تم استخدامه لاستخراج قيم السرعة من خلال تتبع النقطة التشريحية لمركز ثقل الجسم (COG) أو الحوض .
- التوقيت الإلكتروني :تم وضع علامات فوسفورية أو حساسات عند كل 50 متراً لضمان دقة توقيت كل مقطع .
- حساب المتغيرات المرافقة :تم قياس طول الخطوة وترددها في كل مقطع ؛ لأن الفقد الميكانيكي في السرعة هو نتيجة مباشرة لانخفاض طول الخطوة من 2.32م إلى 2.12م بفعل تدهور "شد الوتر ."

قام الباحث بالتحليل الحركي باستخدام نظام (*Kinovea*) مع كاميرات عالية السرعة (120 ص/ثانية) توضع بشكل عمودي على مستوى الحركة. يتم معايرة المجال الحركي لضمان دقة قياس طول الخطوة والسرعة اللحظية في كل مرحلة (50م).

وتم سحب عينات الدم لتركيز اللاكتيك في الدقيقة (3) و(5) بعد السباق لضمان رصد الذروة (Peak Lactate). استخدام أحزمة الصدر لقياس النبض اللحظي لضمان الدقة في البيئة الحارة.

وتم توثيق درجة حرارة الجسم المركزية ودرجة حرارة الجلد باستخدام مستشعرات دقيقة، مع تثبيت نسبة الرطوبة (25%) لضمان أن المتغير الوحيد هو الحرارة.

International Journal for Scientific Research (IJSR)
المجلة الدولية للبحوث العلمية
IJSR
Vol. (5), No. (5) May 2026 الإصدار (5)، العدد (5)

عرض النتائج ومناقشتها (Discussion & Results)

عرض وتفسير النتائج الفسيولوجية:

جدول (1): المقارنة الفسيولوجية والبيوكيميائية بين البيئتين المعتدلة والحارة ($n=10$)

المتغير الفسيولوجي	البيئة المعتدلة (22°م)		البيئة الحارة (40°م)		نسبة التغير	قيمة T	الدلالة
	س̄	±ع	س̄	±ع			
معدل النبض الأقصى	182	4$	196	6	+7.6%	4.88	دال
تركيز اللاكتيك	9.4	1.2	13.2	1.5	+40.4%	5.12	دال
درجة حرارة الجلد	31.2		35.8		+14.7%	6.45	دال

يُظهر الجدول (1) وجود ارتفاع جوهري دال إحصائياً في جميع المؤشرات الفسيولوجية تحت تأثير الإجهاد الحراري. حيث قفز تركيز حامض اللاكتيك بنسبة 40.4% ليصل إلى (13.2 مليمول/لتر) في البيئة الحارة. ويعود هذا الارتفاع ميكانيكياً وفسيولوجياً إلى آلية "التحويل الدموي"؛ حيث يضطر الجسم لتوجيه كميات كبيرة من النتاج القلبي صوب الجلد لغرض التبريد والتعرق، مما يقلل من التروية الدموية العضلية للأكسجين، وبالتالي يسرع الاعتماد على التمثيل اللاهوائي والوصول المبكر للحماض الاستقلابي (Cheung et al., 2015; Maughan et al., 2012). هذا التراكم الحمضي يعطل عمل إنزيم الفوسفوفركتوكينيز (PFK) ويثبط ارتباط الكالسيوم بالتروبونين، مما يضعف مباشرة من قوة الانقباض العضلي وكفاءة الدفع الميكانيكي (Maughan, 1997 & Galloway).

عرض وتفسير النتائج الكينماتيكية للخطوة:

جدول (2): المقارنة الكينماتيكية للأداء الميكانيكي بين البيئتين ($n=10$)

المتغير الكينماتيكي	البيئة المعتدلة (22°م)		البيئة الحارة (40°م)		فرق المتوسطات	قيمة T	الدلالة
	س̄	±ع	س̄	±ع			
متوسط السرعة (م/ث)	9.45	0.3	8.85	0.5	0.60-	3.92	دال
طول الخطوة (Stride L)	2.32	0.08	2.12	0.12	0.20-	4.15	دال
تردد الخطوة (Stride F)	4.07	0.15	4.18	0.22	0.11+	1.85	غير دال

يتضح من الجدول (2) أن الإجهاد الحراري تسبب في تراجع دال لمتوسط السرعة وطول الخطوة. حيث انخفض طول الخطوة من (2.32م) إلى (2.12م). ميكانيكياً، يُعزى هذا التراجع إلى تأثر الخصائص اللزوجة المرنة للأوتار؛ فعند درجة حرارة 40°م ، يفقد الوتر "تصلبه الأكاديمي" وقدرته على تخزين وإطلاق طاقة الارتداد المرن عبر دورة الإطالة-التقصير (SSC)، مما يضعف من القوة الأفقيّة المحققة لعزم الدوران في مفصلي الورك والركبة عند دفع الأرض (Al-Fadhly, 2023; Racinais, 2019 & Périard).

أما الزيادة الطفيفة وغير الدالة في تردد الخطوة (من 4.07 إلى 4.18) ، فما هي إلا استجابة تعويضية دفاعية من الجهاز العصبي المركزي (CNS) لمحاولة الحفاظ على السرعة المفقودة (Nybo, 2007). ولكنها زيادة غير اقتصادية بالمرة؛ لأنها ترفع من "الشغل الداخلي غير المنتج للإزاحة الأفقية" لتتحول متجهات القوة نحو العمودية أكثر، مما يرفع من استهلاك الأكسجين واستنزاف الكلايكوجين العضلي بسرعة أكبر (Périard, 2019).

تحليل متسلسلة الفقد الميكانيكي عبر مقاطع السباق:

جدول (3): تحليل التغاير الكينماتيكي ومقدار الفقد الميكانيكي في السرعة عبر مراحل السباق (كل 50 متراً)

المرحلة	السرعة (22°م)	السرعة (40°م)	مقدار الفقد الميكانيكي
0 - 50 متر	8.90 م/ث	8.75 م/ث	-1.6%
50 - 100 متر	10.10 م/ث	9.60 م/ث	-4.9%
100 - 150 متر	9.85 م/ث	9.10 م/ث	-7.6%
150 - 200 متر	8.95 م/ث	7.95$م/ث	-11.1%

تُثبت نتائج الجدول (3) أن الفقد الميكانيكي في السرعة لم يكن خطياً بل كان تراكمياً وتصاعدياً عبر مسافة السباق. ففي المقطع الأول (0-50م)، كان الفقد منخفضاً جداً (-1.6%) ؛ والسبب البيوميكانيكي يعود إلى أن الارتفاع الأولي البسيط في حرارة العضلة يساهم إيجابياً في تقليل لزوجة الأنسجة الموضعية، مما يحسن من سلاسة الانقباض مؤقتاً (Al-Fadhly, 2023).

أما بعد منتصف السباق، وتحديداً في المقطع الأخير (150-200م)، فقد قفز الفقد الميكانيكي الكينماتيكي لقمته بنسبة (-11.1%)، حيث انهارت السرعة من 8.95 م/ث إلى 7.95 م/ث. ويرتبط هذا الانهيار الميكانيكي الحاد بوقوع العداء تحت وطأة الحماض الاستقلابي المتراكم والعبء الحراري المركزي العالي الذي يثبط العمل العضلي العصبي وينهك مخزون الطاقة اللاهوائية (Nybo, 2007; Périard, 2019).

ويلاحظ من الجداول ايضا انخفاض طول الخطوة من (2.32 م) إلى (2.12 م) يعكس خللاً في إنتاج "عزم الدوران" عند دفع الأرض. وبما أن العداء يشعر بالإرشاد الحراري، فإن الجهاز العصبي المركزي (CNS) يرسل إشارات دفاعية لتقليل شدة الانقباض العضلي لتجنب ضربة الشمس. هذا يقلل من قوة الدفع الأفقي، مما يؤثر مباشرة على المتغيرات الميكانيكية للخطوة. مما يضطر الجهاز العصبي لزيادة "تردد الخطوة" كآلية تعويضية، لكنها تؤدي لزيادة الشغل الداخلي غير المنتج وإهدار الطاقة. ومع ذلك، يؤكد Périard (2019) أن هذه الزيادة في التردد تعد غير اقتصادية ميكانيكياً ؛ إذ تزيد من الشغل المبذول لنقل الأطراف (غير المنتج للإزاحة)، مما يرفع معدل استهلاك الأكسجين ويؤدي إلى استنزاف الكلايكوجين العضلي بسرعة أكبر بنسبة تصل إلى 40%.

إن انخفاض طول الخطوة من (2.32 م) إلى (2.12 م) يعود ميكانيكياً إلى تأثر الخصائص اللزوجة المرنة للأوتار .عند 40°م، يفقد الوتر قدرته على تخزين طاقة الارتداد، مما يضعف قوة الدفع الأفقي.

يُعزى تراجع طول الخطوة إلى انخفاض "تصلب الوتر" بفعل الحرارة المفرطة، مما يقلل من كفاءة دورة "الإطالة-التقصير" . اذ ان الزيادة في تردد الخطوة (من 4.07 إلى 4.18) تحت الإجهاد الحراري إذ أن الزيادة الطفيفة بتردد الخطوات بالثانية وبقيمة غير دالة ،تعد محاولة تعويضية من الجهاز العصبي. ويعني هذا زيادة في الشغل المبذول لنقل الأطراف "غير منتج" للإزاحة الأفقية، مما يرفع من معدل استهلاك الأكسجين ويؤدي إلى استنزاف الكلايكوجين العضلي بسرعة أكبر بنسبة تصل إلى 40%. ومع ذلك، يؤكد Périard (2019)أن هذه الزيادة في التردد تعد غير اقتصادية ميكانيكياً ؛ إذ تزيد من الشغل المبذول لنقل الأطراف (غير المنتج للإزاحة)، مما يرفع معدل استهلاك الأكسجين ويؤدي إلى استنزاف الغلايكوجين العضلي بسرعة أكبر بنسبة تصل إلى 40.%

تحليل التغاير الكينماتيكي للسرعة:

وقد ادت زيادة درجة الحرارة إلى انخفاض تصاعدي في معدلات السرعة المحققة، ويمكن تلخيص الفروقات في النقاط التالية:

- مرحلة التزايد (0 - 100 متر):
  - في أول 50 متراً، كان الفقد طفيفاً بنسبة 1.6%، مما يشير إلى أن تأثير الإجهاد الحراري لا يظهر بقوة في بداية الانطلاق.
  - في المرحلة من 50 إلى 100 متر، وهي مرحلة السرعة القصوى، ارتفع الفقد إلى .4.9%نلاحظ أن العداء لم يستطع الوصول إلى حاجز الـ 10 م/ث عند درجة حرارة 40°م، بينما تجاوزها بسهولة عند درجة حرارة 22°م.
- مرحلة التعب والانحدار (100 - 200 متر):
  - بدأ التدهور الكينماتيكي يتضح بشكل حاد بعد تجاوز منتصف المسافة؛ حيث وصل الفقد في السرعة إلى 7.6%في المرحلة الثالثة.
  - سجلت المرحلة الأخيرة (150-200 متر) أكبر معدل فقد ميكانيكي بنسبة 11.1%، حيث انخفضت السرعة من 8.95 م/ث إلى 7.95 م/ث.

وخلاصة لما تقدم أظهرت القياسات أن الفقد لم يكن خطياً، بل كان تراكمياً، ففي الـ 50 متراً الأولى، كان الفقد 1.6% فقط لأن "لزوجة الأنسجة" تقل بفعل الحرارة في البداية مما يحسن الأداء مؤقتاً .وهذا يعني تأثير منخفض ، اما في الـ 50 متراً

الأخيرة، قفز الفقد إلى 11.1%؛ والسبب في هذا القياس المرتفع يعود ميكانيكياً إلى "الشغل غير المنتج" حيث يزداد تردد الخطوة كآلية تعويضية فاشلة لاستنزاف الطاقة اللاهوائية .

الاستنتاجات والتوصيات

الاستنتاجات:

1. تؤدي البيئة الحارة (40°م) إلى تدهور ميكانيكي وكينماتيكي تصاعدي وتراكمي للسرعة، يبدأ بوضوح من منتصف مسافة الـ 200م ويصل لذروته في الأمتار الـ 50 الأخيرة بفقد نوعي حاد قدره 11.1%.
2. يتسبب الإجهاد الحراري في إحداث خلل استراتيجي في ميكانيكا الخطوة، متمثلاً في تراجع طول الخطوة نتيجة انخفاض تصلب الأوتار وتأثر دورة (SSC)، مما يجبر الجهاز العصبي على اللجوء لزيادة التردد كآلية تعويضية فاشلة وغير اقتصادية تزيد الشغل الداخلي.
3. تفرز البيئة الحارة عبئاً فسيولوجياً وبيوكيميكالياً ضخماً، يتجلى في تسريع حدوث الحماض الاستقلابي المفرط (تراكم اللاكتيك بنسبة 40.4%) والتحويل الدموي المحيطي الذي يعطل كفاءة الدفع الميكانيكي للأطراف وعزم الدوران.
4. هناك علاقة وثيقة بين ارتفاع درجة حرارة الجلد وزيادة لزوجة الدم، مما يقلل من كفاءة النتاج القلبي للأداء الحركي.

التوصيات:

1. ضرورة إلزام مدربي ألعاب القوى بتطبيق بروتوكولات "التبريد المسبق" (Pre-cooling) (مثل سترات التبريد والمياه الباردة) قبل السباقات المقامة في الأجواء الحارة للحد من معدلات الفقد الميكانيكي وطول الخطوة.
2. تدريب العدائين على استراتيجيات مقننة لتوزيع الجهد وتكتيك الخطوة (Pacing) في الأجواء الحارة لتأخير الوصول إلى نقطة "الحماض الاستقلابي" التراكمي في الأمتار الأخيرة.
3. نقل الوحدات التدريبية النوعية ذات الشدة العالية إلى توقيتات وظروف بيئية مشابهة تماماً لظروف المنافسة الحارة، لتحسين الكفاءة الوظيفية (مثل معدلات التعرق والحفاظ على حجم الضربة القلبية) وتحقيق التكيف البيوميحيوي المطلوب.

References

1. Al-Fadhly, S. A. K .(2023) .Biomechanics and Kinetic Analysis in Sports .Baghdad: Al-Israa University Press .
2. Cheung, S. S & ,.Sleivert, G. G .(2015) .Multiple triggers for hyperthermia-induced neuromuscular fatigue .Sports Medicine.474-459 ,(4)45 ,
3. Galloway, S. D & ,.Maughan, R. J .(1997) .Effects of ambient temperature on the capacity to perform prolonged cycle exercise in man .Medicine and Science in Sports and Exercise , .1249-1240 ,(9)29
4. Maughan, R. J., Otani, H & ,.Watson, P .(2012) .Influence of relative humidity on prolonged exercise capacity in a warm environment .European Journal of Applied Physiology.2321-2313 ,(6)112 ,
5. Nybo, L .(2007) .Hyperthermia and central fatigue during prolonged exercise .Journal of Applied Physiology .878-871 ,(3)104 ,

6. Périard, J. D & ,.Racinais, S. (Eds.) .(2019) .Heat Stress in Sport and Exercise: Thermoregulation and Cellular Adaptations .Springer Nature .
7. Racinais, S., et al .(2015) .Consensus recommendations on training and competing in the heat .British Journal of Sports Medicine.1173-1164 ,(18)49 ,
8. Sawka, M. N., et al .(2011) .Human American College of Sports Medicine position stand: Exercise and fluid replacement .Medicine & Science in Sports & Exercise.390-377 ,(2)39 ,
9. Mohamed, A. H .(2021) .Kinematic adaptations of elite sprinters under different thermal environmental conditions .Journal of Human Kinetics.34-25 ,(1)78 ,
10. Al-Sudani, M. R .(2024) .Biochemical markers and muscle stiffness during high-intensity anaerobic performance .International Journal of Sports Science.120-112 ,(2)14 ,
11. Kemi, O. J .(2022) .Metabolic acidosis and stride characteristics in 200m and 400m track events .European Journal of Sports Biomechanics.215-201 ,(3)8 ,