



Akademia Wychowania Fizycznego we Wrocławiu

Wydział Wychowania Fizycznego

Rafał Omelko

**Kinematyka i stężenie mleczanu u biegaczy na 400 m
podejmujących zróżnicowane formy wytrzymałości specjalnej**

Promotor

dr hab. Krzysztof Maćkała

Wrocław 2020

Spis treści

1.	WSTĘP	3
1.1.	Wprowadzenie	3
1.2.	Charakterystyka biegu na 400 m	4
1.2.1.	Kinematyka biegu na 400 m	5
1.3.	Fizjologiczne podstawy w treningu i biegu na 400 m	8
1.4.	Uwarunkowania wytrzymałościowe w treningu i biegu na 400 m.....	10
1.5.	Wytrzymałość specjalna jako wyznacznik skuteczności biegu na 400 m.....	12
2.	CEL PRACY i PYTANIA BADAWCZE	14
2.1.	Cel pracy.....	14
2.2.	Pytania badawcze.....	14
3.	MATERIAŁ i METODY	15
3.1.	Materiał badawczy.....	15
3.2.	Przebieg badań.....	15
3.2.1.	Pomiary budowy somatycznej	16
3.2.2.	Pomiar stężenia mleczanu w osoczu	17
3.2.3.	Pomiar parametrów kinematycznych testu-biegu na 350 m i 500 m.....	17
3.2.4.	Pomiar parametrów kinematycznych testu-biegu na 60 m	19
3.3.	Analiza statystyczna	19
4.	ANALIZA WYNIKÓW	20
5.	DYSKUSJA	35
5.1.	Współzależność parametrów kinematycznych kroku biegowego w teście- biegu na 350 m i 500 m	35
5.2.	Porównanie parametrów kinematycznych poszczególnych odcinków wewnątrz każdego z testów-biegów na 350 m i 500 m.....	37
5.3.	Porównanie kinematyki kroku biegowego na odcinku brak zmęczenia i ze zmęczeniem między testem-biegiem na 350 m i 500 m.....	38
5.4.	Stężenie mleczanów we krwi w zróżnicowanych formach wytrzymałości specjalnej	41
5.5.	Analiza kinematyki biegu jako wyznacznik intensywności wytrzymałości specjalnej w treningu biegu na 400 m	45
6.	WNIOSKI – PRAKTYCZNA APLIKACJA	48
7.	LITERATURA	52
8.	SPIS TABEL i RYCIN.....	60
9.	SUMMARY.....	62

1. WSTĘP

1.1. Wprowadzenie

Głównym zadaniem treningu sportowego w biegach krótkich, ze szczególnym uwzględnieniem biegu na 400 m, powinny być wielowymiarowe działania prowadzące do podniesienia możliwości motorycznych i technicznych sprintera w celu uzyskania maksymalnych wyników sportowych. Uwarunkowane jest to przede wszystkim wypracowaniem optymalnej dla każdego zawodnika skuteczności biegu, która polega na rozwinięciu i utrzymaniu na jak najwyższym poziomie średniej prędkości biegu podczas pokonywania całego dystansu (Gajer i wsp. 2007, Hanon i Gajer 2009, Pollitt i wsp. 2017, Grgić i wsp. 2019). Prędkość biegu osiąga tym wyższe wartości, im lepsza istnieje współzależność kinematyczna między długością a częstotliwością kroku na całym dystansie. Maćkała (2007, 2019) na podstawie swoich analiz, stwierdził, że poprawa możliwości szybkościowych w danym biegu może nastąpić poprzez poprawę wartości obu tych parametrów jednocześnie lub jednego z nich przy założeniu, że drugi parametr wykaże stałą wartość. Jest to możliwe do osiągnięcia w biegu na 100 lub 200 m (Brugeman i wsp. 1999, Gejer i wsp. 1999, Salo i wsp. 2011). Specyfika biegu na 400 m wymaga nieco innego spojrzenia na te zależności (Schiffer 2008, Bergamini 2011), które w głównej mierze uwarunkowane są postępującym zmęczeniem w czasie biegu (Hirvonen i wsp. 1992). To powoduje, że teoretycznie najbardziej pożądaną sytuacją jest uzyskanie przez czterystumetrowca optymalnej do narastającego zmęczenia częstotliwości i długości kroku biegowego, ze szczególnym uwzględnieniem ostatnich 100 m biegu (Vazel 2011).

Osiągnięcie wartościowych wyników sportowych w biegu sprinterskim na 400 m zależy od wielu czynników morfofunkcyjnych: właściwego systemu nerwowo-mięśniowego, dynamiki procesów biochemicznych zachodzących podczas biegu, potencjału motorycznego uwzględniającego poziom siły i mocy mięśni bezpośrednio zaangażowanych w bieg, a przede wszystkim – od wysokiego poziomu wytrzymałości specjalnej (Bober 1987, Vonstein 1996, Coh i wsp. 2010). Z kolei wytrzymałość specjalna uzależniona jest i powinna ściśle korelować z poziomem potencjału szybkościowego, ze szczególnym uwzględnieniem zachowania jakości parametrów określających mechanikę biegu (Saraslanidis i wsp. 2009).

Większość teoretyków i praktyków zajmujących się treningiem sportowym w lekkiej atletyce uważa, że głównym celem treningu wytrzymałości specjalnej w biegu na 400 m powinna być praca nad optymalizacją dynamiki procesów energetycznych, wraz z utrzymaniem wysokiego potencjału szybkościowego na całym dystansie (Rademaker 1982, Otte i Hunt 2000, Saraslanidis i wsp. 2009, Vazel 2011). Dlatego głównym zadaniem niniejszej pracy jest ocena kształtowania się podstawowych parametrów kinematycznych biegu na wyznaczonych odcinkach wytrzymałości specjalnej – 350 m i 500 m, które mogą decydować o skuteczności biegu na 400 m.

1.2. Charakterystyka biegu na 400 m

Bieg na 400 m to niezwykle wyczerpująca i widowiskowa konkurencja lekkoatletyczna (Schiffer 2008). Kluczem do osiągnięcia w niej mistrzostwa sportowego jest rozwinięcie do najwyższego poziomu wytrzymałości specjalnej, pozwalającej zawodnikowi na pokonanie jednego okrążenia stadionu z submaksymalną prędkością w czasie około 45 s, pomimo narastającego zmęczenia (Gajer i wsp. 2007, Hanon i Gajer 2009, Grgić i wsp. 2019). Dobry 400-metrowiec powinien być zawodnikiem dysponującym określonymi zdolnościami wytrzymałościowymi, wysokim poziomem siły mięśniowej oraz umiejętnością rozluźniania mięśni podczas biegu z submaksymalną prędkością (Iskra 2005, Hanon i Gajer 2009, Grgić i wsp. 2019). Umiejętność rozkładu sił jest wyjątkowo ważna. O wyniku w biegu na 400 m nie decyduje bowiem maksymalna prędkość biegu, lecz utrzymanie wysokiej średniej prędkości na całym dystansie. Rozkład tempa na tym dystansie uzależniony jest w dużym stopniu od predyspozycji wytrzymałościowych i szybkościowych zawodnika (Iskra 2004, Hanon i Thomas 2011, Vazel 2011). Przebieg zmian prędkości podczas biegu na 400 m wynika z faktu, że początkowa faza przyśpieszenia startowego oraz moment osiągnięcia maksymalnej prędkości (40.–80. m biegu) zabezpieczają procesy metaboliczne z reakcji fosfagenowych, opartych na beztlenowej drodze resyntezy ATP. Dalsza część biegu bazuje na glikolitycznych procesach energetycznych, opartych na resyntezie ATP z glikolizy beztlenowej (Spencer i wsp. 1996, Gupta i wsp. 1999, Maćkała 2007, Saraslanidis i wsp. 2011, Pollitt i wsp. 2018). Z powodu szybkich reakcji metabolicznych podczas biegu na 400 m równowaga kwasowo-zasadowa jest zakłócona

przez wzrost wolnych jonów wodoru (H^+), co powoduje kwasicę w organizmie i jest główną przyczyną zmęczenia podczas biegu (Hanon 2009, Vilmi 2016).

1.2.1. Kinematyka biegu na 400 m

W praktyce najkorzystniejszym rozwiązaniem na pokonanie dystansu 400 m jest przebiegnięcie pierwszej połowy swobodnie, lecz stosunkowo szybko (Schiffer, 2008). Obniżenie prędkości podczas kontynuowania biegu, będące efektem nasilającego się zmęczenia (Hirvonen i wsp. 1992), powinno następować płynnie i stopniowo aż do końca dystansu (Gajer i wsp. 2008, Maćkała 2007). Dlatego tak ważnym elementem jest odpowiednia taktyka biegu, polegająca na kontroli tempa oraz narastającego zmęczenia i racjonalne rozłożenie sił. Różnice między obiema połowami dystansu nie powinny być zbyt duże, ponieważ nadmiernie szybkie pokonanie pierwszych 200 m może spowodować brak energii na drugich 200 m (Gejer i wsp. 2007, Hanon i Gajer 2009, Graubner i Nixdorfm 2011, Grgić i wsp. 2019). Z kolei zbyt wolna pierwsza połowa może zaowocować niemożliwymi do odrobienia stratami na pozostałej części dystansu (Gabryś i wsp. 2005, Grgić i wsp. 2019). Po przeanalizowaniu rezultatów uzyskanych przez czołowych 400-metrowców świata (Maćkała 2008, Hanon i Gajer 2009, Graubner i Nixdorfm 2011) wynika, że najczęściej występuje różnica około 1–1,5 s pomiędzy czasem przebiegnięcia pierwszych 200 m w trakcie biegu na 400 m, a rekordem życiowym uzyskanym przez zawodnika na 200 m. W związku z powyższym, jednym z czynników determinujących skuteczność w biegu na 400 m jest wysoki poziom szybkości zawodnika (Coh i wsp. 1995, Bergamini 2011), która stanowi wypadkową podstawowych parametrów kinematycznych biegu, takich jak właściwy stosunek między długością a częstotliwością kroku oraz czasem kontaktu stopy z podłożem (Maćkała, Mero 2013, Maćkała i wsp. 2017, Maćkała i wsp. 2019).

W literaturze analizującej strukturę biomechaniczną biegu cykliczny ruch kroku biegowego podzielony jest na trzy fazy: podparcia, przenoszenia – kiedy stopa prowadzona jest ponad podłożem, oraz lotu – gdy obie stopy nie dotykają podłoża. Wraz ze wzrostem prędkości stosunek udziału fazy podparcia maleje od ok. 40% czasu cyklu do zaledwie 20% w przypadku sprintu o maksymalnej prędkości. Do wartości ok. 7 m/s przyrost prędkości jest wynikiem zwiększenia długości kroku, natomiast powyżej tej wartości kluczową rolę

odgrywa wzrost częstotliwości kroku, któremu natomiast towarzyszy zwiększony wydatek energetyczny (Grimshaw i wsp. 2010). O maksymalnej prędkości, definiowanej jako iloczyn długości i częstotliwości kroku, będącej wynikiem optymalnej kombinacji tych dwóch parametrów, decyduje szereg czynników morfologicznych, fizjologicznych, mechanizmy energetyczne zachodzące podczas aktywności ruchowej, wiek, zdolności motoryczne, wewnątrz- i międzymięśniowa koordynacja oraz optymalna z biomechanicznego punktu widzenia technika ruchu (Iskra i wsp. 2015, Maćkała i wsp. 2017, Maćkała i wsp. 2019). Zaobserwowano niewielką korelację między długością kroku a określoną prędkością oraz cechami antropometrycznymi badanych sportowców, natomiast silniejszy związek z poziomem siły oraz gibkości (Viru i wsp. 2001).

Analiza ruchu kończyn dolnych w trakcie biegu opiera się na badaniu zakresu ruchu wyznaczonego przez początkowe i końcowe położenie poszczególnych stawów w danej fazie biegu (Coh i wsp. 2010). Natomiast bezwzględny zakres ruchu wzrasta wraz ze wzrostem prędkości. Staw biodrowy w chwili kontaktu stopy z podłożem zgina się pod kątem ok. 45° i ta wartość jest utrzymywana w trakcie ruchu uginania kolana. Maksymalne ugięcie w biodrze podczas fazy przenoszenia osiąga wartość ok. 55° . Podczas odbicia staw biodrowy prostuje się i w chwili oderwania stopy od podłoża wartość kątowa wynosi ok. 9° (Grimshaw i wsp. 2010).

Badania przeprowadzone przez Nummela (1992) pokazują, że kobiety (53,8 s na 400 m) szczytową prędkość uzyskały z częstotliwością 3,74 Hz i długością kroku 1,98 m. Z kolei mężczyźni (52,8 s na 400 m) uzyskali częstotliwość kroku na poziomie 3,48 Hz, a długość kroku: 2,28 m. Spadek prędkości biegu (Vazel 2011) był wynikiem zarówno spadku częstotliwości, jak i długości kroku. Dodatkowo czynnikami wpływającymi na spadek skuteczności biegu są błędy w technice, szczególnie spotykane wśród początkujących biegaczy, takie jak: zła koordynacja kroków biegowych (acykliczny ruch), niepełne odbicie stopy od podłoża podczas kroku biegowego, zbyt krótki krok biegowy oraz bieg na całych stopach lub przez piętę (Gabrys i wsp. 2005, Maćkała 2007, Maćkała i wsp. 2019).

Porównanie pomiarów dokonanych na 40. i 380. m podczas biegu na 400 m (Sparque i Mann 1983) wykazały zmiany spowodowane zmęczeniem na końcowych metrach dystansu następujących parametrów kinematycznych biegu: częstotliwość kroku, czas fazy

podporowej, prędkość przemieszczania się ogólnego środka ciężkości ciała oraz pozioma prędkość środka ciężkości stopy przed jej kontaktem z podłożem.

Inne badania (Tupa i wsp. 1995, Maćkała i wsp. 2010), tym razem przeprowadzone na dystansie 200 m, wykazały różnice w częstotliwości kroków, prędkości pojedynczego kroku oraz w sile odbicia. Wraz z narastającym zmęczeniem zaobserwowano wzrost sił hamujących w nodze wykroczonej, większe pionowe amplitudy przemieszczania się ogólnego środka ciężkości oraz zwiększenie kąta w stawie kolanowym nogi wykroczonej w fazie lądowania, co wiązało się z niższym jej prowadzeniem i opóźnieniem przedniego wahnięcia podudzia. Potwierdzał to w swoich analizach Hobara i wsp. (2010). Znacznej redukcji uległo także kątowe przemieszczenie się uda z poziomu 17,3 do 6,9 rad/s. Wzrósł czas fazy oporowej z poziomu 0,040 s do 0,056 s, a całkowity czas kontaktu stopy z podłożem wydłużył się z 0,114 s do 0,135 s. Zmianom uległa także praca wewnętrzna, której negatywne działanie stało się bardziej widoczne. Przyczyną tego stanu rzeczy było wydłużenie drogi podczas lądowania stopy na podłożu.

Analizując przykład rekordzisty świata na 400 m (43,03 s) Wayda van Niekerka, który jako jedyny zawodnik pokonał trzy symboliczne bariery w biegach sprinterskich (poniżej 10 s na 100 m, poniżej 20 s na 200 m, poniżej 44 s na 400 m) widać, jak istotny jest potencjał szybkościowy w kontekście wyniku w sprincie przedłużonym. Równocześnie analiza progresji czasów na poszczególnych 100-metrowych częściach dystansu przeprowadzona rok po roku (Yamamoto 2015, 2016) wykazała, że największą poprawę zawodnik ten uzyskał w drugiej części dystansu, szczególnie pomiędzy 200 a 300 m, co prawdopodobnie wskazuje na zmianę jego treningu w kierunku wytrzymałości specjalnej. Znamienne jest, że analiza setek biegów na 400 m wykazała, iż to właśnie odcinek 200–300 m jest najbardziej skorelowany z czasem na 400 m (Wilson i wsp. 2008, Vazel 2010).

Szczegółowa analiza biomechaniczna, przeprowadzona podczas mistrzostw Świata w Londynie w 2017 r. (Pollitt 2018) daje wgląd, jak parametry kinematyczne biegu van Niekerka zmieniały się pod wpływem zmęczenia na przestrzeni całego dystansu 400 m oraz porównanie ich z jego parametrami podczas biegu na 200 m, w którym również brał udział (Yamamoto 2015, 2016). I tak, podczas finałowego biegu na 400 m, w którym uzyskał czas 43,98 s w początkowej fazie rozpędzania się (0–100 m) długość kroku wyniosła 2,31 m, aby następnie między 100–200 m osiągnąć maksymalny pułap 2,65 m. W pozostałej części

dystansu następowało sukcesywne skracanie się kroku biegowego 200–300 m – 2,48 m, 300–400 m – 2,39 m. Przebieg zmian w częstotliwości kroku kształtowała się następująco: 0–100 m – 4,05 Hz, 100–200 m – 3,80 Hz, 200–300 m – 3,70 Hz, 300–400 m – 3,38 Hz. Porównując wartości parametrów kinematycznych badanych na 150 m podczas biegu na 200 m i 350 m podczas biegu na 400 m, wyłania się jasny obraz adaptacji van Niekerka na oznaki zmęczenia. Jego prędkość spadła z 10,40 m/s do 8,23 m/s, długość kroku zmniejszyła się z 2,60 do 2,47 m, częstotliwość kroków spadła z 4,00 do 3,33 Hz, natomiast czas kontaktu stopy z podłożem wzrósł z 0,100 do 0,127 s.

1.3. Fizjologiczne podstawy w treningu i biegu na 400 m

Dystans 400 m maksymalnie stymuluje beztlenowe i tlenowe systemy energetyczne. Pod koniec biegu zasoby fosfokreatyny mięśniowej (PCr) są prawie całkowicie wyczerpane. Stężenia mleczanu w mięśniach i krwi osiągają indywidualny maksymalny poziom do 15–25 mmol/l, a wartości poboru tlenu osiągają bardzo wysoki procent indywidualnego maksymalnego poboru tlenu (Hirvonen 1992, Spencer 2001, Gorostiaga 2010, Zouhal 2010). Jak podaje Iskra i wsp. (2015), według analizy fizjologów (Arcelli i wsp. 2008), proporcje wysiłku tlenowego i beztlenowego w biegu na 400 m zależą od poziomu sportowego biegacza oraz metody badań i wynoszą od 50–60% (Spencer i Gastin, Duffield i wsp. 2005) do 70–80% (Lacour i wp. 1990, Reis i Miguel 2007).

Cechy metabolizmu glikolitycznego jako dominującego źródła energii w krótkich maksymalnych wysiłkach (Bishop 2012) definiuje się poprzez wzrost wyjściowego stężenia mleczanu (La) i jonów wodorowych (H⁺) (Boisseauand, Delamarche 2000, Desgorces 2007). Te zmiany stężenia metabolitów glikolitycznych wywołują szereg zmian, m.in. wpływają na częstość skurczów serca (HR) (Bangsbo, Hellsten 1998). Według Brooks (2007) i Cairns (2006), ilość mleczanu wytwarzana przez glikogenolizę i glikolizę podczas wysiłku jest proporcjonalna do zmian stężenia jonów wodorowych. Jednak procesy ich usuwania są różne (Cairns 2006, McNaughton 2008). McNaughton (2008) zidentyfikował trzy podstawowe mechanizmy regulujące stężenie H⁺. Pierwszy dotyczył buforów chemicznych, drugi polegał na wentylacji płuc, a trzeci na funkcji nerek. Mleczan natomiast utleniany jest przez mitochondria (z udziałem białek MCT1 i CD147 –

dehydrogenazy mleczanowej i oksydazy cytochromowej) głównie w neuronach, kardiomiocytach, włóknach mięśni powolnych i wątrobie, a także jest przetwarzany w glikogen poprzez glukoneogenezę (Cairns 2006, Gladden 2008, Hashimoto and Brooks 2008). Badania przedstawione przez Hebisz (2016) wskazują, że procesy związane z klirensem mleczanu wymagają więcej czasu, niż procesy związane z odzyskiem H⁺, co autorzy potwierdzili różnicami w szybkości zmian tych dwóch metabolitów podczas kolejnych serii treningu interwałowego. Wskazuje to, że H⁺ jest bardziej czułą miarą oceny obciążeń związanych z treningiem interwałowym i metabolicznych kosztów ćwiczeń, niż stężenie mleczanu.

Jednak to pomiar stężenia mleczanu we krwi jest metodą powszechnie stosowaną do oceny zaangażowania glikolizy beztlenowej w dystrybucji energii do pracy mięśni, a tym samym do oceny intensywności danego wysiłku. Oznaczanie stężenia mleczanu w treningu wykorzystywane jest zarówno do oceny efektów pojedynczych wysiłków, ale też ich grup. Metoda ta stosowana jest również w czasie zawodów sportowych (Kryściak 2015).

W celu ustalenia maksymalnego pułapu produkcji energii z procesu glikolizy beztlenowej wykorzystuje się testy wysiłkowe polegające na pracy o krótkim czasie trwania przy jednoczesnym zachowaniu bardzo dużej intensywności. Efektem glikolizy jest produkcja kwasu mlekowego w mięśniach oraz jego gromadzenie się we krwi, dlatego im wyższy poziom stężenia mleczanu we krwi po wysiłku, z tym większą sprawnością i nasileniem zachodziły przemiany w procesie glikolizy. Oznaczanie powysiłkowych stężeń mleczanu we krwi pozwala na ocenę, czy zastosowane ćwiczenia oraz formy treningu faktycznie kształtują pożądane cechy motoryczne sportowca, przygotowując jego organizm do wymagań stawianych przez wysiłek startowy (Hubner-Woźniak 2000).

Rejestrowanie zmian stężenia mleczanu w warunkach przedłużonego sprintu związane jest z przeważającym udziałem przemian beztlenowych. Hollman i Liesen (1974) twierdzą, że największą zawartość mleczanu we krwi osiąga się przy maksymalnym obciążeniu biegiem w ciągu 40–44 s, co w wypadku wysokiej klasy zawodników odpowiada dystansowi około 350 m. Liczne badania dowiodły, że istnieje istotna zależność między prędkością biegu na dystansach powyżej 300 m, a maksymalnym stężeniem La (Locatelli 1996) i traktują wysokie stężenie kwasu mlekowego jako wskaźnik lepszej wydolności anaerobowej (Iskra, 2001).

1.4. Uwarunkowania wytrzymałościowe w treningu i biegu na 400 m

Wytrzymałość jest zdolnością do wykonywania wysiłku fizycznego o wymaganej intensywności bez obniżania efektywności działania i przy zachowaniu podwyższonej odporności na zmęczenie (Sozański 1999). Stanowi stopień wykorzystania potencjału biologicznego organizmu determinowanego przez: cechy budowy somatycznej w tym proporcję włókien mięśniowych szybko i wolno kurczliwych, zdolność transportu tlenu i substancji energetycznych, sprawność usuwania produktów przemiany materii, gospodarkę wodno-elektrolityczną, sprawność mechanizmów termoregulacji oraz koordynację nerwowo-mięśniową (Adamczyk 2015).

W sporcie ze względu na zróżnicowane przejawy wytrzymałości wyróżnia się szereg jej klasyfikacji. Podstawowym kryterium jest przede wszystkim charakter energetyki wysiłku oraz rodzaj i charakter pracy układu mięśniowego w czasie wysiłku. Ze względu na metodykę organizacji procesu szkoleniowego klasyfikuje się ją jako wytrzymałość: ogólną, ukierunkowaną i specjalną. Ta ostatnia to zdolność do wykonywania w pełni specyficznego wysiłku w obrębie danej dyscypliny czy konkurencji (Sozański 1999).

W konkurencjach sprinterskich, ze szczególnym uwzględnieniem biegu na 400 m, program przygotowania kondycyjnego musi być opracowany do zoptymalizowania metabolicznych procesów wytwarzania ATP w celu osiągnięcia najlepszych wyników sportowych. Dlatego ważne jest, aby poznać zaangażowanie poszczególnych systemów energetycznych w danej konkurencji oraz zdolności motorycznych opartych na tych systemach – głównie wytrzymałości i jej odmian, takich jak wytrzymałość szybkościowa czy specjalna (Otte i Hunt 2000, Iskra 2000, Saraslanidis i wsp. 2009). Następnie należy dobrać właściwe środki treningowe, które te zdolności bezpośrednio kształtują. Wiedza w tym zakresie pozwala dobrać najbardziej odpowiednie metody treningowe w procesie przygotowawczym.

Sesje treningowe prowadzące do wysokiego poziomu mleczanu we krwi (13–30 mmol/l) są bardzo popularne wśród trenerów 400 m i stanowią podstawę materiałów prezentowanych w literaturze edukacyjnej i coachingowej (Spencer i Gustin 2001), ponieważ odtwarzają reakcje fizjologiczne obserwowane podczas oficjalnych zawodów na

400 m wśród elitarnych sportowców (Lacour i wsp. 1990). Jednak, w piśmiennictwie istnieją ograniczone dowody dotyczące badań diagnozujących metody treningowe stosowane przez elitarnych sportowców. Zatem punktem wyjścia w diagnozowaniu powszechnie aplikowanych przez trenerów sesji treningowych powinna być osiągnięta wydajność pracy i towarzyszące jej reakcje metaboliczne (Gorostagia i wsp. 2010).

Gorostagia (2010) badając grupę dwunastu 400-metrowców osiągających sukcesy na poziomie krajowym i międzynarodowym poddał kontroli 6 różnych jednostek treningowych. Analizowane sesje treningowe należały do dwóch kategorii metod treningowych, powszechnie wykorzystywanych w treningu biegów sprinterskich: trening szybkościowy (krótkie sprinty – do 100 m, o prędkości większej niż prędkość startowa na 400 m) oraz intensywny trening interwałowy (biegi na 200 i 300 m przy prędkości odpowiednio 92% i 80–87% prędkości startowych na 400 m). Monitoring tych jednostek treningowych i analiza odpowiedzi fizjologicznych organizmu na zadane obciążenie potwierdziły istotny związek między wysokim poziomem mleczanu we krwi (14–23 mmol/l), a wzrostem poziomu amoniaku we krwi (50–100 mmol/l) i równocześnie wykazał wyraźny spadek wydajności skoków pionowych – będących wyznacznikami mocy kończyn dolnych u badanych z najwyższymi początkowymi wynikami tych skoków. Spadek wydajności w skokach został zaobserwowany, gdy stężenie mleczanu we krwi przekroczyło 8–12 mmol/l, a wartość amoniaku we krwi gwałtownie wzrosła od wartości spoczynkowej. Stan ten mógł pośrednio odzwierciedlać stan deficytu energetycznego skurczu mięśni oraz niezdolność do regeneracji ATP przy dużym obciążeniu.

Dlatego trzeba pamiętać, że często powtarzane sesje treningowe o maksymalnej intensywności, wywołujące ekstremalny stres metaboliczny, mogą prowadzić do zmniejszenia spoczynkowego stężenia adenosynotryfosforanu (ATP), skumulowanej utraty nukleotydów adeninowych (Balsom i wsp. 1992) oraz zwiększonej produkcji rodników nadadtlenkowych, które mogą ostatecznie spowodować uszkodzenie mięśni (Sjodin i wsp. 1990). Te ekstremalne i częste zaburzenia bilansu energetycznego w komórce mięśniowej, odzwierciedlone przez znaczne wyczerpanie ATP, mogą kumulować większy stres komórkowy, co może być związane z nadmiernie długim czasem regeneracji (przerwy wypoczynkowej) oraz upośledzeniem wytwarzania mocy mięśniowej i potencjalnie wpływać na zmniejszenie prędkości biegu (Hellsten i wsp. 1999).

Stan zmęczenia często definiowany jest jako zmniejszenie zdolności wytwarzania siły przez układ nerwowo-mięśniowy. W biegu na 400 m podczas utrzymywania aktywacji mięśnia dochodzi do progresji spadku napięcia. Czas trwania skurczu mięśni wzrasta wraz ze zwiększonym zmęczeniem, które przejawia się wydłużonym czasem kontaktu stopy z podłożem (Chapman 1982, Sprague and Mann, 1983). Wydłuża się również czas trwania drgań wynikający głównie ze spowolnienia tempa relaksacji (Bigland-Ritchie 1983). Postępuje kwasica mięśni zmniejszająca produkcję siły. Podczas narastania zmęczenia duża liczba zmian zarówno biochemicznych, jak i biofizycznych występuje w tym samym czasie (Ward-Smith 1999).

1.5. Wytrzymałość specjalna jako wyznacznik skuteczności biegu na 400 m

Wspomniana już wytrzymałość specjalna, definiowana jest jako zdolność organizmu do efektywnego wykonania specjalizacji (Iskra 1999). W odniesieniu do biegu na 400 m powyższą definicję można rozbić na następujące pojęcia według Iskry i wsp. (2015): „wytrzymałość” – zdolność do kontynuowania przedłużonego biegu sprinterskiego o czasie trwania ok. 45 s; „specjalna” – umiejętność utrzymania podstawowych parametrów biegu (długość i częstotliwość kroku) przy narastającym zmęczeniu. W ujęciu treningowym termin „wytrzymałość specjalna” używany jest do określania wysiłków z intensywnością submaksymalną i maksymalną w przedziale 90–98% możliwości zawodników w danym okresie treningowym. Realizowany jest na odcinkach „około-dystansowych” 300–600 m, z optymalnymi przerwami (Iskra 1999). Stosuje się go również do opisywania form sprawdzianów i wyczerpujących treningów o wysokiej intensywności.

Wytrzymałość specjalna kształtuje tolerancję na silne zakwaszenie mięśni, szczególnie istotne w biegach powyżej 300 m. Biegi w zakresie 300–600 m stanowią główny środek treningowy wśród biegaczy na 400 m. Wśród zawodników wysokiej klasy normą jest potreningowy wzrost zakwaszenia przekraczający 20 mmol/l. Ta intensywna forma treningu wykorzystywana jest głównie w okresie przygotowania specjalnego i przedstartowego (Iskra 1999). Reis i Miguel (2007) badając 400-metrowców stwierdzili wzrost wartości stężenia La wraz ze zbliżaniem się okresu startowego (z 13,8 mmol/l do 15,5 mmol/l) spowodowany wzrostem intensywności wysiłku oraz procentowego udziału przemian

beztlenowych (67%). Wyniki monitoringu biegaczy na dystansie 400 m jednoznacznie pokazują, że wraz ze wzrostem poziomu sportowego wzrasta też procentowy udział procesów beztlenowych, a co za tym idzie – pozwala wyciągnąć wnioski, że im lepiej przygotowany zawodnik, tym jego poziom L_a po biegu jest wyższy.

Według Gorostiaga (2010) ograniczone informacje naukowe dostępne w odniesieniu do rodzaju metody szkolenia niezbędnych do optymalnego zwiększenia skuteczności w biegu na 400 m skłaniają do budowania naukowo-opartej metody oceny tej skuteczności poprzez analizę mocy wyjściowej, zmiany parametrów kinematycznych oraz reakcji metabolicznych zachodzących podczas biegu.

2. CEL PRACY i PYTANIA BADAWCZE

2.1. Cel pracy

Celem pracy jest określenie na podstawie zmiany parametrów kinematycznych biegu oraz intensyfikacji beztlenowych systemów energetycznych, który dystans – 350 m czy 500 m, jest skuteczniejszy w kształtowaniu wytrzymałości specjalnej w biegu na 400 m. Dodatkowym aspektem jest objaśnienie dynamiki zmian parametrów kinematycznych pod wpływem narastającego zmęczenia na poszczególnych dystansach.

2.2. Pytania badawcze

Interpretacja skuteczności wybranych odcinków biegowych w kształtowaniu wytrzymałości specjalnej w biegu na 400 m wymaga odpowiedzi na następujące pytania badawcze:

1. Jak zmienia się czas kontaktu stopy z podłożem, czas lotu, długość kroku, częstotliwość kroku oraz prędkość kroku pod wpływem narastającego zmęczenia na dystansach 350 m oraz 500 m?
2. Jaka jest zależność między parametrami kinematycznymi biegu na dystansach 350 m i 500 m w odniesieniu do biegu na 60 m?
3. Który dystans: 350 m czy 500 m bardziej angażuje procesy energetyczne o charakterze beztlenowo-kwasomlekowym i z jaką dynamiką przebiega proces restytucji?
4. Jak korelują między sobą zmiany parametrów kinematycznych na dystansach 350 m oraz 500 m?
5. Czy na podstawie analizy wytrzymałości specjalnej – 350 m lub 500 m, można antycypować wynik sportowy w biegu na 400 m?

3. MATERIAŁ I METODY

3.1. Materiał badawczy

Badania przeprowadzono z udziałem wyselekcjonowanej, 11-osobowej grupy lekkoatletów specjalizujących się w biegu na 400 metrów (tab.1) odnoszących sukcesy na arenie międzynarodowej. Pięciu spośród badanych zawodników było w składzie sztafety, która podczas 17. Halowych Mistrzostw Świata (Birmingham 2018) ustanowiła halowy rekord świata w konkurencji 4×400 m. Pozostali badani to medaliści mistrzostw świata i Europy w różnych kategoriach wiekowych.

Tabela 1. Przydział do grup testu, dane antropometryczne badanych, ich rekordy życiowe oraz najlepsze wyniki w sezonie poprzedzającym badania

Dystans (m)	Badany	Wiek (lata)	Wzrost (cm)	Masa (kg)	BP 400 m (s)	SB 400 m 2017 (s)
350	KK	31	179,5	71,5	45,24	46,57
350	ŁK	29	184,0	74,8	45,65	46,45
350	KZ	24	188,0	87,6	45,84	–
350	KD	23	192,0	79,2	45,98	45,98
350	WS	21	174,0	70,0	46,37	46,42
350	PA	24	192,0	87,0	47,48	–
500	BC	24	180,0	84,6	47,04	47,48
500	DK	22	187,5	75,8	46,40	46,40
500	MR	19	192,5	75,5	47,40	47,88
500	TS	25	182,5	78,6	47,18	48,10
500	RO	29	195,0	83,0	45,14	45,23

3.2. Przebieg badań

Eksperyment został przeprowadzony w maju, na początku okresu startowego, co pozwoliło na odzwierciedlenie optymalnych dyspozycji badanych w kontekście gotowości startowej do biegu na 400 m. Badania wykonano w dwa dni. Aby umożliwić jak najbardziej komfortowe miejsce dla zawodników trenujących w różnych rejonach kraju, badania przeprowadzono na obiektach sportowych Akademii Wychowania Fizycznego

w Warszawie. W pierwszym dniu przeprowadzono pomiary budowy somatycznej oraz bieg na dystansie 60 m z wykorzystaniem urządzenia pomiarowego OptoJump.

Drugiego dnia na stadionie lekkoatletycznym przeprowadzono próby biegowe na dystansach 350 m oraz 500 m zorganizowane w ramach dodatkowych konkurencji międzynarodowego mityngu lekkoatletycznego (4. Memoriał Zygmunta Szelesta). Zawodnicy zostali podzieleni na dwie grupy: test-bieg na 350 m oraz test-bieg na 500 m. Podział na grupy został zaplanowany zgodnie z indywidualnymi preferencjami zawodników oraz ich rocznym planem treningowym, ustalonym z trenerem kadry narodowej i trenerem klubowym. Każdy z badanych wykonywał swoją próbę pojedynczo, start na dystansie 350 m odbywał się z bloków natomiast na 500 m z pozycji startu wysokiego. Wynik mierzony był przy użyciu fotokomórki (LynxSystem) oraz w asyście wykwalifikowanego startera. Na dystansie 500 m zostały zarejestrowane, przy pomocy urządzenia pomiarowego OptoJump, dwa odcinki: 40–90 m oraz 440–490 m. Na dystansie 350 m natomiast odcinki: 60–100 m oraz 300–340 m. Każdy zawodnik w trakcie prowadzenia badań został poddany kontroli stężenia mleczanu w osoczu po wykonaniu wysiłku.

3.2.1. Pomiary budowy somatycznej

W celu kompleksowego przedstawienia parametrów kinematycznych biegu, postanowiono wykonać podstawowe pomiary antropometryczne zawodników. Pomiar budowy somatycznej został wykonany w pracowni Zakładu Anatomii i Biomechaniki przez wykwalifikowany personel. Pomiary antropometryczne zostały przeprowadzone zgodnie z powszechnie przyjętą metodyką, bez wierzchniej odzieży i obuwia. Pomiaru wysokości ciała dokonano od szczytu głowy (*vertex*), ustawionej w płaszczyźnie oczno-usznej, do podstawy (*basis*), na której stał badany. Pomiar odczytano z dokładnością do jednego centymetra. Masę ciała zmierzono na wadze lekarskiej z dokładnością do jednego kilograma. Na podstawie danych dotyczących masy i wysokości ciała wyliczono wskaźnik masy ciała – *Body Mass Index* (BMI). Za pomocą antropometru dokonano pomiarów wybranych cech somatycznych oraz zmierzono obwody uda i podudzia. Poniżej podano szczegóły pomiarów:

Masa ciała (kg)

Wysokość ciała (cm)

BMI

Długość kończyny dolnej – P (cm)

Długość kończyny dolnej – L (cm)

Długość uda – P (cm)

Długość uda – L (cm)

Długość podudzia – P (cm)

Długość podudzia – L (cm)

Obwód uda – P (cm)

Obwód uda – L (cm)

Obwód podudzia – P (cm)

Obwód podudzia – L (cm)

3.2.2. Pomiar stężenia mleczanu w osoczu

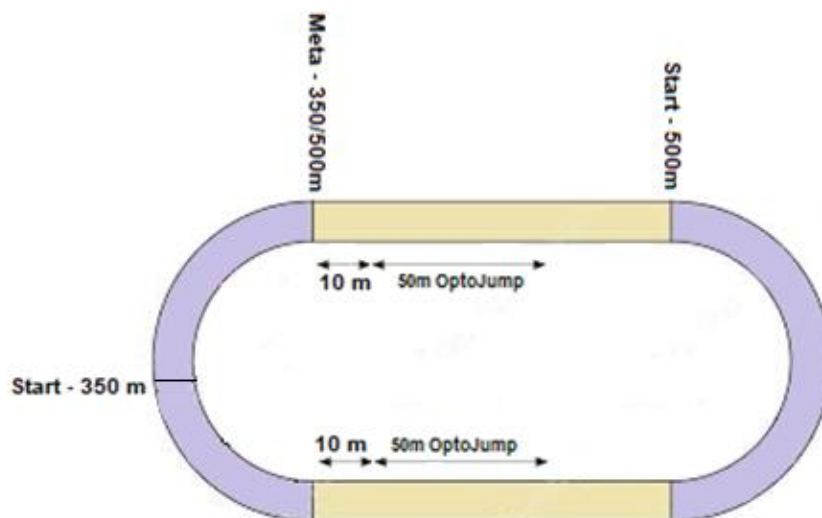
Zawodnicy zostali poddani badaniu stężenia mleczanu w osoczu przed podjęciem aktywności, po rozgrzewce, bezpośrednio przed próbą, oraz w 1., 3., 12., 20. i 40. minucie od zakończenia wysiłku. Stężenie mleczanu La ($\text{mmol}\cdot\text{l}^{-1}$) oznaczono za pomocą metody enzymatycznej testem firmy Sentinel (Italia). Arterializowaną krew pobierano z opuszka palca ręki i natychmiast rozcieńczano 10-krotnie chłodnym, izotonicznym roztworem zawierającym NaF i NaCl. Stężenie mleczanu mierzono w supernatancie, uzyskanej po krótkim wirowaniu rozcieńczonej próbki. Jako standardu użyto spektralnie czystego L-mleczanu o znanym stężeniu i czytnika płytek EPOCH firmy BioTek. Pomiary robione były w dwóch powtórzeniach.

3.2.3. Pomiar parametrów kinematycznych testu-biegu na 350 m i 500 m

Do pomiaru podstawowych parametrów kinematycznych kroku biegowego: długości kroku, częstotliwości kroku, czasu fazy podporowej, czasu fazy lotu oraz czasu wykonania pojedynczego kroku został wykorzystane urządzenie pomiarowe OptoJump. Jest to optyczny system pomiarowy, który może być używany do pomiaru długości kontaktu stopy z podłożem w czasie odbicia, oraz fazy lotu po odbiciu, z dokładnością do 1/1000 sekundy.

OptoJump składa się z dwóch listew (rozmiary: 100 cm × 3 cm × 4 cm), z których jedna odpowiada za przyjmowanie i kontrolę danych, druga za ich elektroniczną transmisję. Diody na poprzeczce nadawczej komunikują się w sposób ciągły z tymi na poprzeczce odbiorczej. System wykrywa wszelkie przerwy w komunikacji i oblicza czas ich trwania. Kilka do kilkudziesięciu elementów może być połączonych razem, w celu wydłużenia ścieżki do uzyskania pomiarów. Poprzez zebranie podstawowych danych, dedykowane oprogramowanie umożliwia uzyskanie szeregu parametrów związanych z wydajnością sportowca przy zachowaniu maksymalnej dokładności w czasie rzeczywistym.

W każdym z testów (350 i 500 m) wykonano rejestrację parametrów kinematycznych kroku biegowego na dwóch 50-metrowych odcinkach. Pierwszy system pomiarowy został ułożony w początkowej fazie biegu każdego z testów po przebiegnięciu przez zawodnika 40 m. Wolne od pomiaru pierwsze 40 m biegu spowodowane było niemożliwością ustawienia systemu pomiarowego na wirażu w biegu na 350 m. Zrezygnowano również z pomiaru kinematyki na ostatnich 10 m każdego z testu-biegu, ze względu na obawę o duże zaburzenia techniki biegu (wartości pomiarowe każdego parametru kinematycznego) na końcowych metrach wysiłku. Do szczegółowej analizy statystycznej wybrano każde ostatnie 25 m z 50-metrowego odcinka pomiarowego zawierające 10 pełnych kroków biegowych.



Rycina 1. Rozmieszczenie systemu pomiarowego OptoJump na stadionie.

3.2.4. Pomiar parametrów kinematycznych testu-biegu na 60 m

Pierwszego dnia badań na hali lekkoatletycznej przeprowadzono pomiar szybkości maksymalnej na dystansie 60 m, również przy użyciu systemu pomiarowego OptoJump. Każdy z zawodników wykonał po dwie próby. Przerwa między próbami wynosiła 6 minut. Do analizy statystycznej wybrano najszybszy bieg. Z kolei analizę kinematyczną biegu przeprowadzono na wybranych parametrach pozyskanych z wycinka 25 m biegu na 60 m tj. między 40 a 60 m, wtedy gdy zawodnicy przypuszczalnie uzyskali najwyższe wartości prędkości biegowej oraz z pominięciem fazy rozpędzania się.

3.3. Analiza statystyczna

Do przetestowania normalności rozkładu w grupach parametrów somatycznych oraz parametrów kinematycznych (wyznaczonych dwudziestu kroków biegowych podczas wytrzymałości specjalnej: 350 m i 500 m) zastosowano test Shapiro-Wilka. Brakowało podstaw do odrzucenia hipotezy o rozkładzie normalnym. W celu dokonania charakterystyki statystycznej obliczono średnią arytmetyczną, odchylenie standardowe, współczynnik zmienności, wartość minimalną, maksymalną oraz przedział ufności. Do oceny zróżnicowania średnich wartości badanych parametrów somatycznych i kinematycznych prób biegowych wykorzystano test t-Studenta. Zastosowano również jednowymiarowe testy dla powtarzanych pomiarów – analizę wariancji Anova. Zróżnicowania szczegółowe (testy post-hoc) między średnimi wartościami parametrów obliczono przy użyciu testu NIR. Do określenia związku między wybranymi parametrami somatycznymi, a poszczególnymi parametrami kinematycznymi i wartościami stężenia mleczanu zastosowano korelację porządku rang Spearmana. Wartości istotne statystycznie zostały zaznaczone w tabelach pogrubionym drukiem. Przyjęto próg istotności na poziomie $p < 0,05$.

4. ANALIZA WYNIKÓW

Charakterystyka morfologiczna (tab. 2) zawiera wybrane parametry i wskaźniki określające budowę ciała badanych czterystumetrowców. Pomiary te nie wykazały różnic istotnych statystycznie, co wskazuje, że grupa sprinterów, pomimo podziału na dwie podgrupy, jest homogeniczna.

Średnia wieku zawodników biorących udział w teście-biegu na 350 m różniła się od grupy testu-biegu na 500 m o niecałe dwa lata, na korzyść tych pierwszych. Z kolei średnia wysokość ciała w grupie testu-biegu na 350 m to 184,92 cm (SD = 7,20); jest ona niższa o prawie 3 cm od średniej w drugiej grupie: 187,50 cm (SD = 6,37). Mimo że różnica między najwyższym (195 cm) a najniższym (174 cm) zawodnikiem wynosiła aż 21 cm, nie odnotowano między obiema grupami sprinterów różnic istotnych statystycznie pod względem omawianej cechy morfologicznej (tab. 2).

Tabela 2. Charakterystyka budowy ciała biegaczy na 400 m z podziałem na: grupa 350 m i grupa 500 m oraz ocena zróżnicowania wartości średnich między grupami testem t-Studenta

Cecha	Grupa 350 m, n = 6		Grupa 500 m, n = 5		Test t-Studenta	
	\bar{x}	s	\bar{x}	s	t	p
Wiek (lata)	25,33	3,83	23,80	3,70	0,67	0,5190
Masa ciała (kg)	78,35	7,62	79,50	4,15	-0,30	0,7705
Wysokość ciała (cm)	184,92	7,20	187,50	6,37	-0,62	0,5486
BMI	22,88	1,20	22,70	2,23	0,18	0,8647
Dł. kończyny dolnej – P (cm)	95,50	4,83	98,60	2,72	-1,27	0,2359
Dł. kończyny dolnej – L (cm)	94,83	5,04	98,60	2,46	-1,52	0,1632
Długość uda – P (cm)	43,25	2,56	44,80	0,76	-1,29	0,2276
Długość uda – L (cm)	42,92	2,58	45,20	1,04	-1,85	0,0978
Długość podudzia – P (cm)	44,08	2,08	45,40	2,61	-0,93	0,3753
Długość podudzia – L (cm)	43,92	2,40	45,40	2,36	-1,03	0,3299
Obwód uda – P (cm)	58,33	2,40	58,20	3,01	0,08	0,9366
Obwód uda – L (cm)	58,08	2,20	58,14	3,04	-0,04	0,9722
Obwód podudzia – P (cm)	38,07	0,84	38,22	3,56	-0,10	0,9201
Obwód podudzia – L (cm)	38,20	1,38	38,38	3,62	-0,11	0,9122

Nie odnotowano również istotnych różnic między średnimi wartościami masy ciała w badanych grupach. Średnia wartość tego parametru w grupie testu-biegu na 350 m wynosiła 78,35 kg, a w grupie testu-biegu na 500 m – 79,50 kg. Wartości odchylenia standardowego i współczynnika zmienności w obu grupach kształtowały się mniej więcej na tym samym poziomie (tab. 2). Długość kończyny dolnej nie wykazała istotnych różnic między grupami, jakkolwiek w grupie testu-biegu na 350 m wystąpiła różnica w długości kończyny lewej w stosunku do prawej o prawie 1 cm (0,67 cm). Jest to niewiele, ale mogło mieć znaczenie dla przebiegu zmienności długości kroku biegowego realizowanego w teście-biegu na 350 m. Analiza statystyczna średnich wartości pozostałych parametrów długościowych i obwodów kończyny dolnej nie wykazała różnic. Bardzo ważnym kryterium somatycznym w sporcie są proporcje między masą ciała a jego wysokością, wyrażane za pomocą licznych współczynników. W niniejszej pracy wykorzystano współczynnik *Body Mass Index* (BMI). Analizowany wskaźnik smukłości nie pokazywał istotnych różnic między obiema grupami sprinterów.

Tabela 3. Charakterystyka wybranych parametrów testu-biegu na 350 m i 500 m, $p < 0,05$ zaznaczono tłustym drukiem

Cecha	Grupa 350 m, n = 6		Grupa 500 m, n = 5		Test t-Studenta	
	\bar{x}	s	\bar{x}	s	t	p
Czas biegu (s)	40,98	0,73	64,63	1,21	-40,17	0,0000
Długość kroku (cm)	223,08	8,34	221,85	14,46	0,18	0,8637
Częstotliwość kroku (Hz)	4,00	0,12	3,55	0,18	4,99	0,0007
Prędkość biegu (m/s)	8,90	0,15	8,02	0,67	3,12	0,0123
Czas biegu na 60 m (s)	6,81	0,17	6,87	0,10	-0,77	0,4631

Tabela 3. przedstawia krótką charakterystykę porównawczą podstawowych parametrów kinematycznych testu-biegu na 350 m i 500 m. Ze względu na różnice w długości pokonanego dystansu (150 m) między testami, istotne różnice w prędkości, czasie i częstotliwości kroku wydają się prawidłową zależnością. Nie zanotowano różnic w długości kroku, co wydaje się pewnym zaskoczeniem. W tabeli 3. ujęty został również czas biegu na 60 m, jako odnośnik do dalszej analizy poszczególnych parametrów

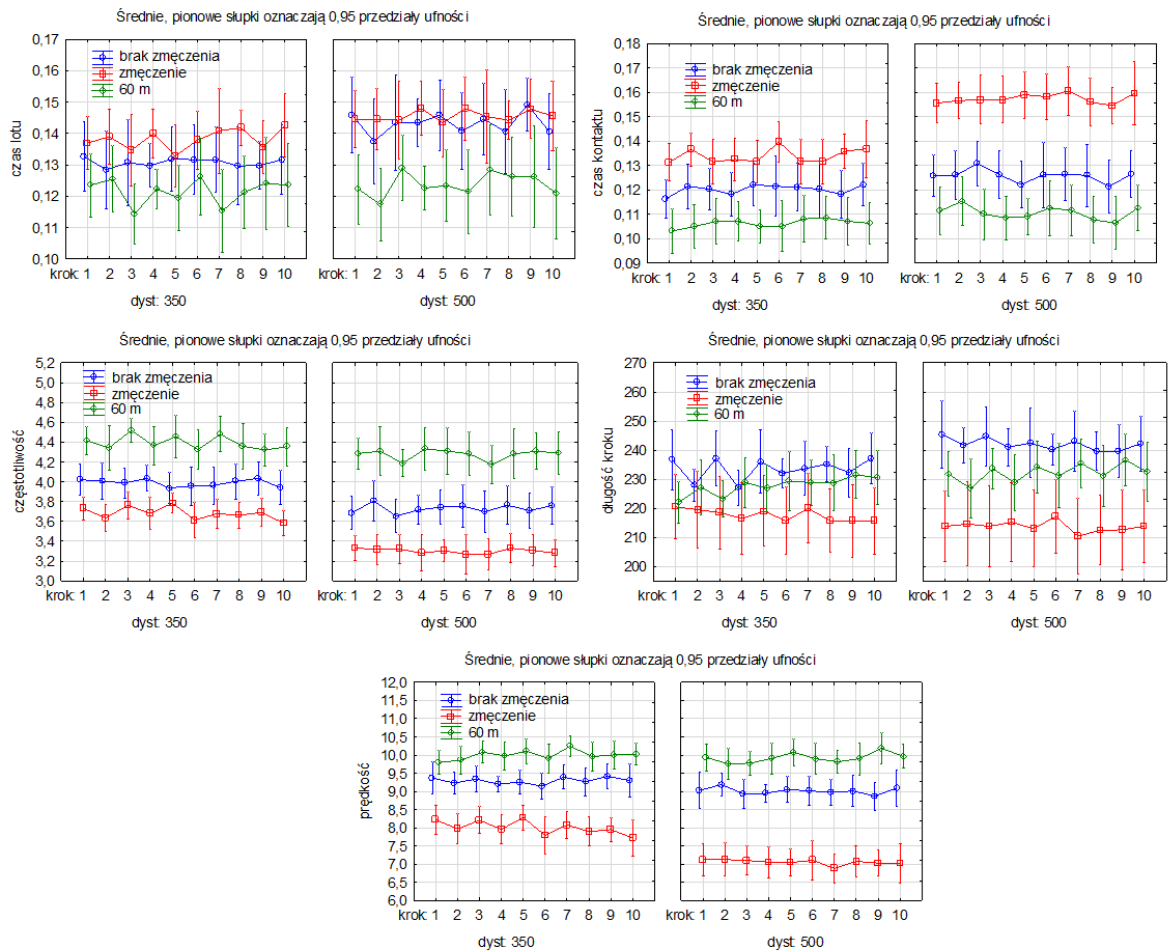
testu-biegu na 350 m i 500 m. Nie zanotowano między grupami sprinterów istotnych statystycznie różnic w czasie pokonania tego dystansu.

Tabela 4. Analiza kinematyczna parametrów 20 kroków podczas biegu na 350 m i 500 m z podziałem na początkowy i końcowy odcinek testu zestawione z parametrami 10 kroków na dystansie 60 m

Para- metr kroku	Krok	Początkowy odcinek				Końcowy odcinek				60 m			
		350 m N = 6		500 m N = 5		350 m N = 6		500 m N = 5		350 m N = 6		500 m N = 5	
		\bar{x}	s	\bar{x}	s	\bar{x}	s	\bar{x}	s	\bar{x}	s	\bar{x}	s
Czas kon- taktu	1	0,116	0,0079	0,126	0,0092	0,131	0,0061	0,156	0,0101	0,103	0,0117	0,111	0,0068
	2	0,122	0,0117	0,126	0,0072	0,137	0,0077	0,157	0,0068	0,105	0,0116	0,115	0,0069
	3	0,120	0,0114	0,131	0,0052	0,132	0,0122	0,157	0,0056	0,107	0,0115	0,110	0,0085
	4	0,118	0,0101	0,126	0,0091	0,133	0,0116	0,157	0,0059	0,107	0,0100	0,109	0,0070
	5	0,122	0,0100	0,122	0,0087	0,132	0,0101	0,159	0,0085	0,105	0,0086	0,109	0,0054
	6	0,122	0,0141	0,126	0,0121	0,140	0,0114	0,158	0,0052	0,105	0,0137	0,113	0,0068
	7	0,121	0,0116	0,126	0,0094	0,132	0,0112	0,161	0,0080	0,108	0,0124	0,112	0,0069
	8	0,120	0,0114	0,126	0,0141	0,132	0,0116	0,156	0,0068	0,109	0,0094	0,108	0,0093
	9	0,118	0,0101	0,121	0,0110	0,136	0,0089	0,155	0,0052	0,107	0,0113	0,106	0,0100
	10	0,122	0,0100	0,126	0,0087	0,137	0,0136	0,160	0,0116	0,106	0,0107	0,113	0,0072
Czas lotu	1	0,133	0,0132	0,146	0,0100	0,137	0,0062	0,145	0,0117	0,124	0,0125	0,122	0,0085
	2	0,129	0,0141	0,137	0,0124	0,139	0,0101	0,145	0,0091	0,126	0,0112	0,117	0,0119
	3	0,131	0,0167	0,143	0,0124	0,135	0,0111	0,144	0,0135	0,114	0,0095	0,129	0,0112
	4	0,130	0,0072	0,143	0,0080	0,140	0,0096	0,148	0,0066	0,122	0,0073	0,123	0,0060
	5	0,132	0,0084	0,146	0,0137	0,133	0,0104	0,143	0,0109	0,120	0,0107	0,123	0,0119
	6	0,132	0,0143	0,141	0,0087	0,138	0,0107	0,148	0,0089	0,126	0,0137	0,121	0,0129
	7	0,132	0,0128	0,145	0,0091	0,141	0,0168	0,145	0,0118	0,115	0,0138	0,128	0,0151
	8	0,130	0,0166	0,141	0,0074	0,142	0,0048	0,144	0,0071	0,121	0,0133	0,126	0,0112
	9	0,130	0,0072	0,149	0,0095	0,136	0,0083	0,148	0,0104	0,124	0,0116	0,126	0,0200
	10	0,132	0,0084	0,141	0,0151	0,143	0,0086	0,146	0,0133	0,124	0,0161	0,121	0,0117
Często- tliwość	1	4,02	0,16	3,69	0,17	3,73	0,12	3,33	0,13	4,42	0,11	4,29	0,20
	2	4,01	0,17	3,81	0,23	3,64	0,17	3,32	0,12	4,34	0,20	4,31	0,29
	3	3,99	0,15	3,65	0,18	3,76	0,17	3,32	0,10	4,52	0,12	4,19	0,15
	4	4,04	0,11	3,72	0,18	3,68	0,21	3,28	0,12	4,36	0,20	4,33	0,23
	5	3,94	0,05	3,74	0,25	3,79	0,15	3,31	0,03	4,46	0,20	4,31	0,26
	6	3,96	0,19	3,76	0,24	3,61	0,24	3,27	0,12	4,33	0,19	4,28	0,25
	7	3,96	0,19	3,70	0,22	3,68	0,21	3,27	0,06	4,48	0,20	4,17	0,18

Parametr kroku	Krok	Początkowy odcinek				Końcowy odcinek				60 m			
		350 m N = 6		500 m N = 5		350 m N = 6		500 m N = 5		350 m N = 6		500 m N = 5	
		\bar{x}	s	\bar{x}	s	\bar{x}	s	\bar{x}	s	\bar{x}	s	\bar{x}	s
8	8	4,01	0,15	3,76	0,23	3,66	0,19	3,33	0,05	4,36	0,24	4,28	0,26
	9	4,04	0,11	3,71	0,24	3,69	0,18	3,31	0,11	4,32	0,09	4,31	0,25
	10	3,94	0,05	3,76	0,27	3,58	0,14	3,28	0,13	4,36	0,18	4,29	0,24
Długość kroku	1	236,67	11,88	245,40	10,62	220,50	9,63	213,80	14,45	222,00	8,27	231,80	6,91
	2	227,83	5,19	241,60	6,88	219,50	9,57	214,60	18,64	227,17	12,04	226,80	7,05
	3	237,17	9,97	244,80	10,23	218,50	11,34	213,80	15,99	223,17	7,36	233,60	5,77
	4	227,00	5,73	241,00	7,18	216,50	9,31	215,20	17,24	228,83	11,94	228,80	4,55
	5	236,00	9,86	242,40	13,78	219,00	10,51	213,00	15,76	226,83	7,44	234,20	10,33
	6	232,00	4,52	240,20	6,22	215,67	6,47	217,20	17,48	229,33	13,38	231,20	6,91
	7	233,67	9,99	243,00	10,25	220,00	12,25	210,40	13,83	228,83	9,35	235,40	7,16
	8	235,17	8,09	239,60	3,91	215,67	5,24	212,40	16,76	228,67	13,40	231,20	4,55
	9	232,33	10,35	239,60	7,16	215,67	9,73	212,60	17,05	231,50	9,65	236,60	7,77
	10	237,17	11,81	242,20	5,07	215,67	5,57	213,80	17,51	230,50	12,76	232,40	4,93
Prędkość	1	9,37	0,59	9,03	0,29	8,22	0,39	7,13	0,50	9,80	0,42	9,93	0,26
	2	9,23	0,23	9,19	0,40	7,97	0,29	7,13	0,60	9,86	0,45	9,76	0,37
	3	9,34	0,48	8,93	0,23	8,21	0,26	7,10	0,52	10,08	0,40	9,78	0,16
	4	9,20	0,18	8,95	0,28	7,96	0,30	7,06	0,54	9,98	0,47	9,91	0,35
	5	9,26	0,38	9,05	0,32	8,28	0,25	7,04	0,49	10,11	0,37	10,08	0,35
	6	9,14	0,42	9,02	0,35	7,79	0,39	7,11	0,69	9,91	0,47	9,90	0,37
	7	9,40	0,37	8,98	0,32	8,08	0,28	6,88	0,52	10,25	0,38	9,81	0,22
	8	9,26	0,39	9,01	0,45	7,90	0,30	7,08	0,55	9,96	0,46	9,90	0,40
	9	9,41	0,39	8,87	0,36	7,95	0,22	7,03	0,47	10,01	0,39	10,19	0,44
	10	9,30	0,47	9,10	0,52	7,72	0,29	7,02	0,74	10,03	0,28	9,96	0,37

W tabeli 4. i na rycinie 2. zawarto średnie i odchylenia standardowe pięciu podstawowych parametrów 20 kroków biegowych, z podziałem na początkową fazę biegu (brak zmęczenia) oraz na końcową fazę biegu (zmęczenie) wykonanych podczas testu-biegu na 350 m i 500 m. Dodatkowo zestawiono je z wynikami pomiaru 10 kroków podczas testu na 60 m w celu porównania ich do wartości osiąganych podczas biegu z maksymalną prędkością. Pomiar na 60 m dokonane zostały z pominięciem fazy przyspieszenia startowego, która mogłaby zaburzyć obraz parametrów kinematycznych kroku.



Rycina 2. Wartości parametrów kinematycznych 20 kroków biegowych na dystansach 350 m i 500 m z podziałem na początkowy i końcowy odcinek testu zestawione z parametrami 10 kroków na dystansie 60 m

Jak wcześniej wspomniano, w tabeli 3. ujęty został również czas biegu na 60 m jako odnośnik do dalszej analizy poszczególnych parametrów testu-biegu na 350 m i 500 m. Wyraźnie daje się zauważyć różnicę w przebiegu zmienności średnich poszczególnych parametrów kinematycznych kroku biegowego: czasu fazy lotu, czasu fazy podporowej, częstotliwości kroku oraz prędkości wykonania pojedynczego kroku, między biegiem na 60 m, a pozostałymi testami-biegu na 350 m i 500 m. Bieg na 60 m wykazuje wyższe wartości. Jediną zmienną, która najwyższe wartości osiąga w biegach na 350 m i 500 m, na odcinkach charakteryzującym się brakiem oznak zmęczenia, czyli początkowej fazy biegu, jest długość kroku. Daje się również zauważyć różnicę między testem biegu na 350 m

i testem-biegu na 500 m. Gdy analizie poddamy porównanie wewnątrz grupowe – dwa odcinki w teście-biegu na 350 m i dwa odcinki w teście-biegu na 500 m, różnice w poszczególnych parametrach kinematycznych są jeszcze bardziej wyraziste. Wydaje się logiczne, że wraz ze wzrostem długości przebieganego dystansu narasta zmęczenie, które może wpływać na zmianę wartości poszczególnych parametrów kinematycznych kroku biegowego. Nie jest ona już tak wyrazista, jak poprzednie porównanie. W tej analizie największe różnice między odcinkiem z brakiem zmęczenia a odcinkiem na zmęczeniu wystąpiły w teście-biegu na 500 m. Dotyczy to przede wszystkim fazy kontaktu stopy z podłożem, a wraz z nią, prędkością wykonania pojedynczego kroku, a oba parametry odpowiadają za częstotliwość kroku.

Tabela 5. Porównanie średnich wartości parametrów kinematycznych kroku biegowego między początkowym odcinkiem (brak zmęczenia) a odcinkiem końcowym (zmęczenie) w teście-biegu na 350 m. NIR; prawdopodobieństwa dla testów post-hoc, $p < 0,05$ zaznaczono tłustym drukiem

Parametry kinematyczne kroku	Kolejność kroku									
	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10
czas kontaktu	0,0000	0,0000	0,0004	0,0000	0,0027	0,0000	0,0009	0,0004	0,0000	0,0000
czas lotu	0,3157	0,0158	0,3542	0,0194	0,8166	0,1540	0,0348	0,0053	0,1774	0,0115
częstotliwość	0,0000	0,0000	0,0011	0,0000	0,0265	0,0000	0,0000	0,0000	0,0000	0,0000
długość kroku	0,0000	0,0046	0,0000	0,0004	0,0000	0,0000	0,0000	0,0000	0,0000	0,0000
prędkość	0,0000	0,0000	0,0000	0,0000	0,0000	0,0000	0,0000	0,0000	0,0000	0,0000

Tabela 5. zawiera porównanie średnich wartości pięciu podstawowych parametrów kinematycznych kroku biegowego między odcinkiem początkowym testu-biegu na 350 m, a odcinkiem końcowym. Pomiar został wykonany na odcinku 25 m w obu przypadkach, a do analizy włączono 10 pełnych kroków wykonanych na ww. odcinku. Odcinek początkowy odnosi się do pierwszej fazy biegu, ale bez uwzględnienia fazy początkowego przyspieszenia. Z kolei odcinek końcowy charakteryzuje ostatnią fazę biegu, ale bez uwzględnienia ostatnich 10 m, gdzie zazwyczaj dochodzi do wyczerpania fizycznego zawodnika oraz pojawia się element „rzutu na taśmę”, które mogą wpłynąć na zmianę parametrów kinematycznych kroku biegowego. Wyraźnie widać różnice (istotne statystycznie) między oboma odcinkami. Szczególnie dotyczy to czterech parametrów kinematycznych: czas kontaktu stopy z podłożem, częstotliwość kroku, długość kroku i prędkość wykonania pojedynczego kroku dla wszystkich dziesięciu wykonanych kroków. Zaburzenia dają się zauważyć w parametrze

czas lotu, gdzie 6 kroków (1–3, 5–6 i 9–10) nie wykazały istotnie statystycznych różnic między odcinkiem z brakiem zmęczenia a odcinkiem na zmęczeniu.

Tabela 6. zawiera taką samą analizę, jak tabela powyżej, ale dotyczy ona testu-biegu na 500 m. Tu również cztery parametry kinematyczne kroku biegowego wykazały istotne statystycznie różnice między dwoma odcinkami. Dotyczy to wszystkich 10 kroków. Podobnie jak w tabeli 4, czas fazy lotu odbiegał od pozostałych parametrów. Pierwsze trzy kroki wykazały istotne różnice między analizowanymi odcinkami, ale kroki od 4 do 10 nie wykazał zmian.

Tabela 6. Porównanie średnich wartości parametrów kinematycznych kroku biegowego między początkowym odcinkiem (brak zmęczenia), a odcinkiem końcowym (zmęczenie) w teście-biegu na 500 m. NIR; prawdopodobieństwa dla testów post-hoc, $p < 0,05$ zaznaczono tłustym drukiem

Parametry kinematyczne kroku	Kolejność kroku									
	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10
czas kontaktu	0,0000	0,0000	0,0000	0,0000	0,0000	0,0000	0,0000	0,0000	0,0000	0,0000
czas lotu	0,0041	0,0101	0,0093	0,6721	0,2051	0,3309	0,6721	0,7349	0,1397	0,8324
częstotliwość	0,0000	0,0000	0,0000	0,0000	0,0000	0,0000	0,0000	0,0000	0,0000	0,0000
długość kroku	0,0496	0,0285	0,0301	0,0000	0,0000	0,0000	0,0000	0,0000	0,0000	0,0000
prędkość	0,0000	0,0000	0,0000	0,0000	0,0000	0,0000	0,0000	0,0000	0,0000	0,0000

Dla porównania, w tabeli 7. przedstawione jest zestawienie średnich wartości podstawowych parametrów kinematycznych kroku biegowego na odcinku – brak zmęczenia i odcinku – na zmęczeniu między testem-biegiem na 350 m i 500 m. Odcinek z brakiem zmęczenia nie wykazuje istotnych różnic prawie we wszystkich pięciu analizowanych parametrach kinematycznych między biegami. Jedynie częstotliwość wykazuje zróżnicowanie i to nie we wszystkich krokach (1, 3, 4 oraz 7–9). W kroku dziewiątym, zarówno czas fazy lotu, jak i prędkość wykonania pojedynczego kroku wykazały istotne statystycznie różnice między biegiem na 350 m i 500 m. Z kolei końcowa faza biegu – na zmęczeniu, pokazała istotne różnice tylko w trzech parametrach: czas kontaktu stopy z podłożem, częstotliwość kroku oraz czas wykonania kroku. Dotyczy to wszystkich dziesięciu kroków. Żadnych istotnych statystycznie różnic na tym odcinku, między biegami (350 m i 500 m) nie wykazał czas fazy lotu i pośrednio z nią związana długość kroku. Oddziaływanie to dotyczy wszystkich dziesięciu wykonanych kroków.

Tabela 7. Porównanie średnich wartości parametrów kinematycznych kroku biegowego między początkowym odcinkiem (brak zmęczenia), a odcinkiem końcowym (zmęczenie) między testem-biegiem na 350 m i 500 m, test NIR; prawdopodobieństwa dla testów post-hoc, $p < 0,05$ zaznaczono tłustym drukiem

Parametry kinematyczne	Kolejność kroku									
	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10
	Odcinek początkowy (brak zmęczenia)									
czas kontaktu	0,1638	0,4975	0,1263	0,2333	0,9960	0,4789	0,4314	0,3950	0,6247	0,5230
czas lotu	0,0799	0,2333	0,0935	0,0751	0,0675	0,2217	0,0887	0,1464	0,0141	0,2316
częstotliwość	0,0039	0,0731	0,0040	0,0058	0,0796	0,0688	0,0199	0,0314	0,0048	0,1050
długość kroku	0,2265	0,0663	0,2874	0,0624	0,3694	0,2546	0,1979	0,5308	0,3102	0,4777
prędkość	0,1230	0,8483	0,0623	0,2467	0,3492	0,5541	0,0590	0,2433	0,0157	0,3484
Odcinek końcowy (zmęczenie)										
czas kontaktu	0,0018	0,0074	0,0012	0,0017	0,0007	0,0116	0,0004	0,0018	0,0108	0,0030
czas lotu	0,3067	0,4488	0,2028	0,2825	0,1598	0,1755	0,5359	0,7476	0,1089	0,6902
częstotliwość	0,0008	0,0063	0,0003	0,0009	0,0001	0,0032	0,0007	0,0041	0,0013	0,0082
długość kroku	0,3481	0,4892	0,5068	0,8532	0,3992	0,8273	0,1862	0,6431	0,6634	0,7906
prędkość	0,0000	0,0004	0,0000	0,0002	0,0000	0,0029	0,0000	0,0005	0,0001	0,0023

Tabela 8. Porównanie średnich wartości parametrów kinematycznych kroku biegowego między początkowym odcinkiem (brak zmęczenia), a odcinkiem końcowym (zmęczenie) w testach-biegach na 350 m i 500 m oraz porównanie tych samych faz względem siebie

Warunki	Faza podporowa [ms]			Faza lotu [ms]			Częstotliwość kroku [Hz]			Długość kroku [cm]			Prędkość [m/s]		
	Dystans [m]		Różnica [%]	Dystans [m]		Różnica [%]	Dystans [m]		Różnica [%]	Dystans [m]		Różnica [%]	Dystans [m]		Różnica [%]
	350	500		350	500		350	500		350	500		350	500	
Brak zmęczenia	120	126	4,6	131	143	9,2	3,99	3,73	-6,5	234	242	3,6	9,29	9,01	-3,0
Zmęczenie	134	158	17,4	138	146	5,2	3,68	3,30	-10,3	218	214	-1,8	8,01	7,06	-11,9
Różnica [%]	11,7	25,5	⊗	5,6	1,7	⊗	-7,7	-11,5	⊗	-6,8	-11,7	⊗	-13,8	-21,7	⊗

Ukazane w tabeli 8. zestawienia pozwalają głębiej wejrzeć w dynamikę zmian parametrów kinematycznych podczas badanych dystansów, ich czułość na zmęczenie generowane podczas zróżnicowanego czasu pracy. Podczas testu na 350 m zmianie

spowodowanej narastającym zmęczeniem uległ szereg parametrów kinematycznych biegu. Pomiar dziesięciu kroków w końcowej fazie (zmęczenie) wykazał wzrost średniego czasu kontaktu stopy z podłożem u badanych o 11,74% względem pomiaru dziesięciu kroków w fazie początkowej (brak zmęczenia). Średni czas lotu wydłużył się o 5,57%. Średnia częstotliwość kroku spadła o 7,69%. Spadek średniej długości kroku wyniósł 6,78%, a średnia prędkość spadła o 13,82%. W biegu na 500 m wzrost średniego czasu kontaktu stopy z podłożem wyniósł 25,48%. Średni czas lotu wydłużył się o 1,68%. Średnia częstotliwość kroku spadła o 11,47%. Średnia długość kroku u badanych zawodników skróciła się o 11,70%, natomiast spadek średniej prędkości wyniósł 21,70%. Różnica długości, a co za tym idzie, czas pokonania dystansu – $\bar{x} = 64,63$ s na 500 m oraz $\bar{x} = 40,98$ s na 350 m, warunkował różny czas pracy. Miał on wpływ na wyjściowy poziom parametrów kinematycznych biegu oraz stopień ich zmiany pod wpływem narastającego zmęczenia. Podczas pokonywania dystansu 500 m średnie wartości kinematyczne w początkowej fazie względem początkowej fazy biegu na 350 m zmieniały się następująco: czas kontaktu stopy był dłuższy o 4,58%, czas lotu był dłuższy o 9,23%, częstotliwość była mniejsza o 6,5%, długość kroku dłuższa o 3,63%, a prędkość mniejsza o 3%. Odmienna charakterystyka badanych dystansów generowała różny poziom ogólnego i lokalnego zmęczenia, który uwidocznił się w końcowej fazie biegu i tak: na 500 m względem 350 m czas kontaktu stopy był dłuższy o 17,44%, czas lotu był dłuższy o 5,20%, częstotliwość była mniejsza o 10,33%, długość kroku krótsza o 1,83%, a prędkość mniejsza o 11,87%.

Trzy kolejne tabele 9., 10. i 11. porównują poszczególne parametry kinematyczne kroku biegowego wykonanego w fazie początkowej (brak zmęczenia) i fazie końcowej (zmęczenie), zarówno w teście-biegu na 350 m, jak i teście-biegu na 500 m z parametrami uzyskanymi w biegu kontrolnym na 60 m (odcinek między 25 a 50 m biegu). Tabela 9. dotyczy porównania grupowego, czyli wszystkie kroki (20) w obu fazach biegów na 350 m i 500 m, z krokami biegowymi (10) wykonanymi podczas testu na 60 m. Musimy pamiętać, że parametrów kinematycznych kroku uzyskanych w teście na 60 m nie dzielimy na fazy: brak zmęczenia i na zmęczeniu. Wyraźnie daje się zauważyć brak jakichkolwiek różnic istotnych statystycznie między wykonanymi krokami we wszystkich pięciu parametrach. Istotność statystyczna wykazuje tylko częstotliwość kroku w kroku 3. i 7.

Tabela 9. Porównanie średnich wartości parametrów kinematycznych kroku biegowego początkowego odcinka (brak zmęczenia), końcowego odcinka (zmęczenie) testu-biegu na 350 m i 500 m oraz biegu na 60 m, NIR; prawdopodobieństwa dla testów post-hoc, $p < 0,05$ zaznaczono tłustym drukiem

Parametry kinematyczne	Kolejność kroku									
	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10
czas kontaktu	0,2224	0,1285	0,6678	0,8278	0,5426	0,2685	0,6036	0,9153	0,9073	0,3482
czas lotu	0,8596	0,2767	0,0558	0,9710	0,5966	0,5040	0,0857	0,5097	0,7821	0,7339
częstotliwość	0,2352	0,7420	0,0042	0,7703	0,1788	0,6775	0,0074	0,4786	0,8986	0,5457
długość kroku	0,1777	0,9583	0,1531	0,9962	0,3039	0,7906	0,3574	0,7189	0,4720	0,7870
prędkość	0,5375	0,6500	0,1641	0,7445	0,9016	0,9544	0,0514	0,7929	0,3976	0,7715

Z kolei w tabeli 10. mamy porównanie parametrów kinematycznych kroku biegowego uzyskanych w biegu na 60 m z biegiem na 350 m, z podziałem na dwie części biegu: początkową i końcową. Porównanie z fazą biegu bez zmęczenia pokazało istotne różnice w trzech parametrach: czas kontaktu stopy z podłożem, częstotliwość kroku oraz czas wykonania kroku. Odnosi się to do wszystkich dziesięciu kroków. Natomiast brak istotnych statystycznie różnic wykazał czas fazy lotu i długość kroku. Dotyczy to kroku 2., 4., 6. oraz 8–10. Z kolei wszystkie parametry porównane z fazą zawierającą oznaki zmęczenia wykazały istotną różnicę, poza długością kroku w kroku 1. i 3.

Tabela 11. pokazuje taką samą analizę, ale między testem-biegiem na 500 m i testem na 60 m. Zarówno w fazie początkowej, jak i fazie końcowej biegu na 500 m wszystkie parametry kinematyczne wykazały istotnie statystyczną różnicę w porównaniu do parametrów uzyskanych w sprincie na 60 m.

Tabela 12. przedstawia analizę wariancji dla powtarzanych pomiarów parametrów kinematycznych kroku biegowego. W przedstawionej analizie wariancji pomiary kinematyczne występują jako czynnik niezależny, a odcinek pomiarowy (OP), kolejność kroków (KK) oraz grupa zawodników (G) – jako czynnik zależny. Ocena zróżnicowania wartości średnich wyraźnie wskazuje, że wartości średnie poszczególnych parametrów kinematycznych kroku biegowego wykazują różnice istotne statystycznie w odcinkach pomiarowych: faza biegu – bez zmęczenia i faza biegu – zmęczenie. Brak istotnych różnic ww. parametrów występuje, gdy analizie poddamy kolejne kroki.

Tabela 12. Jednowymiarowe testy dla powtarzanych pomiarów: Parametryzacja z sigma-ograniczeniami, $p < 0,05$ zaznaczono tłustym drukiem

Efekt	OP		OP×G		KK		KK×G		OP×KK		OP×KK×G	
	F	p	F	p	F	p	F	p	F	p	F	p
czas kontaktu	179,80	0,0000	14,73	0,0002	1,50	0,1620	0,82	0,5991	0,46	0,9700	1,17	0,2931
czas lotu	37,88	0,0000	2,46	0,1135	0,45	0,9005	1,28	0,2579	0,64	0,8679	0,96	0,5050
częstotliwość	170,44	0,0000	4,11	0,0339	0,59	0,7983	1,68	0,1067	0,67	0,8338	0,86	0,6263
długość kroku	38,42	0,0000	3,11	0,0691	1,64	0,1183	0,56	0,8246	2,15	0,0062	1,72	0,0401
prędkość	163,58	0,0000	5,62	0,0127	1,33	0,2358	2,54	0,0127	1,17	0,2948	0,89	0,5959

Odcinek pomiarowy(OP) – brak zmęczenia lub na zmęczeniu
 Grupa (G) – test-bieg na 350 m lub test-bieg na 500 m
 Kolejność kroków (KK) – kroki wykonane w odcinku brak zmęczenia lub na zmęczeniu

Analiza wariancji pozwala również na określenie interakcji między poszczególnymi czynnikami i ich wpływu na wartość poszczególnych parametrów kinematycznych. W interakcji: odcinek pomiarowy (OP) a grupa zawodników (G): biegacze na 350 m i na 500 m, istotnej zmianie uległy wyniki trzech parametrów kinematycznych kroku biegowego: czas kontaktu stopy z podłożem, częstotliwość kroku oraz prędkość wykonania pojedynczego kroku. Z kolei, gdy przeanalizujemy interakcję zachodzącą między kolejnością kroków (KK) zarówno w początkowej części biegu, jak i w fazie końcowej, a przynależnością do testu-biegu: na 350 m a 500 m okazuje się, że nie ma istotnych różnic w czterech z pięciu parametrach kinematycznych. Jedyną istotną statystycznie różnicę wykazała prędkość wykonania pojedynczego kroku. Podobna sytuacja zaszła, gdy analizie poddano interakcje między odcinkiem pomiarowym (OP) a krokami wykonanymi w tych odcinkach (KK). Tam tylko długość kroku wykazała istotne zmiany. Gdy analizie poddano wartość zmian podstawowych parametrów kinematycznych między trzema grupami czynników: OP, KK i G, istotne zmiany zaszły również tylko w jednym parametrze – długości kroku.

Tabela 13. Charakterystyka poziomu stężenia mleczanu we krwi biegaczy na 400 m w teście-biegu na 350 m i 500 m, $p < 0,05$ zaznaczono tłustym drukiem

Cecha	Grupa 350 m, n= 6		Grupa 500 m, n= 5		Test t-Studenta	
	\bar{x}	s	\bar{x}	s	t	p
Czas biegu (s)	40,98	0,73	64,63	1,21	-40,17	0,0000
La spocz. (mmol/l)	1,64	0,54	2,03	0,37	-1,38	0,2013
Lapo rozgrzewce (mmol/l)	6,03	1,66	6,29	3,37	-0,17	0,8683
La spoczynkowe (mmol/l)	1,64	0,54	2,03	0,37	-1,38	0,2013
La po rozgrzewce (mmol/l)	6,03	1,66	6,29	3,37	-0,17	0,8683
La przed biegiem (mmol/l)	2,90	0,40	3,78	1,32	-1,57	0,1513
La w 1 min. Po biegu (mmol/l)	18,04	2,56	20,10	0,31	-1,78	0,1096
La w 3 min. Po biegu (mmol/l)	21,97	1,47	20,08	0,45	2,76	0,0223
La w 12 min. Po biegu (mmol/l)	21,59	2,94	19,37	0,78	1,63	0,1385
La w 20 min. Po biegu (mmol/l)	19,76	1,90	18,71	0,85	1,14	0,2845
La w 40 min. Po biegu (mmol/l)	8,15	2,20	12,10	5,44	-1,64	0,1357

Tabela 13. przedstawia przebieg zmian poziomu stężenia mleczanu we krwi zarówno w czasie rozgrzewki, jako czynności fizycznej bezpośrednio przygotowującej zawodników do wysiłku głównego testu-biegu na 350 m i 500 m, oraz w okresie po wykonaniu wysiłku. Pomiar stężenia mleczanu we krwi wykonano w 8 niezależnych czasowo okresach. Nie wykazano żadnych różnic między grupami biegaczy w poziomie stężenia mleczanu we krwi, zarówno w czasie rozgrzewki, jak również w pomiarach po zakończonym biegu, oprócz pomiaru wykonanego w 3. minucie po zakończonym wysiłku $p < 0,0223$. Najniższą różnicę między grupami w stężeniu mleczanów, wynosząca 0,26 mmol/l wykazano w pomiarze kończącym rozgrzewkę. Bezpośrednio po biegu różnica poziomu stężenia mleczanów między grupami sprinterów wynosiła 2,06 mmol/l, co stanowi 10,3% i nie była istotna statystycznie. Najwyższy poziom mleczanów zanotowano w grupie testu-biegu na 350 m, w 12. minucie po zakończonym wysiłku i wynosił on 21,97 mmol/l. Ta sama grupa biegaczy osiągnęła również najniższy poziom 8,15 mmol/l po 40 minutach od zakończenia biegu na 350 m. Był on wyższy w porównaniu do biegaczy na 500 m o 3,95 mmol/l i również nie wykazał statystycznie istotnej różnicy. W ciągu 40 min. od zakończenia obu testów-biegów na 350 m i 500 m poziom stężenia mleczanów we krwi obniżył się o 9,89 mmol/l w grupie 350-metrowców i 8 mmol/l w grupie sprinterów biegających 500 m.

Tabela 14. Korelacja porządku rang Spearmana (bez podziału na grupy) między poziomem stężenia mleczanu po biegu na 350 m i 500 m a wybranymi parametrami kinematycznymi testu biegu i budową somatyczną biegaczy na 400 m, współczynniki istotne na poziomie $p < 0,050$ zaznaczono tłustym drukiem

Cecha	[1]	[2]	[3]	[4]	[5]	[6]	[7]	[8]	[9]	[10]	[11]	[12]	[13]	[14]	[15]
Poziomu stężenia mleczanu we krwi															
La przed rozgrzewką [1]	–	0,55	-0,10	0,36	0,46	-0,81	-0,50	-0,37	-0,15	-0,60	-0,70	0,07	-0,19	-0,08	-0,13
La po rozgrzewce [2]	0,55	–	0,03	0,35	0,14	-0,52	-0,45	-0,53	-0,02	-0,39	-0,49	0,45	-0,31	0,00	-0,32
La przed biegiem [3]	-0,10	0,03	–	-0,05	0,10	0,14	-0,34	-0,14	0,27	-0,14	-0,39	-0,33	0,13	0,59	-0,36
La 1 min. Po biegu [4]	0,36	0,35	-0,05	–	-0,25	-0,27	-0,38	-0,34	0,07	-0,28	-0,31	0,62	0,41	0,07	0,30
La 3 min. Po biegu [5]	0,46	0,14	0,10	-0,25	–	-0,24	-0,14	-0,14	-0,31	-0,21	-0,55	-0,64	-0,30	-0,15	-0,24
La 12 min. Po biegu [6]	-0,81	-0,52	0,14	-0,27	-0,24	–	0,51	0,23	-0,15	0,42	0,33	-0,31	0,26	-0,10	0,28
La 20 min. Po biegu [7]	-0,50	-0,45	-0,34	-0,38	-0,14	0,51	–	0,68	-0,35	0,49	0,26	-0,06	-0,05	-0,54	0,64
La 40 min. Po biegu [8]	-0,37	-0,53	-0,14	-0,34	-0,14	0,23	0,68	–	0,06	0,27	0,33	-0,10	0,33	0,03	0,53
Parametry kinematyczne testu-biegu na 350 m i 500 m															
Długość kroku [9]	-0,15	-0,02	0,27	0,07	-0,31	-0,15	-0,35	0,06	–	-0,49	0,35	0,02	0,22	0,82	-0,52
Częstość kroku [10]	-0,60	-0,39	-0,14	-0,28	-0,21	0,42	0,49	0,27	-0,49	–	0,45	0,17	-0,16	-0,50	0,36
Prędk. wykon. kroku [11]	-0,70	-0,49	-0,39	-0,31	-0,55	0,33	0,26	0,33	0,35	0,45	–	0,16	0,05	0,06	-0,04
Budowa somatyczna															
Wiek [12]	0,07	0,45	-0,33	0,62	-0,64	-0,31	-0,06	-0,10	0,02	0,17	0,16	–	0,07	-0,14	0,29
Masa ciała [13]	-0,19	-0,31	0,13	0,41	-0,30	0,26	-0,05	0,33	0,22	-0,16	0,05	0,07	–	0,50	0,45
Wysokość ciała [14]	-0,08	0,00	0,59	0,07	-0,15	-0,10	-0,54	0,03	0,82	-0,50	0,06	-0,14	0,50	–	-0,47
BMI [15]	-0,13	-0,32	-0,36	0,30	-0,24	0,28	0,64	0,53	-0,52	0,36	-0,04	0,29	0,45	-0,47	–

Tabela 14. zawiera kompleksową analizę korelacji rang Spearmana bez podziału na grupy (wszyscy badani) między poziomem stężenia mleczanu po biegu na 350 m i 500 m, a wybranymi parametrami kinematycznymi testu-biegu i budową somatyczną sprinterów biegających na 400 m. Gdy analizie poddano zależności między poziomem stężenia mleczanów we krwi wykonanych w 8 pomiarach, tylko w dwóch wykazano istotną statystycznie zależność. Był to związek między poziomem spoczynkowym a wartością stężenia mleczanu we krwi mierzoną po 12. min. $r = -0,81$, oraz między pomiarem w 12. min. i 40 min., gdzie $r = 0,63$. Należy wspomnieć, że w 12. min. badani w obu grupach

osiągnęli najwyższe stężenie mleczanu we krwi. W zależności między podstawowymi parametrami kinematycznymi, zarówno testu-biegu na 350 m i 500 m tylko jeden parametr – a mianowicie prędkość wykonania pojedynczego kroku, wykazał istotną zależność ze stężeniem mleczanu we krwi w spoczynku $r = -0,70$. Z kolei, gdy przeanalizujemy zależności między budową somatyczną, a poziomem stężenia mleczanu we krwi, już trzy parametry wykazują istotną zależność. Dotyczy to wieku, który związany jest z poziomem mleczanów w krwi mierzonych bezpośrednio po biegu (1 min) na 350 m i 500 m oraz w 3. min, po zakończonym wysiłku (odpowiednio: $r = 0,62$ i $r = -0,64$). Wysoką zależność wykazało również BMI w stosunku do wartości mleczanu we krwi, mierzonym w 20. min. po biegu $r = 0,64$.

5. DYSKUSJA

Głównym zadaniem niniejszej pracy jest ocena kształtowania się podstawowych parametrów kinematycznych kroku biegowego oraz poziomu stężenia mleczanu we krwi podczas prób wysiłkowych na wyznaczonych odcinkach wytrzymałości specjalnej 350 m i 500 m, które mogą decydować o skuteczności biegu na 400 m.

5.1. Współzależność parametrów kinematycznych kroku biegowego w teście-biegu na 350 m i 500 m

Różnica długości między badanymi formami wytrzymałości specjalnej – biegiem na 350 m oraz biegiem na 500 m wynosi 150 m. Jest ona widoczna nie tylko ze względu na długość pokonanej drogi, ale również czas trwania wysiłku, który był średnio dłuższy o 23,65 s. Różnica ta wiąże się bezpośrednio z prędkością przemieszczania się, która z kolei stanowi wypadkową długości i częstotliwości kroków. Wszystkie te czynniki powinny wskazywać na wyraźną prawidłowość, że oba dystanse różnią się między sobą znacząco pod względem kinematyki biegu. Potwierdzają to istotne statystycznie różnice, które ujawniły się w średniej częstotliwości kroku na poziomie $p = 0,0007$, co daje różnicę aż 11,75%, oraz średniej prędkości kroku, która wykazała różnicę $p = 0,0123$.

Pomimo krótszego czasu przebiegnięcia odcinka 350 m w porównaniu do 500 m, nie zanotowano istotnych statystycznie różnic w średniej długości kroku. Różnica wyniosła poniżej jednego procenta (0,44%). Można przypuszczać, że jednym z elementów, który mógł mieć wpływ na tę prawidłowość, jest podobna wysokość ciała oraz podobna długość kończyny dolnej badanych. Te parametry budowy somatycznej są czynnikami, które bezpośrednio wpływają na długość kroku, szczególnie w sprintach (Salo 2011). Innym czynnikiem decydującym o braku różnicy może być podobny poziom siły kończyn dolnych badanych, która również odpowiedzialna jest za generowanie długości kroku. Nie wolno także pominąć umiejętności odpowiedniego rozkładu sił w kontekście radzenia sobie z narastającym zmęczeniem (Hirvonen i wsp. 1987), która stanowi wyróżnik u wysokiej klasy biegaczy. Dodatkowym czynnikiem wpływającym na ogólny obraz parametru długości kroku zapewne był fakt, że w przypadku 350 m zmiana długości kroku między

początkową, a końcową fazą biegu była znacznie mniejsza i wyniosła 6,8%, gdy w przypadku 500 m, różnica ta wyniosła 11,7%. Na dłuższym dystansie spadek długości kroku spowodowany zmęczeniem, skompensowany został dłuższym krokiem w początkowej fazie biegu, wynikającym z mniejszej częstotliwości, a co za tym idzie, swobodniejszym i „pełniejszym” krokiem biegowym.

Dla lepszego zrozumienia kształtowania się kinematyki biegu w czasie pokonywania zróżnicowanych odcinków wytrzymałości specjalnej, porównano je z wartościami uzyskanymi przez badanych w biegu na 60 m. Należy zauważyć, że tak krótki dystans sprinterski w stosunku do 350 m i 500 m charakteryzował się wyższymi wartościami parametrów kinematycznych, co bez wątplenia wynikało z krótszego czasu wysiłku oraz ogólnego, większego poziomu dynamiki ruchu (Maćkała i wsp. 2017, Maćkała i wsp 2019). Jedynym parametrem w tym biegu, którego poziom był niższy, niż w początkowych fazach biegów na 350 m i 500 m to długość kroku. Jest to efekt zwiększenia częstotliwości, a co za tym idzie, skrócenie czasu fazy lotu i fazy podporowej. W przypadku tak krótkiego dystansu jak 60 m, jego energetyka zabezpieczana jest przez procesy metaboliczne z reakcji fosfagenowych opartych na beztlenowej drodze resyntezy ATP, które swoją wydajnością u wysoko wytrenowanych zawodników pozwalają znacznie ograniczyć efekt zmęczenia (Weyand i wsp. 1993). Dzięki temu sprinter jest w stanie zastosować użytkową technikę biegu, która w krótkim czasie pracy (6–7 s) jest najbardziej wydajna. Zwiększenie częstotliwości zawsze wiąże się ze wzrostem wydatku energetycznego, który w przypadku dystansów opartych na resyntezie ATP z glikolizy beztlenowej, musi być utrzymany na odpowiednim poziomie. Zarówno w biegu na 350 m i 500 m, kluczem do pokonania ich w jak najlepszym czasie jest ekonomizacja ruchu i dostosowanie go do przewidywanego czasu pracy – w tych przypadkach 40,98 s ($\pm 0,73$) i 64,63 s ($\pm 1,21$). Podsumowując, można stwierdzić, że skrócenie kroku biegowego obserwowane na dystansie 60 m, było wynikiem zastosowania odmiennej techniki biegu, która na tym dystansie jest bardziej efektywna, jednak nie sprawdziłaby się w przypadku dłuższych odcinków. Polega ona na zwiększeniu częstotliwości powodującej skrócenie czasu lotu, czyli krótszą fazę przenoszenia, mającą bezpośredni wpływ na długość kroku (Maćkała 2007, Maćkała i wsp. 2019).

5.2. Porównanie parametrów kinematycznych poszczególnych odcinków wewnątrz każdego z testów-biegów na 350 m i 500 m

Jak wspomniano w rozdziale opisującym metody badawcze, w każdym ze zróżnicowanych dystansów wytrzymałości specjalnej (350 m i 500 m), pomiar podstawowych parametrów kinematycznych kroku biegowego wykonano na dwóch 50-metrowych odcinkach. Pierwszy z nich to początkowa faza biegu, gdzie nie manifestuje się jeszcze zmęczenie, drugi to faza końcowa każdego z biegów, gdzie zmęczenie wyraźnie wpływa na dynamikę biegu (wysiłku). Dla lepszego zobrazowania zależności między poszczególnymi parametrami kroku biegowego, w poszczególnych biegach i w poszczególnych jego fazach, do szczegółowej analizy wybrano odcinki pomiarowe, w których zawodnicy wykonali 10 pełnych kroków biegowych., tj. ok. 25 m.

Analiza porównawcza poszczególnych odcinków wewnątrz każdego z testów-biegów wykazała duże różnice w wartościach poszczególnych parametrów kinematycznych kroku. W teście-biegu na 350 m wyraźnie widoczne były istotne statystycznie różnice między początkową, a końcową fazą biegu w czterech z pięciu badanych parametrach kinematycznych. Czas kontaktu stopy z podłożem w początkowej fazie biegu kształtowała się między 0,115–0,122 s, a na końcowym odcinku był na poziomie 0,131–0,140, czyli zwiększył się o ok. 0,010 s. Wraz ze zmianą czasu fazy podporowej nastąpiła zmiana w częstotliwości kroku, która zmniejszyła się o ok. 0,30 Hz w końcowej fazie biegu, w porównaniu do początkowej, gdzie była na poziomie ok. 4,0 Hz. Nie można tych danych bezpośrednio porównać z danymi zmierzonymi przy użyciu innych metod badawczych, aczkolwiek wcześniejsze analizy biegu na 400 m wykazują podobne trendy, pokazujące że w drugiej połowie dystansu wartości ww. parametrów wyraźnie obniżają swoją wartość (Gajer i wsp. 2007, Hanon i Gajer 2009, Grgić i wsp. 2019).

Wraz z przebiegniętym dystansem, a tym samym narastaniem zmęczenia, redukcji uległa długość kroku. W początkowej fazie biegu kształtowała się ona wysoko powyżej 2,30 m, a na końcowym odcinku nie przekroczyła 2,20 m. Krok skrócił się od 15 do 20 cm. Wydaje się, że zmęczenie również wpłynęło na zmianę prędkości wykonania pojedynczego kroku biegowego, która obniżyła się w końcowej fazie biegu o ok. 1,30 m/s i kształtowała się między 7,72 m/s a 8,20 m/s, w zależności od kroku. Podobne zależności wystąpiły w analizie biegu na 400 m (Graubner i Nixdorf 2011, Grgić i wsp. 2019). Zmianie nie uległ czas fazy

lotu, z niewielką tendencją do jej wydłużenia w końcówce biegu. Może się to wydawać zaskoczeniem, ponieważ zgodnie z założeniem Gundlacha (1978), gdy długość kroku ulega redukcji, to powinno nastąpić również skrócenie fazy lotu. Tak się jednak nie stało.

Jeszcze większe zmiany w wartościach parametrów kinematycznych zaszły między fazami biegu w teście na 500 m. Tu również uległo zmianie cztery parametry, takie same jak w biegu na 350 m. Czas kontaktu stopy z podłożem wydłużył się średnio z 0,12 s na początku biegu do 0,157 s w końcowej fazie. Był tym samym najbardziej podatnym na zmiany parametrem kinematycznym biegu – w przypadku 350 m wydłużył się średnio o 11,7%, natomiast w biegu na 500 m aż o 25,5%. Z analiz biomechanicznych można wnioskować, że dzieje się tak, ponieważ największa aktywność mięśni kończyny dolnej ma miejsce tuż przed przewidywanym zetknięciem z podłożem oraz na początku zetknięcia. Jednocześnie w początkowym okresie zetknięcia się stopy z podłożem maleje energia wskutek hamowania oraz spadku prędkości (Salo 2011). Część energii zmagazynowanej w tkankach kończyny dolnej zostaje oddana, przyczyniając się do uniesienia środka ciężkości ciała i przyrostu prędkości, jednak to czynnie kurczące się mięśnie muszą wykonać większość pracy (Grimshaw 2010). W przypadku kiedy jest ona zaburzona wskutek wzrastającego poziomu metabolitów, wydłuża się czas całej fazy podporowej.

Podobnej procentowej redukcji uległa prędkość wykonania pojedynczego kroku – 21,70%, tym samym spadła z 9,01 m/s na początku testu-biegu do 7,06 m/s na końcu. Częstotliwość i długość kroku również zredukowały swoje wartości z początkowej fazy do końcowej odpowiednio o 11,80% i 11,05% (czyli z 3,99 do 3,72 Hz oraz z 241,98 do 217,67 cm). Z kolei czas fazy lotu zarówno w fazie biegu bez zmęczenia, jak i w fazie ze zmęczeniem pozostał niezmienny, podobnie jak w biegu na 350 m.

5.3. Porównanie kinematyki kroku biegowego na odcinku brak zmęczenia i ze zmęczeniem między testem-biegiem na 350 m i 500 m

W tej analizie porównane zostaną ze sobą wartości parametrów kinematycznych odcinków charakteryzujących się brakiem zmęczenia na dystansach 350 m i 500 m, jak również parametry odcinków, na których zmęczenie zostało zaobserwowane. Podobnie jak w poprzednich analizach, w obu przypadkach daje się zauważać wyraźne trendy.

Porównując fazy początkowe 350 m i 500 m, obserwujemy tę samą prawidłowość dotyczącą długości kroku, jaką odnotowaliśmy wcześniej w kontekście biegu na 60 m, aczkolwiek w mniejszej skali. W biegu na 350 m długość kroku jest krótsza, niż w biegu na 500 m. Tutaj również kluczowym czynnikiem wydaje się długość dystansu i przewidywanego czasu pracy, a co za tym idzie, większe zaangażowanie energetyczne manifestujące się zwiększeniem częstotliwości kroku, która wymusza jednocześnie jego skrócenie. Analiza statystyczna porównująca średnie wartości kinematyczne kroku biegowego między początkowymi fazami badanych dystansów wykazała istotną statystycznie różnicę w częstotliwości kroku, która wynosiła średnio 3,99 Hz w biegu na 350 m i 3,73 Hz w biegu na 500 m. W analogicznym etapie biegu (między 50 m a 100 m) rekordzista świata na 400 m podczas bicia rekordu uzyskał częstotliwość na poziomie 3,94 Hz (Pollitt 2017, Yamamoto 2016), co pokazują że pod tym względem dystans 350 m jest bardziej zbliżony do biegu na 400 m, niż dystans 500 m. Wydaje się, że skoro czynnikiem różnicującym oba testy-biegi był parametr częstotliwości kroku, to na nim powinno skupić się podczas porównywania tych dystansów do konkurencji docelowej, jaką jest bieg na 400 m. Pozostałe parametry: czas kontaktu i prędkość nie wykazały istotnej statystycznie różnicy. Świadczy to o tym, że mimo odmiennej długości pokonywanych dystansów, wzorzec ruchowy techniki biegu pozostał w tych elementach niezmienny i był na optymalnym dla biegów sprinterskich wysokim poziomie.

Porównanie końcowych faz biegu w obu testach pokazało istotne statystycznie różnice w trzech parametrach: czas kontaktu stopy z podłożem, częstotliwość kroku oraz czas wykonania kroku. Wyraźnie widać, że zaburzenia w parametrach kinematycznych spowodowane narastającym zmęczeniem bardziej objawiły się w teście-biegu na dystansie 500 m. Znacząco wpływa na to fakt, że według klasyfikacji bioenergetyki wysiłków, bieg na 350 m – czas trwania 40,98 s ($\pm 0,73$ s) – zakwalifikować można do wysiłków beztlenowych mocy glikolitycznej, natomiast bieg na 500 m – czas trwania 64,63 s ($\pm 1,21$ s) – jako wysiłek beztlenowy pojemności glikolitycznej (Borkowski 2003). W pierwszym przypadku wydajność procesów opartych na resyntezie ATP z glikolizy beztlenowej pozostaje przez większą część trwania wysiłku na względnie wysokim poziomie. W drugim, obecność jonów wodorowych (H^+) ogranicza zdolność do kontynuowania pracy mięśni z dużą intensywnością i w końcowej fazie biegu znacząco wpływa na mechanizm

pobudzenie – skurcz, zaburzając tym samym dynamikę kroku biegowego. Główną rolę w dostarczaniu energii dla pracujących mięśni zaczynają wówczas odgrywać procesy tlenowe (Hubner-Woźniak 2000).

Istotna statystycznie różnica częstotliwości kroku, którą zaobserwowano w końcowych fazach testów wydaje się wynikać z faktu, że w miarę narastającego zmęczenia zwiększa się moment bezwładności kończyny, spowodowany zmniejszeniem ugięcia stawów biodrowego i kolanowego, co w efekcie prowadzi do wydłużenia przenoszenia (Maćkała 2007). Podczas testu-biegu na 350 m średnia częstotliwość kroku spadła z poziomu 3,99 Hz do poziomu 3,68 Hz, czyli o 7,7%, natomiast w teście-biegu na 500 m spadek z 3,73 Hz do 3,30 Hz wyniósł aż 11,5%. Porównując te wartości do częstotliwości podczas rekordowego biegu na 400 m, spadek z poziomu 3,94 Hz do 3,36 Hz, a więc o 14,72% (Pollitt 2017, Yamamoto 2016) widzimy, że mimo zbliżonej wartości częstotliwości w pierwszej fazie na dystansie 350 m do biegu na 400 m, to bieg na 500 m pod wpływem spadku wartości częstotliwości jest bliższy tym notowanym na dystansie docelowym – 400 m.

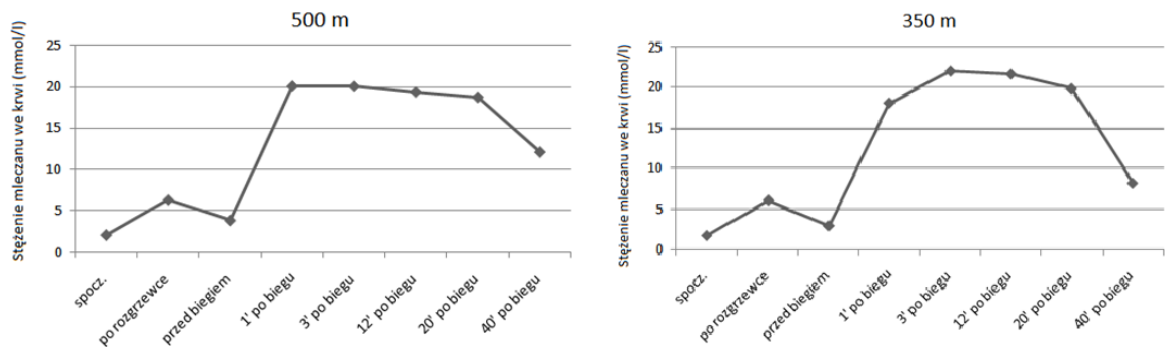
Podobna sytuacja ma miejsce z kolejnym parametrem kinematycznym kroku biegowego, który wykazał istotną statystycznie różnicę, mianowicie prędkością wykonywanego kroku. W tym przypadku dystans 500 m wykazał średni poziom obniżenia tego parametru o 21,7%, a dystans 350 m o 13,8%. Pozwala to wysnuć wniosek, że dystans 350 m pod względem dynamiki ruchu i techniki biegu jest bardziej zbliżony do dystansu 400 m, jednak to dystans 500 m generuje bliższy mu wydatek energetyczny, którego następstwem jest zmęczenie i obniżenie parametrów kinematycznych w końcowej fazie biegu.

Najmniej podatnym na zmiany parametrem kinematycznym kroku biegowego w narastającym zmęczeniu okazał się czas lotu. Wydaje się, że jest to następstwem kompensacji spadku mocy generowanej na odbiciu przez równoczesne zmniejszenie zakresu ruchów w stawach kończyny dolnej. W efekcie dostrzegamy zależność, że im bardziej spada prędkość biegu, tym bardziej skraca się krok. Finalny bilans czasu spędzonego w powietrzu natomiast nie zmienia się.

5.4. Stężenie mleczanów we krwi w zróżnicowanych formach wytrzymałości specjalnej

Bieg na 400 m jest wysiłkiem, podczas którego szybkość reakcji metabolicznych prowadzi do zaburzenia równowagi kwasowo-zasadowej organizmu poprzez wzrost stężenia wolnych jonów wodoru (H^+). Powoduje to kwasicę w organizmie i jest główną przyczyną zmęczenia podczas trwania wysiłku (Hanon 2009). Produkcja energii z procesów beztlenowych (zarówno glikoliza beztlenowa jak i procesy fosfagenowe [PCr]) stanowi 57–65% całkowitych potrzeb energetycznych podczas biegu na 400 m (Duffield 2005, Spencer 2001, Zouhal 2010), a wśród najlepiej wytrenowanych zawodników może wynieść nawet 75% (Newsholme 1992). Procesy beztlenowe są najbardziej dominujące w pierwszej połowie dystansu, natomiast procesy tlenowe w drugiej części biegu. Po przebiegnięciu 400 m stężenie mleczanu we krwi może wzrosnąć do ponad 20 mmol/l (Lacour 1990), a pH krwi spaść do 7,00 (Hanon 2010).

W przeprowadzonym eksperymencie podjęto próbę określenia stężenia mleczanów we krwi w dwóch zróżnicowanych formach wytrzymałości specjalnej – biegu na 350 m i biegu na 500 m. Pomiar stężenia mleczanu w osoczu miał miejsce w okresie przed podjęciem aktywności, po rozgrzewce, bezpośrednio przed próbą, oraz w kilku przedziałach czasowych: w 3., 12., 20. i 40. minucie od zakończenia testu-biegu (ryc. 3). Analiza zebranego materiału dotyczącego pomiaru mleczanu we krwi w obu grupach wykazała istotną statystycznie różnicę w pomiarze oznaczonym w 3. minucie po biegu. Według Hirvonen (1987) oraz Górskiego (2019), największe jego stężenie odnotowywane jest właśnie w 2–3 minucie po zakończeniu próby wysiłkowej i wykorzystane może być do oceny zaangażowania procesu glikolizy beztlenowej do produkcji energii dla pracy mięśni. Średnia wartość maksymalnego zakwaszenia wyniosła odpowiednio 20,10 mmol/l dla grupy biorącej udział w biegu na 500 m i 21,97 mmol/l dla grupy 350 m, tym samym różnica między obydwooma dystansami wyniosła prawie 2 mmol/l. Wynika to z faktu, że największa szybkość powstawania kwasu mlekowego podczas glikolizy beztlenowej odnotowuje się podczas pracy z submaksymalną intensywnością trwającą między 30 a 40 sekund (Szmatlan-Gabryś 2005). Moc procesów metabolicznych podczas glikolizy beztlenowej jest natomiast wyznaczana szybkością nagromadzenia mleczanu (Hermansen 1981, Hermansen, Stensvold 1972).



Ryc. 3. Stężenie mleczanu podczas testu-biegu na 350 (n = 6) m i 500 m (n = 5).

Vilmi (2016) przebadał równowagę kwasowo-zasadową po biegu na 400 m u zawodników na poziomie krajowym (n = 8, 18–24 lata), o rekordach życiowych na poziomie $49,49 \pm 1,84$ s. Czas uzyskany podczas próby wyniósł średnio $52,1 \pm 2,1$ s. Po próbie największe zakwaszenie odnotowano w 9. minucie po wysiłku, a wyniosło ono $17,4 \pm 1,8$ mmol/l. Wcześniejsze badania wykazywały maksymalny poziom mleczanu we krwi po pokonaniu dystansu 400 m od 13,5 do 22,0 mmol/l (Bret 2013, Saraslanidis 2011, Hanon 2010, Reis 2004, Hill 1999, Nummela 1995, Medbo 1985, Ohkuwa 1984, Hill 1999). Natomiast u wysokiej klasy biegacza o rekordzie życiowym na poziomie 45,5 s zbadano poziom stężenia krwi po biegu na poziomie 25,0 mmol/l (Kindermann 1977).

Szereg różnic w stężeniu mleczanów odnotowany został także w dynamice wzrostu stężenia kwasu mlekowego we krwi bezpośrednio po wysiłku oraz tempie jego eliminacji w okresie restytucji. Bezpośrednio po biegu (1. minuta), na dystansie 500 m poziom stężenia mleczanu we krwi był niemal identyczny w stosunku do maksymalnej wartości osiągniętej w 3. minucie. W biegu na 350 m początkowy poziom zakwaszenia plasował się na zauważalnie niższym poziomie, jednak dynamika jego wzrostu była odpowiednio większa i ostatecznie wzrosła prawie o 4 mmol/l, osiągając wartość maksymalną. Podczas wydłużonego czasu pracy – 64,63 s dla dystansu 500 m względem 40,98 s dla dystansu 350 m, znacząco spada udział procesów glikolizy beztlenowej (która swój szczyt osiąga około 40. sekundy trwania wysiłku) na rzecz wzrostu systemu energetycznego opartego na metabolizmie tlenowym (Ramsbottom 1994). Manifestuje się to oczywistym spadkiem

mocy i prędkości. Wynikają z tego również różnice w maksymalnych wartościach zakwaszenia. Dodatkowym czynnikiem może być też różny stopień wytrenowania i poziomu sportowego zawodników, a co za tym idzie, wielkości udziału procesu glikolizy beztlenowej w produkcji energii do pracy mięśni. Newsholme (1992) i Arcelli (2008) szacują, że procentowy udział glikolizy beztlenowej w produkcji energii u światowej klasy sprinterów na 400 m wynosi 62,5%, procesy tlenowe stanowią 25%, a 12,5% to udział produkcji ATP z forsokreatyny. Należy przypuszczać, że pomimo braku w przeprowadzonym eksperymencie takiego podziału, procentowy udział glikolizy beztlenowej uzyskanej w teście-biegu na 350 m będzie zbliżony do pomiarów uzyskanych przez najlepszych sprinterów w biegu na 400 m. Z kolei bieg na 500 m powinien charakteryzować się większymi proporcjami procesów tlenowych, przekraczających prawdopodobnie poziom 30%. Warto zaznaczyć, że wartości te mogą ulec zmianie, ponieważ są również uzależnione od poziomu sportowego. Vilmi (2016) szacuje, że u wolniejszych biegaczy udział ten może mieć znacznie odmienne proporcje, np. u zawodników zbliżonych do poziomu 50 s na 400 m może kształtować się następująco: 10% – procesy fosfagenowe oparte na beztlenowej drodze resyntezy ATP, 50% – glikoliza beztlenowa oraz 40% – procesy tlenowe. Warto zaznaczyć, że zawodnicy biorący udział w badaniach reprezentowali bardzo wysoki poziom, a wielu z nich również poziom światowy.

Wiele badań przeprowadzonych na biegaczach dystansów od 100 do 1500 m (Duffield 2004, 2005; Spencer 1996, 2001; Gupta 1999) koncentrowało się na ocenie udziału tlenowego i beztlenowego systemu energetycznego w poszczególnych konkurencjach w oparciu o metodę monitorowania akumulacji deficytu tlenowego (AOD) (Medbo 1988). Zouhal i wsp. (2010) przebadali przy użyciu tej metody grupę 400-metrowców ($n = 6$) o rekordach życiowych $52,04 \pm 0,9$ s, którzy podczas biegu-testu uzyskali wyniki $54,95 \pm 0,72$ s, a maksymalne zakwaszenie po biegu wyniosło $17,3 \pm 1,5$ mmol/l. Wartość deficytu tlenowego uzyskana przez Zouhala w badaniu, opartym na pojedynczym teście-biegu na określonym dystansie była wyższa od tych zaobserwowanych w innych badaniach z wykorzystaniem testów na bieżni (Duffield 2003, 2005) lub bieżni stacjonarnej (Nummela 1995, Spencer 2001) i wyniosła 62,5%. Różnice te wynikają z faktu, że testy maksymalnego obciążenia z ograniczonym czasem trwania lub testy o stałej intensywności realizowane do wyczerpania, nie są w stanie zasymulować wysiłku odpowiadającego pokonaniu 400 m

w warunkach startowych (Nummela 1995, Spencer 2001, Spencer 1996). Tym bardziej, że biegu na 400 m nie można traktować jako wysiłku o jednostajnej intensywności. Nie jest to również wysiłek, w którym dystans pokonuje się z maksymalną prędkością, ponieważ nawet najlepsi zawodnicy nie osiągają jej na pierwszych 100 czy 200 m (Harman 2002). Podobne wnioski można wysunąć po analizie badanych form wytrzymałości specjalnej – testów-biegów na 350 m i 500 m. Szczególne uwarunkowania ma test-bieg na 350 m, który z założenia przebiegany jest z wyższą średnią prędkością, aniżeli klasyczne 400 m. Wpływ na to przede wszystkim ma wartość częstotliwości kroku, która jest wyższa aniżeli w biegu na jedno okrążenie. Długość kroku pozostaje natomiast na podobnym poziomie. Z kolei bieg na 500 m pokonywany jest bardziej „rytmowo”, tak aby spadek prędkości biegu na ostatnich 100–150 m przebiegał łagodnie w porównaniu do prędkości uzyskanej w pierwszej części dystansu. Podsumowując, zarówno bieg na 350 m, 500 m czy klasyczne 400 m są to wysiłki o zmiennej krzywej przebiegu prędkości biegowej, a ich specyfika wiąże się z większym zaangażowaniem mięśniowym, niż w innych aktywnościach fizycznych czy testach np. teście wingate lub biegu na bieżni mechanicznej.

Rezultaty w teście-biegu na 400 m przeprowadzonym przez Zouhal i wsp. (2010) były ściśle skorelowane z udziałem przemian beztlenowych, wyliczonym za pośrednictwem metody AOD. Dlatego zdolność do korzystania z pojemności beztlenowej wydaje się być bezpośrednio powiązana z wynikiem sportowym podczas biegów z wysoką intensywnością, ponieważ szybkość z jaką sportowiec potrafi dostarczyć ATP ze źródeł beztlenowych w tym rodzaju wysiłku wpływa na moc wyjściową oraz tym samym na utrzymywanie prędkości (Hirvonen 1987, Lacour 1990). Podobne założenia przyświecały badaniu nad dystansami 350 i 500 m w celu kompleksowego określenia ich przydatności w kształtowaniu wytrzymałości specjalnej w biegu na 400 m, a tym samym poprawy skuteczności (czasu) na tym dystansie (Živanović i wsp. 2011).

5.5. Analiza kinematyki biegu jako wyznacznik intensywności wytrzymałości specjalnej w treningu biegu na 400 m

Kinematyka jako jeden z elementów biomechaniki dostarcza informacji o formie i charakterze ruchu, czyli technice wykonania danej struktury ruchu oraz interakcji pomiędzy określającymi tę technikę wielkościami. Korzystając z tych zależności, można określić, które czynniki wpływają na zaburzenie skuteczności ruchu – obniżenie poziomej prędkości przemieszczania. W powyższym eksperymencie kontroli w tym zakresie poddano biegi na 350 m i 500 m, wykorzystywane jako środki kształtujące wytrzymałość specjalną biegaczy na 400 m. Osiągnięcie wartościowych wyników sportowych w tej konkurencji lekkoatletycznej uzależnione jest przede wszystkim od możliwości układu nerwowo-mięśniowego zawodnika do rozwijania i utrzymania jak najwyższej średniej prędkości biegowej na całym dystansie (Bruggemann i Gład 1990, Ferroi i wsp. 1999, Sugiyama i wsp. 2000, Shen 2000), czyli rozwinięcia wspomnianej już, optymalnej wytrzymałości specjalnej. W związku z tym, należy dobrać w treningu takie środki treningowe, które będą odpowiednio ją kształtować. Jednym z najczęściej stosowanych w tym celu modeli jest bazowanie na odcinkach biegowych 300 m, 500 m czy 600 m (Otte i Hunt 2000, Saraslanidis i wsp. 2009). Rzadko stosuje się dystans 350 m, ze względu na to, że uważa się go za dystans zbyt bliski 400 m, czyli dystansowi startowemu. Wymagania współczesnego treningu na 400 m, wymusiły poszukiwanie coraz bardziej skuteczniejszych metod treningowych.

W związku z tym postanowiono bliżej „przyjrzeć się” biegowi na 350 m, jako potencjalnemu dystansowi do kształtowania wytrzymałości specjalnej, a przede wszystkim, określenia skuteczniejszej strategii biegu na 400 m (Otte i Hunt 2000, Iskra 2000, Saraslanidis i wsp. 2009). Aby ocena była pełniejsza, porównano ten dystans z biegiem na 500 m. Za cel analizy i porównania wybrano przebieg zmienności prędkości biegu na poszczególnych dystansach wraz z kształtującymi tą prędkość parametrami kinematycznymi. Już wcześniej wykazano, że długość i częstotliwość kroku, czas fazy podporowej i czas fazy lotu są podstawowymi parametrami wyznaczającymi prędkość biegową w biegach sprinterskich. Nie wykazano natomiast, jakim zmianom ulegają ww. parametry kinematyczne na całym dystansie 400 m, a przede wszystkim na dystansie 350 m i 500 m, jako potencjalnych wyznaczników poprawy wytrzymałości specjalnej.

Na podstawie analizy wariancji, a szczególnie interakcji między poszczególnymi czynnikami, oceniono zmianę wartości poszczególnych parametrów kinematycznych, a tym samym podjęto próbę określenia ich skuteczności w każdym z biegów. W interakcji udział wzięły trzy czynniki. Pierwszym czynnikiem był odcinek pomiarowy (OP), czyli faza biegu, gdzie był zauważalny brak zmęczenia (początek biegu) lub zmęczenie (końcowe metry biegu). Drugi czynnik to określenie grupy (G), czyli podział badanych według dwóch dystansów – 350 m lub 500 m. Ostatnim czynnikiem w interakcji były kroki (KK), a w szczególności ich kolejność od 1 do 10, wykonane w odcinkach z brakiem oznak zmęczenia lub z zauważalnym zmęczeniem. Zaobserwowano szereg zmian, na przykład w interakcji: odcinek pomiarowy (OP) a grupa zawodników: biegacze na 350 m i na 500 m, istotnej statystycznie zmianie uległ czas kontaktu stopy z podłożem, częstotliwość kroku oraz prędkość wykonania pojedynczego kroku. Na podstawie wcześniejszej analizy wiemy, że zmiana ta wiązała się z redukcją wartości ww. parametrów kinematycznych kroku biegowego, szczególnie na odcinku manifestującym oznaki zmęczenia w biegu na 500 m. Wcześniejsze zapisy określiły nam, że przyczyną tego zjawiska jest narastające zmęczenie i wynikające z niego konsekwencje. Dla praktyki sportowej oznacza to, że aby dobrać właściwy odcinek do kształtowania wytrzymałości specjalnej, musi się on charakteryzować podobnymi wartościami lub wyższymi, aniżeli dystans startowy np. 400 m. Z kolei, gdy przeanalizujemy interakcję zachodzącą między kolejnością kroków (KK) od 1 do 10, bez względu na fazę biegu oraz dystans, parametry kinematyczne (cztery) nie wykazują między sobą różnic. To znaczy, że np. w fazie końcowej biegu na 500 m, poszczególne parametry kinematyczne, przypisane do kolejnych kroków, nie wykazały istotnych zmian wartości. Jedyną istotną statystycznie różnicę wykazała prędkość wykonania pojedynczego kroku. Oznacza to, że wartość poszczególnych parametrów ściśle jest przypisana do fazy biegu i dystansu. W pozostałych interakcjach między odcinkiem a krokami wykonanymi w tych odcinkach oraz między trzema grupami czynników ($OP \times KK \times G$) istotne zmiany zaszły tylko w jednym parametrze – długość kroku. Informacja ta oznacza, że aby zachować podobną strukturę kroku biegowego podczas wytrzymałości specjalnej w porównaniu do dystansu startowego (400 m), dobór odcinka jest kluczowym elementem. Wraz z wydłużeniem dystansu wytrzymałości specjalnej, następuje istotna, zazwyczaj niekorzystana zmiana (redukcja)

w długości kroku. Jest to negatywne zjawisko, ponieważ istnieją przesłanki, że niewłaściwy stereotyp ruchowy wytworzony podczas treningu zostanie przeniesiony na start w zawodach na konkretnym dystansie.

W konkurencjach lekkoatletycznych, szczególnie w biegu na 400 m program przygotowania kondycyjnego musi być opracowany w celu osiągnięcia najlepszych wyników sportowych (Rademaker 1982, Warden, 1988, Iskra 2005). Na podstawie powyższej analizy można wnioskować, że jest to możliwe poprzez odpowiednie zachowanie wartości parametrów kinematycznych kroku biegowego na dystansach wyznaczonych do kształtowania wytrzymałości specjalnej. Równie ważne jest, aby poznać zaangażowanie poszczególnych systemów energetycznych w danym odcinku wytrzymałości specjalnej w celu zoptymalizowania metabolicznych procesów wytwarzania ATP. Wiedza w tym zakresie pozwala dobrać najbardziej odpowiednie metody treningowe w procesie przygotowawczym, przedstartowym (BPS) oraz startowym.

6. WNIOSKI – PRAKTYCZNA APLIKACJA

Wyniki uzyskane w niniejszym badaniu potwierdzają słuszność przyjętej koncepcji zastosowania środków treningowych używanych do kształtowania wytrzymałości specjalnej jako form testów dających wgląd w dynamikę zmian parametrów kinematycznych kroku biegowego. Warunki symulowanego współzawodnictwa pozwoliły z dużą wiarygodnością określić, który z zastosowanych dystansów – 350 m czy 500 m, i w jakiej fazie, pełniej odwzorowuje kinematykę oraz procesy energetyczne zachodzące podczas rywalizacji sportowej na dystansie 400 m. Bezdyskusyjnym jest, że każda z zastosowanych form wytrzymałości specjalnej ma swoje atuty i zasadnym jest jej wykorzystywanie w profesjonalnym treningu. Jednakże badanie to pozwoliło rzucić lepsze światło, które parametry kinematyczne w poszczególnych etapach biegu powinny zwrócić uwagę badaczy oraz szkoleniowców. Jednocześnie pozwala odpowiedzieć na pytanie, jak bardzo stymulujące i zasadne jest używanie zróżnicowanych form wytrzymałości specjalnej na poszczególnych etapach przygotowania kondycyjnego zawodników. Sformułowano następujące wnioski:

1. Obie formy wytrzymałości specjalnej wykazały szereg różnic, w tym istotnych statystycznie, wynikających z odmiennego czasu pracy. Część parametrów kinematycznych, takich jak częstotliwość kroku czy prędkość biegu, potwierdziło wcześniejsze obserwacje badaczy o swojej dynamice względem długości pokonywanego dystansu, jednak niektóre, jak na przykład długość kroku, wymagały wnikliwszej analizy poszczególnych faz biegów w celu zrozumienia przebiegu ich zmienności. Tym samym zaobserwowano zależność wśród badanych dystansów: 500 m, 350 m oraz 60 m (ten ostatni zastosowany jako wyznacznik kształtowania parametrów kinematycznych przy maksymalnej prędkości), że im dłuższy dystans, tym dłuższy krok biegowy w początkowych fazach biegu (z pominięciem fazy przyśpieszenia). Fakt ten wynikał z odwrotnej proporcjonalności długości kroku biegowego do jego częstotliwości. Szczególnie interesującym wydaje się to, że nawet zmiana proporcji parametrów kinematycznych nie wpłynęła znacząco na obniżenie prędkości (z wyjątkiem 60 m). Tym samym potwierdza to, że u wysokiej klasy specjalistów w biegu na 400 m kluczowa jest zdolność do rozluźniania się na pierwszej części pokonywanego dystansu w celu ekonomizacji ruchu i jest

rozwinęta do tego stopnia, że pozwala minimalizować redukcję prędkości przemieszczania się (różnica wyniosła jedynie 3%).

2. Najbardziej czułym na narastające zmęczenie parametrem kinematycznym kroku biegowego jest czas fazy podporowej (na dystansie 350 m wzrósł o 11,7%, a na 500 m aż o 25,5%). Ma on kluczowy wpływ na wydłużenie cyklu biegowego, a tym samym na spadek prędkości przemieszczania się. Natomiast faza lotu wykazuje najmniejszą zmienność podczas pokonywania całego dystansu i zostaje na względnie stałym poziomie (różnice wyniosły odpowiednio 5,6% na 350 m i 1,7% na 500 m).
3. Pomiar zakwaszenia krwi wykazał istotną statystycznie różnicę między grupami ze względu na pokonany dystans 350 m i 500 m. Różnica ta objawiła się w pomiarze mającym miejsce w 3. minucie po zakończeniu biegu. Jednocześnie pomiar ten wykazał maksymalną wartość uzyskaną przez badanych, co świadczy o zasadności przyjętych w literaturze oraz treningu praktykach oznaczania mleczanu w tym odstępie czasowym po pojedynczym wysiłku opierającym swoją energetykę na glikolizie beztlenowej i mających na celu ocenę jej zaangażowania. Te same pomiary wykazały również, że dystans 350 m w większym stopniu stymuluje wytrzymałość kwasomlekową, pozwalając na osiągnięcie większych wartości maksymalnego zakwaszenia, jednak to dystans 500 m, mimo pierwotnie niższej wartości maksymalnej, wymaga więcej czasu na restytucję i powrót ustroju do homeostazy.
4. Porównując obie formy wytrzymałości specjalnej w kontekście ich decydowania o skuteczności biegu na 400 m, zaobserwowano szereg prawidłowości. W początkowej fazie testów (gdzie nie obserwowano zaburzeń kinematyki ruchu spowodowanej zmęczeniem) wykazano, że dystans 350 m charakteryzuje się wyższą, aczkolwiek zbliżoną częstotliwością do analogicznej fazy w biegu na 400 m. W przeciwieństwie do biegu na 500 m, gdzie wartość ta była na zdecydowanie niższym poziomie. Jednocześnie analiza spadków częstotliwości kroku spowodowanych narastającym zmęczeniem w końcowej fazie biegu ujawniła, że bardziej zbliżonym pod względem tych zaburzeń do biegu na 400 m jest dystans 500 m, niż 350 m, gdzie procentowy spadek częstotliwości był na niskim poziomie.
5. W trakcie badań uzyskano szereg wartościowych wyników sportowych, m.in. najlepszy wynik w historii kraju na dystansie 350 m – 39,69 s. Dzięki zachowaniu

wszelkich procedur startowych mogły one zostać uwzględnione w oficjalnych statystykach. Porównując uzyskane wyniki na około-startowych dystansach z późniejszymi rezultatami uzyskanymi przez badanych w sezonie na ich koronnym dystansie 400 m zaobserwowano, że ci spośród badanych, którzy uzyskali w testach najbardziej wartościowe rezultaty, zanotowali w późniejszym czasie progres wynikowy względem sezonu startowego poprzedzającego badania (w skrajnym przypadku wyniósł on 1,38 s). Jednocześnie część spośród badanych, którzy uzyskali gorsze rezultaty, w późniejszym okresie startowym zanotowali regres (w jednym przypadku o 0,86 s). Jednocześnie trzeba zaznaczyć, że badani zawodnicy znajdowali się na różnych etapach przygotowań oraz część z nich zmagająca się z kontuzjami, które miały wpływ na ich dyspozycje w dniu testu, dlatego nie wszystkie rezultaty odzwierciedlały faktyczne tendencje do uzyskiwania wartościowych wyników w sezonie startowym. Mimo to, można wnioskować, że w optymalnych okolicznościach wyniki uzyskane podczas aktów biegowych wytrzymałości specjalnej 350 i 500 m mogą antycypować wynik sportowy w biegu na 400 m.

Z praktycznego punktu widzenia istotnym wydaje się uwzględnienie w procesie treningowym kilku stwierdzeń:

1. Kluczem do poprawienia skuteczności biegu na 400 m jest skrócenie fazy podporowej kroku biegowego, szczególnie w końcowej fazie pokonywanego dystansu. Aby to uzyskać, należy położyć duży nacisk na trening o charakterze siłowym ze szczególnym uwzględnieniem siły biegowej oraz treningu plyometrycznego. Jednocześnie pomocnym w tej materii może być zastosowanie takich środków treningowych, jak skipo-rytmy, marsze płotkarskie (ze szczególnym naciskiem na aktywizację stopy) lub ćwiczenia skocznościowe.
2. Dystans 350 m ze względu na swoją kinematyczną charakterystykę przewyższającą tę obserwowaną podczas biegu na 400 m jest bardzo dobrym środkiem kształtującym wytrzymałość specjalną, szczególnie w okresie bezpośrednio poprzedzającym okres startowy lub nawet w czasie jego trwania. Dodatkowym czynnikiem przemawiającym za słuszością stosowania tego dystansu jest stopień, w jakim angażuje on procesy energetyczne oparte na glikolizie beztlenowej. Pozwala

osiągnąć wysoki pik maksymalnego zakwaszenia krwi, doprowadzając do aktywizacji szlaków metabolicznych.

3. Dystans 500 m pod kątem kinematycznym plasuje się na niższym poziomie, niż docelowy dystans 400 m, jednakże w bardzo zbliżony sposób symuluje pogłębiające się spadki mocy w końcowej fazie biegu. Ze względu na wydłużony czas pracy, w większym stopniu angażuje procesy tlenowe, które jak podaje literatura, mogą stanowić nawet 25% zasobów energetycznych w biegu na jedno okrążenie. Jednocześnie pozwala na osiągnięcie wysokiego poziomu zakwaszenia krwi i, co kluczowe, charakteryzuje się wydłużonym czasem powysiłkowej restytucji. Te wszystkie czynniki przemawiają za szerokim stosowaniem go jako środka kształtującego wytrzymałość specjalną. Jego uniwersalny charakter pozwala na wykorzystanie go zarówno w treningu akumulacyjnym skupiającym się na nawarstwianiu zmęczenia (co pozwala zwiększyć tolerancję na zakwaszenie), jak również w okresie bezpośredniego przygotowania startowego jako silnego bodźca kształtującego zachowanie prawidłowej struktury i dynamiki ruchu w końcowej fazie biegu.

7. LITERATURA

- Adamczyk J., Sozański H. (2015) Wytrzymałość w treningu lekkoatletów. Zeszyt szkoleniowy – biblioteka trenera, 2. Warszawa: MSiT.
- Arcelli E., Mambretti M., Cimadoro G., Alberti G. (2008) The Aerobic mechanism in the 400 m meters. *New Studies in Athletics*, 2, 15–23.
- Ballerich R. (1976) Model for estimating the influence of stride length and stride frequency on the time in sprinting events. *Biomechanics V–B*, University Park press, Baltimore, 208–212.
- Balsom P.D., Seger J.Y., Sjodin B., Ekblom B. (1992) Physiological responses to maximal intensity intermittent exercise. *Eur J Appl Physiol Occup Physiol* 65: 144–149.
- Bangsbo J., Hellsten Y. (1998) Muscle blood flow and oxygen uptake in recovery from exercise. *Acta Physiol Scand.* 162:305–312.
- Bergamini B. (2011) Biomechanics of sprint running: a methodological contribution (Doctoral dissertation, Arts et Métiers ParisTech).
- Bigland-Ritchie B., Johansson R., Lippold O. C. J., Smith S., Woods J. J. (1983) Changes in motoneurone firing rates during sustained maximal contraction. *J. Physiol.* 340: 335.
- Bishop D.J. (2012) Fatigue during intermittent-sprint exercise. *ClinExpPharmacol P.* 39: 836–841.
- Bober T., Putnam C. A. (1987) Factors influencing the angular velocity of a human limb segment, *Journal of Biomechanics* 20(5):511–21
- Boisseau N., Delamarche P. (2000) Metabolic and hormonal responses to exercise in children and adolescents. *Sports Med.* 30(6): 405–422.
- Borkowski J. (2003) Bioenergetyka i biochemia tlenowego wysiłku fizycznego. AWF Wrocław.
- Bret C., Lacour J.R., Bourdin M., Locatelli E., De Angelis M., (2013) Differences in lactate exchange and removal abilities between high-level African and Caucasian 400 m track runners. *Eur J Appl Physiol* 113: 1489–1498.
- Brooks G.A. (2007) Lactate. Link between glycolytic and oxidative metabolism. *Sports Med*, 37(4–5): 341–343
- Bruggemann G.P., Koszewski D., Muller D., (1999) Biomechanical Research Project: Athens 1997; Final Report; Meyer & Meyer Sport: Oxford, UK, pp. 12–41.

- Cairns S.P. (2006) Lactic acid and exercise performance. Culprit or Friend? *Sports Med*, 36(4): 279–291
- Chapman A. E. (1982) Hierarchy of changes induced by fatigue in sprinting. *Canadian Journal of Applied Sport Science* 7, 116–122.
- Coh M., Skof B., Kugovnik O., Dolenc A., Kampmiller T., Laczko E., Holcek R., Selinger P. (1995) Kinematics and dynamic characteristics of maximal speed in young sprinters. *Kineziologija*, 27(1): 11–17.
- Coh, M., Babčič V., Mackala K. (2010) Biomechanical, neuromuscular and methodical aspects of running speed development. *J. Hum. Kinet*, 26, 73–81.
- Desgorces F.D., Senegas X., Garcia J., Decker L., Noirez P. (2007) Methods to quantify intermittent exercises. *Appl Physiol Nutr Metab*. 32: 762–769.
- Duffield R., Dawson B. (2003) Energy system contribution in track running. *New Stud Athl (IAAF)* 18: 47–56.
- Duffield R., Dawson B., Coodman C. (2004) Energy system contribution to 100-m and 200-m track running events. *J Sci Med Sport* 7: 302–313.
- Duffield R., Dawson B., Goodman C. (2005) Energy system contribution to 400 m and 800 m track running. *J Sports Sci* 23: 299–307.
- Duffield R., Dawson B., Coodman C. (2005) Energy system contribution to 1500-m and 3000-m track running. *J Sport Sci* 23: 993–1002.
- Ferro A., Rivera A., Pagola I. (2001) Biomechanical analysis of the 7th World Championships in Athletic Seville, 1999. *New Studies in Athletics*, 1/2: 25–60.
- Gabryś T., Borek Z. (2005) *Lekkoatletyka Podręcznik dla studentów, nauczycieli i trenerów. Część I.*
- Gajer B., Thepaut-Mathieu C., Lehena D. (1999) Evolution of stride and amplitude during course of the 100 m event in athletics. *New Stud. Athl.* 14, 43–50.
- Gajer B., Hanon C., Thepaut-Mathieu C. (2007) Velocity and stride parameters in the 400 metres. *New Studies in Athletics by IAAF.*, 22:3; 39–46.
- Gladden L.B. (2008) A lactatic perspective on metabolism. *MedSci Sports Exerc*; 40(3): 477–485

- Gorostiaga E. M., Asiain X. (2010) Vertical jump performance and blood ammonia and lactate levels during typical training sessions in elite 400 m runners, *Journal of Strength and Conditioning Research*.
- Górski J. (red.) (2019) *Fizjologia Wysiłku i Treningu Fizycznego*, Wydawnictwo Lekarskie PZWL.
- Grgić D., Babić V., Blazević I. (2019) Running's dynamic in male 400 m sprint event. *Sciences of Human Kinetics*. 12(61) No. 2 – 2019, 44–52.
- Graubner R., Nixdorfm E. (2011) Biomechanical Analysis of the Sprint and Hurdles Events at the 2009 IAAF World Championships in Athletics. *2011 new studies in athletics* 26:1/2; 19–53.
- Grimshaw P., Lees A., Fowler N., Burden A., (2010) *Biomechanika sportu – krótkie wykłady*, Warszawa: PWN.
- Gupta S., Goswami A., Mukhopadhyay S. (1999) Heart rate and blood lactate in 400 m flat and 400 m hurdles running: A comparative study. *Ind J Physiol Pharmacol* 43: 361–366.
- Hobara H., Gomi K., Sakamoto M., Muraoka T., Shigeolso I., Kanouse K. (2010) Continuous change in spring-mass characteristics during a 400 m sprint. *Journal of Science and Medicine in Sport*, n. 13, p. 256–261.
- Hanon C., Gajer B. (2009) Velocity and stride parameters of world-class 400 meter athletes compared with less experienced runners. *J Strength CondRes* 23: 524–531.
- Hanon C., Lepretre P.M., Bishop D., Thomas C. (2010) Oxygen uptake and blood metabolic responses to a 400 m run, *Eur J Appl Physiol* 109: 233–240.
- Hanon C., Thomas C. (2011) Effects of optimal pacing strategies for 400-, 800-, and 1500-m races on the V_{O_2} response. *Journal of Sports Sciences*, 29 (9), pp.905–912.
- Harman CH., (2002) A biomechanical power model for world-class 400 meter running. In: *Proceedings of Sixth Australian Conference on Mathematics and Computers in Sport*. de Mestre, N, ed. Queensland, Australia: Bond University. pp. 155–166.
- Hashimoto T., Brooks G.A. (2008) Mitochondrial lactate oxidation complex and an adaptive role for lactate production. *Med Sci Sports Exerc*; 40(3): 486–494

- Hebisz R., Hebisz P., Borkowski J., Zatoń M. (2016) Differences in physiological responses to interval training in cyclists with and without interval training experience. *Journal of Human Kinetics*, 50(1), 93–101.
- Hellsten Y., Richter E.A., Kiens B., Bangsbo J. (1999) AMP deamination and purine exchange in human skeletal muscle during and after intense exercise. *J Physiol* 520: 909–920.
- Hermansen L. (1981) Effect of metabolic changes on force generation in skeletal muscle during maximal exercise. *Human Muscle Fatigue: Physiological Mechanisms*, ed. R. Porter and J. Whelan, 75–88.
- Hermansen L., Stensvold I. (1972) Production and removal of lactate during exercise in man. *Acta Physiol Scand* 86:191–201.
- Hirvonen J., Rehumen S., Rusko M., Harkonen M. (1987) Breakdown of high energy phosphate compounds and lactate accumulation during short supramaximal exercise. *Eur J Appl Physiol* 56: 253–59.
- Hirvonen J., Nummela A., Rusko H.K., Harkonen M. (1992) Fatigue and changes of ATP, creatine phosphate, and lactate during the 400-m sprint. *Can J Sport Sci* 17: 141–144.
- Hill D. W. (1999) Energy system contributions in middle-distance running events. *J Sports Sci* 17: 477–483.
- Hollmann W., Liesen H. (1974) Ocena poziomu mleczanów w diagnostyce wysiłkowej. *Sport Wyczynowy*, 7: 33–37.
- Hubner-Woźniak E., Lutosławska G. (2000) *Podstawy biochemii wysiłku fizycznego*. Warszawa: COS.
- Iskra J. (1999) Bieg na 400 m przez płotki. Wyższa szkoła pedagogiczna w Rzeszowie.
- Iskra J. (2004) *Lekkoatletyka, podręcznik dla studentów*. Akademia Wychowania Fizycznego, Katowice.
- Iskra J. (2005) Trening 400-metrowca – komentarz do kariery sportowej Michaela Johnsona. "Sport wyczynowy", 7–8, s. 13–29.
- Iskra J., Walaszczyk A., Skucha J. (2015) *Trening mistrzowski w biegach sprinterskich*. Katowice, Warszawa.

- Kindermann W., Keul J., Huber G. (1977) Physical exercise after induced alkalosis (bicarbonate or tris-buffer). *Eur J Appl Physiol* 37: 197–204.
- Kryściak J., Podgórski T., Eichler A. (2015) Lactate concentration and creatine kinase activity after 110-m and 400-m hurdles races *Sport Sciences* 2015; 4(22): 179–184.
- Lacour J.R., Bouvat E., Barthelémy J.C. (1990) Post-competition blood lactate concentration as indicators of anaerobic energy expenditure during 400 m and 800 m races. *European Journal of Applied Physiology*, 61, 172–176.
- Locatelli E. (1996) The importance of anaerobic glycolysis and stiffness in the sprints (60, 100 and 200 meters). *New Studies in Athletics* 2–3: 121–125.
- Luthanen P., Komi P. (1978) Segmental contribution to forces in vertical jump. *European Journal of applied physiology and Occupational Physiology* 38, 181–188.
- Mackała K. (2007) Optimization of performance through kinematic analysis of the different phases of the 100 meters. *New Stud. Athlet.* 22, 7–16.
- Maćkała K., Kowalski P. (2007) *Trening biegów krótkich*. Akademia Wychowania Fizycznego, Wrocław.
- Maćkała K., Michalski R., Čoh M., (2010) Asymmetry of step length in relationship to leg strength in 200 meters sprint of different performance levels. *Journal of Human Kinetics*, volume 25, 101-108.
- Maćkała K., Mero A. (2013) A kinematic analysis of three best 100 m performance ever. *Journal of Human Kinetics*, 36: 149–160.
- Maćkała K., Fostiak M. (2015) Acute effects of plyometric intervention—Performance improvement and related changes in sprinting gait variability. *J. Strength Cond. Res.* 29, 1956–1965.
- Maćkała K., Fostiak M., Schweyen B., Osik T., Čoh M. (2019) Acute effects of a speed training program on sprinting step kinematics and performance. *Int. J. Environ. Res. Public Health*, 16, 3138, 1–13.
- McNaughton L.R., Siegler J., Midgley A. (2008) Ergogenic effects of sodium bicarbonate. *Current Sports Medicine Reports*, 7(4): 230–236
- Medbø J., Sejersted O. (1985) Acid-base and electrolyte balance after exhausting exercise in endurance-trained and sprint-trained subjects. *Acta Physiol Scand* 125: 97–109.

- Medbø J., Mohn A.C., Tabata I., Bahr R., Vaage O., (1988) Anaerobic capacity determined by maximal accumulated O₂ deficit. *J Appl Physiol* 64: 50–60.
- Newsholme E.A., Blomstrand E., Ekblom B. (1992) Physical and mental fatigue: metabolic mechanisms and importance of plasma amino acids. *Br Med Bull* 48: 477–495.
- Nummela A., Vuorimaa T., Rusko H. (1992) Changes in force production, blood lactate and EMG activity in the 400-m sprint. *Journal of Sports Sciences*, 10: 217–228.
- Nummela A., Rusko H. (1995) Time course of anaerobic and aerobic energy expenditure during short term exhaustive running in athletes. *Int J Sports Med* 16: 522–527.
- Ohkuwa T., Kato Y., Katsumata K., Nakao T., Miyamura M. (1984) Blood lactate and glycerol after 400 m and 3000 m runs in sprint and long distance runner. *Eur J Appl Physiol Occup Physiol* 53: 213–218.
- Plevnik, M., Vučetić, V., Sporiš, G., Fiorentini, F., Milanović, Z., Miškulin, M. (2013) Physiological Responses in Male and Female 400 m Sprinters. *Croatian Journal of Education*, Vol.15; Sp.Ed.No.4, 93–109.
- Pollitt L., Walker J., Tucker C., Bissas A. (2018) Biomechanical Report for the IAAF World Championships London 2017, 400 m Men's.
- Rademaker T. (1982) Training for the 400 meters. *Modern Athlete and Coach* 20: 7–10.
- Ramsbottom R., Nevill A. M., Nevill M. E., Newport S., Williams C. (1994) Accumulated oxygen deficit and short-distance running performance. *Journal of Sport Sciences*, 12, 447–453.
- Reis V.M., Duarte J.A., Espírito-Santo J., Russell A.P. (2004) Determination of accumulated oxygen deficit during a 400 m run. *J Exercise Physiol* 7: 77–83.
- Reis M., Miguel P. (2007) Changes in the accumulated oxygen deficit and energy cost of running 400 meters. *New Studies in Athletics*, 2, 49–56.
- Salo, A., Bezodis I.N., Batterham A.M., Kerwin D.G., (2011) Elite sprinting: Are athletes individually step-frequency or step-length reliant? *Med. Sci. Sports Exerc* 43, 1055–1062.
- Saraslanidis P.J., Panoutsakopoulos V., Tsalis G.A., Kyprianou E. (2011) The effect of different first 200 m pacing strategies on blood lactate and biomechanical parameters of the 400 m sprint. *Eur J Appl Physiol* 111: 1579– 1590.
- Schiffer J. (2008) The 400 metres. *New Studies in Athletics by IAAF*. 23:2, 7–13.

- Schäffer W. (1989) On structure characteristics of the competitive performance and the corresponding training content in the athletics discipline 400 m long sprint. Dissertation, 262p, Martin-Luther-Universität Halle-Wittenberg (in German).
- Shen W. (2000) The effects of stride length and frequency on the speeds of elite sprinters in 100 meter dash [w:] Y. Hong, D.P. Johns (red.) Biomechanical Proceedings of XVIII International Symposium of Biomechanics in Sports, Vol. II, The Chinese University of Hong Kong, 333–336.
- Sjodin B., Westing Y. H., Apple F. S. (1990) Biochemical mechanisms for oxygen free radical formation during exercise. *Sports Med* 10: 236–254.
- Sozański H. (red.) (1999) Podstawy teorii treningu sportowego. Warszawa: COS.
- Sprague P., Mann R.V. (1983) The effects of muscular fatigue on the kinetics of sprint running. *Research Quarterly for Exercise and Sport* 54 (1): 60–66.
- Spencer M. R., Gastin P. B., Payne W. R. (1996) Energy system contribution during 400 to 1500 meters running. *New Stud Athletics (IAAF)* 11: 59–65.
- Spencer M.R., Gastin P. B., (2001) Energy system contribution during 200- to 1500-m running in highly trained athletes. *Med Sci Sports Exerc* 33: 157–162.
- Szmatlan-Gabryś U., Ozimek M., Klimek A., Gorner K. (2005) Profile of aerobic and anaerobic efficiency of professional polish road cyclists after winter preparatory period. Oradea, *Annale Universitath Din Oradea, Fascicula Educatie Fizica Si Sport Editura Universitath Din Oradea*: 404–414
- Tupa V., Gusenov F., Mironenko I., (1995) Fatigue influenced changes to sprinting technique. *Modern Athlete and Coach*, 33, 7–10.
- Vaughan C. L., Matravers D. R., (1977) A biomechanical model of the sprinter. *Journal of Human Movement Studies*, 3, 207–213.
- Vazel P. J. (2011) Speed reserve in the 400 m. Special Report. 16p, [http://ucoach.com/articles/detail/speed-reserve-in-the-400 m](http://ucoach.com/articles/detail/speed-reserve-in-the-400-m).
- Vilmi N., Äyrämö S., Nummela A. (2016) Oxygen uptake, acid-base balance and anaerobic energy system contribution in maximal 300–400 m running in child adolescent and adult athletes. *Journal of Athletic Enhancement are the property of SciTechnol*.
- Vonstein W. (1996) Some reflections on maximum speed sprinting technique. „New Studies in Athletics”, 2–3, 161–165.

- Ward-Smith A.J. (1999). Aerobic and anaerobic energy conversion during high-intensity exercise. *Medicine and Science in Sports and Exercise*, 31, 1855–1860.
- Warden P. (1988) Planning training for the sprints and hurdles. *Track Coach*. 105: 3351–3354.
- Wilson C., Gittoes M., Heywood P., (2008) The effect of pace on stride characteristics and variability in sprint running. In *Proceedings of the XXVI International Symposium of Biomechanics in Sports (ISBS)*, Seoul, Korea, 14–18 July 2008; pp. 456–459.
- Weyand P., Cureton, K., Conley D., Sloniger M., (1993) Percentage anaerobic energy utilized during track running events. *Medicine and Science in Sports and Exercise*, 25, 105.
- Yamamoto (2015) Analysis of the major men and women's 400 m races of 2015. *Bulletin of Studies in Athletics of JAAF*, Vol. 11: 128–135.
- Yamamoto (2016) Analysis of the major men and women's 400 m races of 2016. *Bulletin of Studies in Athletics of JAAF*, Vol. 12: 98–103.
- Zouhal H., Jabbour G., Jacob C. (2010) Anaerobic and aerobic energy system contribution to 400-m flat and 400-m hurdles track running. *Journal of Strength and Conditioning Research*, 24(9), 2309–2315.
- Živanović N., Palić R., Veroljub S., Ciric, M., Andrasic, S. (2011) Effects of speed endurance test on the levels of cortisol and testosterone in handball players. *Journal of Physical Education and Sport*, 1 (12), 31–34.

8. SPIS TABEL i RYCIN

Tabela 1. Przydział do grup testu, dane antropometryczne badanych, ich rekordy życiowe oraz najlepsze wyniki w sezonie poprzedzającym badania.....	15
Tabela 2. Charakterystyka budowy ciała biegaczy na 400 m z podziałem na: grupa 350 m i grupa 500 m oraz ocena zróżnicowania wartości średnich między grupami testem t-Studenta	20
Tabela 3. Charakterystyka wybranych parametrów testu-biegu na 350 m i 500 m, $p < 0,05$ zaznaczono tłustym drukiem	21
Tabela 4. Analiza kinematyczna parametrów 20 kroków podczas biegu na 350 m i 500 m z podziałem na początkowy i końcowy odcinek testu zestawione z parametrami 10 kroków na dystansie 60 m	22
Tabela 5. Porównanie średnich wartości parametrów kinematycznych kroku biegowego między początkowym odcinkiem (brak zmęczenia) a odcinkiem końcowym (zmęczenie) w teście-biegu na 350 m. NIR; prawdopodobieństwa dla testów post-hoc, $p < 0,05$ zaznaczono tłustym drukiem.....	25
Tabela 6. Porównanie średnich wartości parametrów kinematycznych kroku biegowego między początkowym odcinkiem (brak zmęczenia), a odcinkiem końcowym (zmęczenie) w teście-biegu na 500 m. NIR; prawdopodobieństwa dla testów post-hoc, $p < 0,05$ zaznaczono tłustym drukiem.....	26
Tabela 7. Porównanie średnich wartości parametrów kinematycznych kroku biegowego między początkowym odcinkiem (brak zmęczenia), a odcinkiem końcowym (zmęczenie) między testem-biegiem na 350 m i 500 m, test NIR; prawdopodobieństwa dla testów post-hoc, $p < 0,05$ zaznaczono tłustym drukiem.....	27
Tabela 8. Porównanie średnich wartości parametrów kinematycznych kroku biegowego między początkowym odcinkiem (brak zmęczenia), a odcinkiem końcowym (zmęczenie) w testach na 350 m i 500 m oraz porównanie tych samych faz względem siebie	27
Tabela 9. Porównanie średnich wartości parametrów kinematycznych kroku biegowego początkowego odcinka (brak zmęczenia), końcowego odcinka (zmęczenie) testu-biegu na 350 m i 500 m oraz biegu na 60 m, NIR; prawdopodobieństwa dla testów post-hoc, $p < 0,05$ zaznaczono tłustym drukiem.....	29
Tabela 10. Porównanie średnich wartości parametrów kinematycznych kroku biegowego na początkowym odcinku (brak zmęczenia) i odcinku końcowym (zmęczenie) biegu na 350 m a testem-biegiem na 60 m. NIR; prawdopodobieństwa dla testów post-hoc, $p < 0,05$ zaznaczono tłustym drukiem.....	30

Tabela 11. Porównanie średnich wartości parametrów kinematycznych kroku biegowego na początkowym odcinku (brak zmęczenia) i odcinku końcowym (zmęczenie) biegu na 500 m a testem-biegiem na 60 m. NIR; prawdopodobieństwa dla testów post-hoc, $p < 0,05$ zaznaczono tłustym drukiem.....	30
Tabela 12. Jednowymiarowe testy dla powtarzanych pomiarów: Parametryzacja z sigma-ograniczeniami, $p < 0,05$ zaznaczono tłustym drukiem	31
Tabela 13. Charakterystyka poziomu stężenia mleczanu we krwi biegaczy na 400 m w teście-biegu na 350 m i 500 m, $p < 0,05$ zaznaczono tłustym drukiem.....	32
Tabela 14. Korelacja porządku rang Spearmana (bez podziału na grupy) między poziomem stężenia mleczanu po biegu na 350 m i 500 m a wybranymi parametrami kinematycznymi testu biegu i budową somatyczną biegaczy na 400 m, współczynniki istotne na poziomie $p < ,050$ zaznaczono tłustym drukiem.....	33
Rycina 1. Rozmieszczenie systemu pomiarowego OptoJump na stadionie.	18
Rycina 2. Wartości parametrów kinematycznych 20 kroków biegowych na dystansie 350 m i 500 m z podziałem na początkowy i końcowy odcinek testu zestawione z parametrami 10 kroków na dystansie 60 m	24
Ryc. 3. Stężenie mleczanu podczas testu-biegu na 350 (n = 6) m i 500 m (n = 5).	42

9. SUMMARY

The main goal of sports training in sprint runs, with a particular focus on the 400 m run, should consist of multidimensional actions leading to an increase in the motor and technical capacities of the sprinter to achieve maximum sports results. This is primarily conditioned by the development of optimal running efficiency for each competitor, which consists in developing and maintaining the highest possible average running speed over the entire distance. The better the kinematic relationship between the step length and frequency over the entire distance, the higher the running speed values. Speed capabilities in a given run can be improved when the value of both the parameters are simultaneously improved or one of them is improved with the other one exhibiting a constant value. This can be achieved in a run of 100 or 200 m. The character of the 400 m run forces a slightly different perspective on these relationships due to the progressive fatigue during the run. Therefore, the 400-meter runner should theoretically strive to achieve the optimal step frequency and length in relation to the increasing fatigue, with particular focus on the last 100 m.

Achievement of good sporting results in a 400 m sprint race depends on many morphological and functional factors, and above all on a high level of special endurance. In turn, special endurance depends on and should closely correlate with speed potential, with a special focus on maintaining the quality of parameters determining the mechanics of running. Therefore, the main goal of special endurance training in a 400 m run should be to work on optimizing the dynamics of energy processes, while simultaneously maintaining a high-speed potential over the entire distance.

The aim of this work was to determine, based on the change of kinematic run parameters and intensification of anaerobic energy systems, which distance, 350 m, or 500 m, is more effective for developing special endurance for the 400 m run. An additional aspect is need to explain the dynamics of changes in kinematic parameters under the influence of increasing fatigue over particular distances.

For this research, was selected a group of 11 internationally successful athletes specializing in the 400-metre run. Five of these athletes participated in the relay team, which during the 17th 2018 IAAF World Indoor Championships (Birmingham) set an indoor world record in a 4x400m run. The remaining subjects were World Championships and European Championships medallists in different age categories.

The competitors were divided into two groups: a 350 m test-run group and a 500 m test-run group. The division into groups was planned according to competitors' individual preferences and their annual training plan, agreed with the national team coach and club coach. Each of the participants performed their tests run individually. Starting blocks were used for a distance of 350 m, whereas the 500 m run included a standing start. The result was measured using a photocell (LynxSystem) together with a qualified starter. For measurements with the OptoJump measuring device, the distance of 500 m was divided into two sections: 40-90 m and 440-490 m. The distance of 350 m was divided into two sections: 60-100 m and 300-340 m.

The morphological characteristics covered selected parameters and indicators determining the body structure of the runners. The differences in measurements were no statistically significant, which indicates that despite being divided into two subgroups, the sprinters formed a homogeneous group.

The athletes were tested for lactate concentration in plasma before the activity, after warm-up, immediately before the test, and in the 1st, 3rd, 12th, 20th, and 40th minute after the completion of the run. The enzymatic method of the Sentinel test (Italy) was used to determine the lactate concentration ($\text{mmol}\cdot\text{l}^{-1}$). Arterialized blood was taken from the fingertip and immediately diluted 10 times with a cool, isotonic solution containing NaF and NaCl. Lactate concentration was measured in the supernatant, obtained after short centrifugation of the diluted sample. The measurements were repeated twice.

Because the tests differed in the distance covered (150 m), significant differences in speed, time and step frequency seem to form a correct relationship. No differences in step length were recorded, which was somewhat surprising. Time for the 60 m run was also included as a reference for further analysis of individual test-run parameters for 350 m and 500 m. No statistically significant differences between the groups of sprinters as recorded with respect to the time they took to cover this distance.

Both forms of special endurance exhibited several differences, some of them being statistically significant, resulting from a different duration of the effort. Some of the kinematic parameters, such as step frequency or running speed, confirmed our earlier observations concerning their dynamics with respect to the distance travelled, but some, such as step length, required in-depth analysis of individual run phases in order to understand

their variability. Thus, the following relationship was observed between the distances studied: (500 m, 350 m and 60 m with the latter being used as a determinant for shaping kinematic parameters at maximum speed) the longer the distance, the longer the running step length in the initial phases of the run (excluding the acceleration phase). This resulted from step length being inversely proportional to step frequency. It seems particularly interesting that even a change in proportions between kinematic parameters did not entail a significant speed reduction (except for the 60 m run). This confirms that for high-class specialists in 400 m run, it is crucial to relax over the first part of the distance covered to make movements more efficient. This ability has been developed to such an extent that it allows to minimize speed reduction (the difference was only 3%).

The duration of the stance phase proved to be the kinematic parameter most sensitive to increasing fatigue (over a distance of 350 m it increased by 11.7% and over 500 m by 25.5%). It has a key impact on prolonging the running phases cycle and thus on the decrease in speed. To the contrary, the swing phase exhibits the smallest variability over the whole distance and remains relatively constant (the differences were 5.6% and 1.7% for 350 m and 500 m respectively).

The measurement of blood lactate showed a statistically significant difference between the 350 m and the 500 m distance. This difference was visible in the measurement taken in the 3rd second after the completion of the run. At the same time, the subjects achieved the maximum values for this measurement, which confirms the validity of the practice to determine lactate concentration at this moment after a single effort based on anaerobic glycolysis and aimed at evaluating its involvement. The same measurements have also shown that the distance of 350 m stimulates the lactic endurance to a greater extent, allowing for higher maximum acidification values. However, it was the distance of 500 m, despite the originally lower maximum value, that required more time for restitution and return to homeostasis.

Comparing both forms of special endurance in terms of their influence on the efficiency of 400 m run, we observed a number of regularities. In the initial test phase (where no fatigue-induced disturbances in the kinematics of motion were observed) we have shown that the distance of 350 m is characterized by a higher frequency, even if the value was still close to the analogous phase in the 400 m run. This remained in contrast to the 500 m run,

where this value was much lower. At the same time, the analysis of step frequency drops caused by increasing fatigue in the final phase of the run revealed that in terms of these disturbances the distance of 500 m is more similar to running at 400 m than 350 m, where the drop in frequency, expressed in percentages, was low.

The results of this study confirm the validity of the concept of using training measures intended to boost special endurance as a form of test providing insight into the dynamics of changes in the kinematic parameters of step. Simulated competition conditions made it possible to determine, with great reliability, which of the distances, 350 m or 500 m, and in which phase, fares better in reproducing the kinematics and energy processes occurring during the sports competition at a distance of 400 m. It is beyond any doubt that each of the used special endurance forms has its advantages that justify its use in professional training. However, this study has shed more light at which kinematic parameters should attract the attention of researchers and coaches at various run stages. At the same time, it provides an answer to the question of how stimulating and reasonable it is to use varied forms of special endurance at different stages of conditioning training.

From a practical point of view, it seems important to take into account shortening the stance phase to improve the 400 m run efficiency, especially towards the end of the run. To achieve this, a lot of emphasis should be put on strenght training with a special emphasis on running strength and plyometric training.