

AKADEMIA WYCHOWANIA FIZYCZNEGO IM. J. KUKUCZKI
W KATOWICACH

Paweł Gwiazdoń

**Strategia biegu na 400m przez płotki kobiet w oparciu o parametry czasowe
i przestrzenne**

Rozprawa na stopień doktora nauk o kulturze fizycznej

Promotor:

prof. dr hab. Janusz Iskra

KATOWICE 2023

*Niniejszą rozprawę dedykuję trenerom
i współtwórcom mojej sportowej przygody:
- doktorowi Aleksandrowi Matusińskiemu,
- profesorowi Januszowi Iskrze
- doktorowi Michałowi Pietrzakowi
serdecznie dziękuję.*

WSTĘP

Początek lat 70. XX w. w lekkoatletycznej rywalizacji kobiet związany był z wprowadzeniem dystans 400 m ppł., zastępując rozgrywany od dekady dystans o połowę krótszy. Zwyciężczynią i pierwszą nieoficjalną rekordzistką świata została Brytyjka Sandra Dyson, pokonując jedno okrążenie z płotkami w czasie 61,1 s (1971 r Bonn). Oficjalny rekord świata na dystansie 400 m ppł zanotowano 3 lata później, a jego autorką była Polka Krystyna Kacperczyk, legitymująca się wówczas rezultatem na poziomie 56,51 s. Dystans jednego okrążenia z płotkami zyskiwał na popularności wchodząc w 1977 r. do programu Pucharu Europy. Pełne uznanie i akceptacja dystansu 400 m ppł kobiet miało miejsce podczas Igrzysk Olimpijskich w Los Angeles w 1984 r., zapisując się na stałe do programu Igrzysk. Dwa lata po Igrzyskach w Los Angeles zawodniczka z ZSRR Marina Stepanova, jako pierwsza kobieta, złamała barierę 53 s na 400 m ppł. Jej rezultatu nie udało się poprawić przez następnych 7 lat. Sztuki tej dokonała Brytyjka Sally Gunnell podczas biegu na Mistrzostwach Świata w Stuttgarcie 19.08.1993 r. uzyskując wynik 52.74 s. Kolejną wybitną zawodniczką wpisującą się w historię biegów płotkarskich jest pochodząca z USA Kim Batten. Podczas Mistrzostw Świata w Goeteborgu (1995 r.) poprawiła rezultat Gunnell o 0,13 s. Na poprawę wyniku Amerykanki należało poczekać 8 lat, a dokonała tego Rosjanka Yuliya Pechonkina (52.34 s). Złamanie bariery 52 s. nastąpiło w roku 2021. Sztuka ta udała się Sydney McLaughlin dwukrotnie. Po raz pierwszy 27 czerwca w Eugen (51,90 s), po raz drugi (51,46 s.) w biegu finałowym Igrzysk Olimpijskich w Tokio 4 sierpnia (Igrzyska przesunięto z roku 2020). Wyniki tego biegu stanowią 4 z 6 najlepszych rezultatów w historii (stan na grudzień 2022). Srebrną medalistką tych Igrzysk została druga z Amerykanek Daliah Muhammad, która również pokonała barierę 52 s (51,58 s), a dwa lata wcześniej była autorką rekordu świata (52,16 s). Podium uzupełniła Holenderka Femke Bol (52.03 s). Na połamanie bariery 51 s. czekano niespełna 12 miesięcy, później Sydney McLaughlin wyśrubowała rekord świata na 50.68 s. co czyni ją jak na razie jedyną kobietą, której udała się ta sztuka (Iskra, 2005; [http: https://www.worldathletics.org/](http://https://www.worldathletics.org/), dostęp 10.02.2023).

Imponujące rezultaty, szczególnie te uzyskane w czasie ostatnich Igrzysk Olimpijskich i Mistrzostw Świata, nasuwają pytanie o granice możliwości kobiet w tej konkurencji.

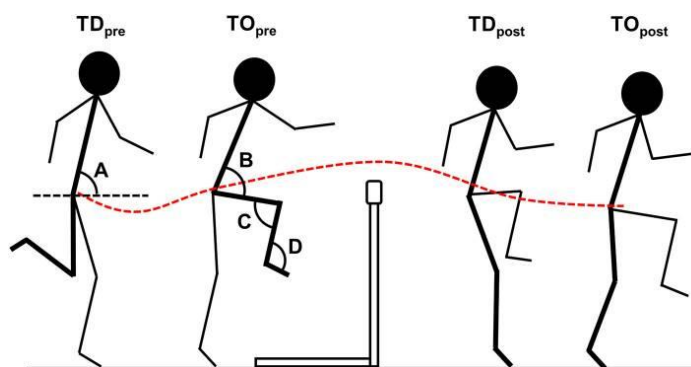
1.1. Bieg na 400 m przez płotki – charakterystyka konkurencji

Bieg na dystansie 400 m ppł uważany jest za jeden z najtrudniejszych dystansów wśród konkurencji lekkoatletycznych. Trudności przypisywane pokonywaniu dystansu 400 m ppł wynikają ze złożonej specyfiki biegu, mianowicie połączenia zdolności szybkościowych i wytrzymałościowych oraz umiejętności technicznych związanych z pokonywaniem kolejnych płotków. Biegi płotkarskie są zatem konkurencją z pogranicza konkurencji biegowych i technicznych, a płotkarze i płotkarki muszą prezentować wszechstronne zdolności (Hiserman, 2011; Iskra, 1999, 2012). Można stwierdzić, że bieg przez płotki złożony jest z dwóch kluczowych aspektów: biegu sprinterskiego pomiędzy płotkami i elementów technicznych związanych z efektywnym pokonaniem kolejnych płotków. Warto zaznaczyć, że technika pokonywania płotka spełnia jedynie rolę użytkową, której celem jest jak najszybsze pokonanie przeszkody przy zachowaniu prędkości biegu i jak najmniejszym wydatku energetycznym (Iskra, 1999).

Złożoność konkurencji jaką jest pokonanie dystansu 400 m ppł wymaga 10-krotnego pokonania płotka (skoku na odległość około 3,5- 4 m) i płynnego przejście w bieg. Taka złożoność dyscypliny wymaga uwzględnienia w przygotowaniu siły o charakterze eksplozywnym, która ma związek ze zwiększeniem możliwości szybkościowych oraz przyczynia się do zachowania właściwej techniki pokonywania przeszkód (Mehlich 2004). Na potrzeby analiz bieg na dystansie 400 m ppł dzielony jest w wielu różnych wariantach, z których najczęściej w literaturze wyróżnia się podział na pierwszą i drugą połowę dystansu lub rozpatrywanie kolejno następujących po sobie odcinków 100 metrowych (Guex, 2012). Celem bardziej wnikliwej analizy niektórzy badacze dzielą dystans na trzy składowe: dobieg – od startu do pierwszego płotka (45 m), bieg pomiędzy płotkami – 9 przestrzeni pomiędzy kolejnymi płotkami po 35 m każda oraz wybiegu – dystans od ostatniego płotka do linii mety (40 m). Ze względu na próby określenia strategii czasowo przestrzennej dystans pomiędzy pierwszym i ostatnim płotkiem dzielony jest na mniejsze składowe. Analizie poddawane są poszczególne przestrzenie międzypłotkowe lub łączy się je w różnych wariantach – jednostek płotkarskich. Próbując określić strategię biegu bardzo użyteczny wydaje się podział zaproponowany przez Yasui i wsp. (1996), który wyróżnił dobieg, wybieg oraz odcinek pomiędzy płotkami podzielony na trzy sekcje: od 1 do 4 płotka, od 4 do 7 płotka oraz od 7 do 10 płotka (po 105 m każdy). Taki podział znajduje uzasadnienie w kontekście przemian metabolicznych oraz biomechanicznych jakie zachodzą u zawodników w trakcie pokonywania dystansu (Iskra, 2021).

1.2. Technika płotkarska – podstawowe informacje

Technika pokonania pojedynczego płotka zmienia się w trakcie biegu wraz z kolejno następującymi po sobie płotkami i narastającym zmęczeniem. Kluczowe jest zatem takie dostosowanie techniki, aby pokonanie wszystkich płotków odbyło się w sposób płynny i jak najszybszy (Balsalobre-Fernández i wsp., 2013). Iskra i Čoh (2011), dodają, że aby osiągnąć optymalny poziom wydajności, sportowiec musi mieć dobrze rozwiniętą koordynację, a także technikę pokonywania płotków w określonym „rytmie” kroków.



Rycina 1. Fazy pokonywania płotka (wg Bissas 2022) A (kąt pochylenia tułowia), B (kąt stawu biodrowego), C (kąt stawu kolanowego) i D (kąt stawu skokowego), linia przerywana określa tor środka ciężkości.

W technice pokonywania płotka rozgraniczyć możemy kwestie związane z ułożeniem tułowia oraz kończyn w poszczególnych fazach sekwencji ruchowej oraz odległości fazy „lotu” czyli okresu pomiędzy odbiciem z nogi zakroczonej przed płotkiem i lądowaniem na nodze atakującej za płotkiem (Rycina 1). Ważna jest także odległość pierwszego pełnego kroku wykonanego po pokonaniu przeszkody, co z kolei może wpływać na liczbę kroków wykonanych na dystansie całego okrążenia.

1.3. Parametry czasowe dystansu 400 m przez płotki kobiet

Wraz z rozpowszechnieniem dystansu 400 m ppł kobiet i jego wcieleniem w programy najważniejszych wydarzeń lekkoatletycznych, narodziło się zainteresowanie naukowymi analizami także tej konkurencji. Jednymi z pierwszych dobrze udokumentowanych biegów były rywalizacje w czasie Mistrzostw Europy w 1978 i 1982 roku, a także na Igrzyskach Olimpijskich w 1984 roku. Bardziej wnikliwe analizy naukowców (głównie biomechaników) pojawiły się po Mistrzostwach Europy w Stuttgarcie (1986 r.) (Matousek i Sedlacek, 1987).

Na tych Mistrzostwach Europy doszło do pojedynku trzech zawodniczek o różnych rodowodach sportowych – płotkarek na 100 m (Feuerbach), biegach na 400 m (Bush) i jednej z pierwszych specjalistek dystansu 400 m ppł - Mariny Stiepanowej. Różne początki lekkoatletycznych karier miały swoje odzwierciedlenie w czasie strategii biegu. Wspomniana wcześniej Cornelia Feurbach, jako sprinterka rozpoczęła najszybciej w finałowej stawce (5H - 23,2 s) i prowadziła na półmetku dystansu o ok. 4 m. Strategia „mocnego otwarcia” nie była jednak skuteczna i na mecie uległa specjalistkom od 400 m, a jej WPT osiągnął prawie 4 s (3,9 s). Skuteczniejsza okazała się strategia „umiarkowanego tempa”, która przyniosła Marinie Stiepanowej zwycięstwo. Wartym wspomnienia jest zaawansowany, jak na sportowca wiek ówczesnej tryumfatorki, która w chwili zwycięstwa miała 36 lat.

Dość różnorodne strategie charakteryzują medalistki Igrzysk w 1996 w Atlancie. Współzawodnictwo wygrała wówczas Jamajka Deon Hemmings, która na półmetku biegła wspólnie z Buford-Bailey (23,3 s – 5H). Biegnąca w środku stawki Batten (23,7 s) zniwelowała w końcówce straty i zdobyła srebrny medal. Zrównoważone tempo biegu preferowała także mistrzyni świata z 1997 r. Nezha Bidouane. Biegnąc „rytmem” początkującej płotkarki (16-17) Marokanka miała 5 m straty w połowie dystansu, by na mecie zwyciężyć o 0,12 s. z Deon Hemmings. Jamajka popełniła błąd Bidouane na kolejnych Mistrzostwach Świata (1999 r. w Sewilli), zbyt szybko rozpoczynając bieg i prowadząc pewnie do połowy dystansu, zdobyła jedynie brązowy medal (Pernia – 23,4/52,89, Bidouane 23,3/53,16 s). Analogiczna sytuacja miała miejsce cztery lata później na następnych Mistrzostwach Świata. Błąd w postaci zbyt szybkiego rozpoczęcia biegu popełniła Pernia (23,3 s – 5H) i przegrała z Bidouane (23,8 – 5H) w stosunku 53,34/53,51 s). Skłonność do strategii szybszego rozpoczynania biegu widoczna była na Igrzyskach w Sydney (2000) oraz Mistrzostwach Świata w Helskinkach (2005), co ważne podkreślić należy zdolności dłuższego utrzymania tempa biegu, o czym świadczą wyniki finałowych biegów. Ich zwyciężczynie – Irina Priwałowa i Julia Pieczonkina na półmetku biegu miały podobne międzyczasy jak (odpowiednio) Deon Hemmings i Leshinda Demus. O zmienności strategii biegu w zależności od bieżącej sytuacji świadczą także wyniki dwukrotnej Mistrzyni Świata (2003, 2007) Jany Pittman. W zwycięskich biegach Australijka w 2003 r. zaprezentowała zrównoważone tempo biegu (23,5 – 5H), w 2007 r. rozpoczęła znacznie szybciej (23,0 – 5H) z wyraźną stratą w końcowej części biegu.

Ostatnie lata potwierdziły możliwości różnych strategii czasowych wykorzystywanych w czasie najważniejszych imprez. Na Mistrzostwach Świata w Londynie w 2017 r. późniejsza rekordzistka świata Dalilah Muhammad na 5. płotku miała rekordowy wynik (22,88 s),

jednakże przegrała ze swoją rodaczką Kori Carter (53,07 v 53,50 s). Różnica dwóch części dystansu późniejszej rekordzistki była (nawet w grupie płotkarek początkujących) również rekordowa – 4,41 s.

Muhammad zmieniła swoją koncepcję tempa biegu w dalszym rozwoju kariery sportowej i w 2019 r. właściwie zaplanowała strategię czasową zdobywając złoty medal Mistrzostw Świata i bijąc rekord globu (52,16 s; D – 2,95 s).

Ostatnie Mistrzostwa Świata w Oregonie (2022) potwierdziły sensowność stabilnego tempa biegu. Różnica czasu drugiej i pierwszej części biegu u złotej (Sydney McLaughlin) i srebrnej (Femke Bol) medalistki wynosiła odpowiednio 2,20 i 2,33 s. Amarykanka jako pierwsza kobieta złamała barierę 51 s. ustanawiając rekord świata na poziomie 50,68 s (3H – 4,10, 5H – 22,52, 8H – 40,40 s).

1.4. Parametry przestrzenne dystansu 400 m przez płotki kobiet

Analiza parametrów przestrzennych w biegach kobiecych, od momentu wprowadzenie rywalizacji w najważniejszych międzynarodowych zmaganiach, stała się automatycznym rozwinięciem analiz jakim poddawana była rywalizacja męska, która w tamtym czasie była już wysoko rozwinięta. W konkurencji męskiej funkcjonowały modele kroków („rytm biegu”) oparte na jednonożnym biegu 13-ma krokami charakteryzującym najlepszych zawodników takich jak Moses, lub częściej obserwowany model łączeniem 13 i 15 kroków (dla zawodników pokonujących płotki wyłącznie jedną kończyną) lub 13-14 i rzadziej 14-15 krokowy (wykorzystującym kończyny naprzemiennie) (Iskra, 2023).

Rozwój konkurencji wymusił na zawodniczkach zmniejszenie liczby wykonywanych kroków, co stało się gwarancją dalszego progresu wyników. Preferowane wówczas były dwa rozwiązania – rozpoczęcie biegu w rytmie 15 krokowym, a następnie kontynuowany pokonywaniem przeszkód w rytmie 17 krokowym oraz szablon 15 i 16 krokowy. W pierwszym wariacie zawodniczki pokonują płotki jedną nogą atakującą, w drugim decydują się na bieg „obunożny”. Zwolenniczką pierwszego z wymienionych wariantów „rytmowych” była m.in. Mariny Stiepanowej (ME 1986) a także, Sally Gunnell (w początkowym okresie kariery). Ten sposób pokonywania dystansów charakteryzował także późniejsza rekordzistkę świata Julię Pieczonkinę (MŚ 2005 r.). Bardziej powszechny, szczególnie obecnie, jest wariant rozpoczynania biegu rytmem 15 krokowym i kończenia w rytmie 16 krokowym (Sabine Buschie, Daimi Pernia, Fanni Halkia, Kim Batten, Tonja

Buford-Bailey). Taka koncepcja biegu wiąże się z kolei z koniecznością atakowania płotków w drugiej części dystansu „gorszą” kończyną (Iskra i wsp, 2021).

Jednym z wariantów biegu obserwowanym u kobiet i praktycznie nie występującym u mężczyzn jest dwukrotna zmiana rytmu kroków (15-16-17). Zwolenniczkami takiej startego biegu były m. in.: Debbie Flintoff-King, Melanie Walker, Natalia Antiuch, czy Genowefy Blaszk (Sedlacek i Matousek 1985). Rzadko spotykane rozwiązanie pokonywania płotków zaprezentowała Marokanka Nezha Bidouane (mistrzyni świata z 1997 r. z Aten). Rozpoczynając bieg rytmem 16-krokovym kończyła bieg z atakowaniem płotka „lepszą” kończyną w rytmie 17-krokovy. Wariant 16-17 był specyficzny, zważywszy, że Bidouane miał doskonałe warunki fizyczne (174 cm/60 kg).

Pierwszą płotkarką stale biegającą od startu do mety rytmem 15-krokovym była Rosjanka Margarita Ponomariewa (177 cm), rekordzistka świata z 1984 r. Późniejsze próby kontynuowania tej strategii biegu nie spotkały się z pełną aprobatą (np. Jelena Churakowa w 2011 r i Anna Jaroszczuk w 2012 r. były jedynie finalistkami najważniejszych imprez).

Dalsza ewolucja modelu kroków wykonywanych pomiędzy płotkami zaowocowała rozpoczynaniem biegu w rytmie dwunożnym – 14-krokovym. Pierwsze, skuteczne próby takiej strategii podjęła czołowa sprinterka świata Irina Priwałowa (100 m – 10,77 s, 200 m – 21,87 s). Przekwalifikowanie do dystansu 400 m ppł. w roku olimpijskim 2000 zakończyło się zdobyciem złotego medal – 53,02 s. Rosjanka pierwsze cztery odległości pokonała właśnie w rytmie 14-krokovym (szablon – 4x14+3x15+2x16). W późniejszym okresie bieg 14-krokovy wykorzystywały m.in. Jana Pittman (mistrzyni świata z 2003 i 2007 r.) i Kaliese Spencer (Igrzyska w Londynie w 2012 r.). Obecnemu wysokiemu poziomowi sportowemu (od roku 2019) także towarzyszy zmniejszenie liczby kroków wykonywanych głównie w pierwszej części dystansu, wariant taki obserwowany jest m.in. u Sydney McLaughin, która jest autorką czterech rekordów świata. Wariant pierwszej części dystansu pokonywanego na 14 kroków to jednak nie konieczność skuteczności startowej po 2020 r. Czołowe biegaczki świata w dalszym ciągu preferują rytm 15-16 kroków (Muhammad) czy trudny do realizacji bieg 15-krokovy (Bol).

2. CEL PRACY I PYTANIA BADAWCZE

Podstawowym celem pracy było określenie czasowo-przestrzennej strategii biegu na 400 m przez płotki kobiet na mistrzowskim poziomie zaawansowania.

Realizując cel główny sformułowano następujące pytania badawcze:

1. Jakie są najistotniejsze parametry mistrzostwa sportowego w biegu na 400 m przez płotki kobiet z uwzględnieniem zmiennych czasowych i przestrzennych?
2. Które zmienne mają największy związek z końcowym wynikiem w biegu na 400 m przez płotki kobiet?
3. Które z wykorzystywanych zmiennych są najbardziej istotne w ujęciu różnych metod statystycznych?
4. W jaki sposób strategia biegu różnicuje płotkarki o różnym poziomie zaawansowania?
5. Jak zmieniała się strategia biegu na dystansie 400 m przez płotki kobiet w okresie 1978-2022?

Postawienie pytań badawczych skłania do prezentacji następujących hipotez:

- A. O sukcesie w biegu na 400 m przez płotki kobiet decyduje czas pokonania drugiej części biegu
- B. Płotkarki w ostatnim okresie charakteryzują się większą masą ciała a także mniejszą liczbą kroków wykonywanych między płotkami.
- C. Wykorzystanie analizy regresji i analizy czynnikowej pozwoli na wyodrębnienie grup różnorodnych zmiennych (somatycznych, czasowych i przestrzennych) mających podobne znaczenie w ocenie strategii biegu na 400 m przez płotki
- D. Płotkarki o wyższym poziomie zaawansowania charakteryzują się niższym wskaźnikiem poziomu przygotowania technicznego
- E. Rekordy świata i Europy uzyskane w ostatnich latach są wynikiem kilku wybitnych indywidualności a nie szerokiej grupy najlepszych płotkarek

3. MATERIAŁ I METODY BADAŃ

3.1. Materiał

Materiał badawczy stanowią rezultaty otrzymane z analizy wstępnej 324 indywidualnych biegów na 400m ppł, w których uczestniczyło 151 biegaczek, podczas najważniejszych zawodów lekkoatletycznych rangi mistrzowskiej rozegranych w latach od 1978 do 2022 (Tabela 1). Powyższa liczba tzw. osobostarów w niewielkim stopniu ulega zmianom na poszczególnych etapach pracy. Wynika to z uwzględniania najnowszych danych, a także z elementami wykluczenia niektórych wyników.

Warunki włączenia:

1 Udział w finałowym biegu 400 m ppł kobiet imprezy rangi mistrzowskiej rozegranej w latach 1978 - 2022

Warunki wykluczenia danych:

1 W analizie pominięto wyniki zawodniczek, które nie ukończyły biegu lub istotnie zwolniły na ostatnich metrach nie widząc szans na sukces (wynik odcinka 10-F przekraczał dwukrotność SD).

2 Wyniki zawodniczek, które w późniejszym okresie zostały zdyskwalifikowane za doping, a okres karencji obejmował wyniki badań.

3 Nie wykorzystano niepełnych danych zamieszczonych w wybranych źródłach.

Ze względu na wspomniany fakt incydentalna część wyników została pominięta w analizie, co jednak nie rzutuje na całosciowe wyniki opracowania. Szczegółowe informacje na temat poziomu wydolnościowego, składu ciała i przygotowania technicznego rozpatrywanych zawodniczek przedstawiono w Tabeli 2.

Przyjęte cele pracy wymagały w niektórych częściach podziału całej grupy na jej części – ze względu na rozwój konkurencji (zmiany historyczne) oraz poziom wyników. Szczegółowe warunki podziału zamieszczono w dalszych rozdziałach pracy.

Tabela 1. Finałowe biegi na 400 m przez płotki uwzględnione w analizie

Ranga zawodów	Lata	Liczba zawodniczek
1. Igrzyska Olimpijskie (10)	1984,1988,1992,1996,2000,2004,2008, 2012,2016,2020	80
2. Mistrzostwa Świata (17)	1983,1987,1991,1993,1995,1997,1999,2001, 2003,2005,2007,2009,2011,2015,2017,2019, 2022	132
3. Mistrzostwa Europy (14)	1978,1982,1986,1990,1994,1998,2002,2006, 2010,2012,2014,2016,2018,2022	112
Razem:	1978-2022	324

Źródła: Sedlaceki i Matousek (1985), Moravec i Susanka (1986), Susanka i wsp. (1988), Glad i Brüggeman (1990), Susanka i wsp. (1990), König (1990), Ozolini i Balsewicz (1988), Moravec i wsp. (1990), Morita i Igarashi (1992), Yasui i wsp. (1996), Ditroilo i Marini (2001), Graubner i Nixdorf (2011), Lopez del Amo i wsp. (2012), Behm (1996-2020), Stephan i wsp. (2021), <https://worldathletics.org> (dostęp: marzec 2023).

*Rzetelność danych czasowych wykorzystywanych w analizie strategii biegu na 400 m przez płotki (m.in. w pracy Greene i wsp. 2008) potwierdził O'Donoghue (2015).

3.2. Analiza statystyczna

3.2.1. Podstawowe miary statystyczne

W analizie badanego materiału wykorzystano podstawowe miary statystyczne (liczebność, średnia arytmetyczna, odchylenie standardowe, itp.). Podstawowe miary statystyczne pozwoliły na stosunkowo przejrzystą prezentację wyników, co stanowiło punkt wyjścia do dalszych analiz.

3.2.2. Analiza korelacji rangowej Spearmana

Działania statystyczne miały na celu wyselekcjonowanie zmiennych, które w istotny sposób wpływają na końcowy rezultat biegu. W tym celu posłużono się właśnie korelacją rhoSpearmana, która jest nieparametrycznym odpowiednikiem korelacji r Pearsona. Korelacja Spearmana, nazywana też współczynnikiem korelacji rang, działa na porządkowanych

wynikach (rangowanych) niwelując wpływ braku rozkładu normalnego oraz przypadków odstających na wynik. Podobnie jak współczynnik R ocenia ona siłę i kierunek korelacji.

3.2.3. Analiza regresji (krokowa postępująca)

W celu oceny wpływu badanych parametrów na wynik biegu na 400 m przez płotki zastosowano krokową regresję postępującą. Analiza regresji krokowej umożliwia wprowadzenie do modelu tylko tych zmiennych, które istotnie przewidują zmienną zależną. Pierwsza zmienna w równaniu to ta, która ma najwyższą korelację ze zmienną Y. Zmienna pozostaje w równaniu, jeśli współczynnik regresji zmiennej różni się istotnie od zera. Kolejną zmienną wprowadzaną do równania jest ta, która ma najwyższą korelację z Y. (Y zostało skorygowane o wpływ pierwszej zmiennej). Jeżeli współczynnik regresji jest znaczący, dodanie kolejnej zmiennej odbywa się w ten sam sposób. Taki zabieg umożliwia wyłonienie tylko tych zmiennych, które rzeczywiście wpływają na predykcję zmiennej zależnej.

3.2.4. Analiza czynnikowa (eksploracyjna, EFA) - selekcja zmiennych wpływających na wyniki biegu 400 m ppł kobiet

Analiza czynnikowa to statystyczna metoda redukcji, której celem jest wyjaśnienie możliwych korelacji między niektórymi zmiennymi, biorąc pod uwagę wpływ innych czynników, których nie można zaobserwować. Istotą tej analizy jest zredukowanie dużej liczby zmiennych do łatwiejszego w zarządzaniu rozmiaru. Aby to zrobić, stosuje się serię liniowych kombinacji tych obserwowanych z innymi, które nie są widoczne.

W eksploracyjnej analizie czynnikowej celem jest poznanie ukrytych konstrukcji (które nie są widoczne) aby sprawdzić, czy mogą być poprawne. Mamy więc do czynienia z informacją typu eksploracyjnego, która służy do stworzenia późniejszego modelu, ale nie wiemy tego apriori.

W analizie uwzględniono 30 zmiennych, które istotnie korelowały z rezultatem biegu na dystansie 400 m ppł kobiet.

3.2.5. Analiza wariancji (ANOVA) –część I

Ocena różnic pomiędzy poszczególnymi grupami zawodniczek ze względu na lata startów.

W celu oceny różnic pomiędzy badanymi zmiennymi na przestrzeni lat startów zawodniczki podzielono na trzy grupy A (startujące w latach 1978-1996), B (startujące w latach 1997-2012) oraz C (startujące w latach 2013-2022). Podstawowe zmienne

somatyczne oraz analizowane rezultaty przedstawiono za pomocą podstawowych miar statystycznych (średnia i odchylenie standardowe). Do oceny różnic pomiędzy poszczególnymi grupami wykorzystano analizę wariancji ANOVA wraz z jej nieparametrycznym odpowiednikiem. Normalność rozkładów oceniano za pomocą testu Shapiro-Wilka. Jako test post hoc posłużono się testem Tukeya.

3.2.6. Analiza wariancji (ANOVA) – część II

Ocena różnic pomiędzy poszczególnymi grupami zawodniczek o zróżnicowanym poziomie sportowym.

Rezultaty poszczególnych zawodniczek ($n = 272$) podzielono na 3 grupy: najwyższego poziomu sportowego (wyniki poniżej 54,00 s – grupa A'), średniego poziomu 54,01-55,00 s – grupa B' oraz płotkarki o najsłabszych wynikach (powyżej 55,01 s – grupa C').

W ocenie różnic pomiędzy poszczególnymi grupami zawodniczek o zróżnicowanym poziomie sportowym wykorzystano identyczne metody jak podczas oceny różnic pomiędzy grupami w różnym okresie startów (rozdział 3.2.3).

W prezentacji wyników parametrów czasowych i parametrów przestrzennych zaprezentowano jedynie te zmienne, które wykazały istotne różnice pomiędzy grupami.

Wszystkie analizy zostały przeprowadzone z wykorzystaniem oprogramowania Statistica StatSoft 13 oraz języka programowania R wraz z dodatkowymi pakietami.

4. WYNIKI

4.1. Budowa ciała i przygotowanie motoryczne jako podstawowe parametry charakteryzujące najlepsze zawodniczki rywalizujące w biegu na 400 m przez płotki

W analizie uwzględniono finalistki (n=151) najważniejszych biegów w latach 1978 – 2022. Do scharakteryzowania grupy posłużyły: rekord życiowy 400m ppł: 53,71±0,89 s. (50,68-56,90), wiek jego uzyskania: 26,05±3,56 lat, wzrost: 172,41±5,17 cm, masa ciała: 59,52±4,57 kg, BMI: 20,02±1,19, rekord życiowy 400m: 51,89±1,22 s., indeks techniczny (WPT): 1,78±1,1 s. oraz wiek inicjacji sportowej: 18,16±2,83 lata i jej staż do uzyskania rekordu życiowego: 8,42±3,38 lat. Szczegółowe dane charakteryzujące grupę przedstawiono w Tabeli 2.

Dokonując korelacji zmiennych charakteryzujących grupę z PB 400m ppł wykazano umiarkowaną ($r = 0,41$) korelację jedynie z PB 400 m. Pozostałe zmienne charakteryzujące grupę, takiej jak wiek, masa ciała, wzrost, staż treningowy itd. mają niską korelację z PB 400 m ppł.

Tabela 2. Charakterystyka badanej grupy i korelacja poszczególnych parametrów z wynikiem biegu na dystansie 400m ppł.

Zmienna	Średnia	Mediana	Mini	Max	Odch.std	Skośność	Kurtoza	Korelacja (r)
PB 400m ppł (s)	53,71	53,74	50,68	56,90	0,89	0,44	0,31	
Wysokość ciała (cm)	172,41	173	157	184	5,17	-0,21	0,55	-0,14
Masa ciała (kg)	59,52	59	45	69	4,57	-0,25	0,26	-0,2
BMI	20,02	20,07	16,46	22,72	1,19	-0,38	-0,04	-0,12
Wiek uzyskania PB (lata)	26,05	26	14	37	3,56	0,29	0,45	0,18
Wiek inicjacji (lata)	18,16	17	18	30	2,83	0,99	0,99	-0,09
Staż (lata)	8,42	8	2	17	3,38	0,45	-0,34	-0,16
Wynik inicjacji 400m ppł (s)	58,05	57,58	53,02	64,56	2,32	0,42	-0,26	0,04
PB 400m (s)	51,89	51,90	49,24	56,91	1,22	0,39	0,39	0,41*
WPT (s)	1,78	1,79	-1,71	5,20	1,10	-0,16	0,27	-0,11

*p0,05 (PB – rekord życiowy, WPT- wskaźnik poziomu techniki)

4.2. Charakterystyka parametrów czasowych

Zmiany podstawowych zmiennych czasowych ($t_{0-1}, t_{1-2}, t_{2-3} \dots$) wskazują na stopniowe obniżanie prędkości biegu, ocenianej czasem pokonywania 9 odcinków 35-metrowych (Tabela 3). Każdy z odcinków biegu ma istotne znaczenie względem rezultatu końcowego, dodatkowo korelacja ta jest jeszcze silniejsza w drugiej połowie dystansu ($t_{5-6}, t_{6-7}, t_{7-8}, t_{8-9}$). W drugiej połowie dystansu obserwuje się również większe różnice pomiędzy wartościami minimalnymi a maksymalnymi czasu pokonania kolejnych przestrzeni ($t_{6-7}, t_{7-8}, t_{8-9}, t_{9-10}$). Największe wartości odchylenia standardowego odnotowano dla ostatniego odcinka biegu (t_{10-F}).

W analizie parametrów czasowych dodawanych (2JP) określono, że najwyższą korelację z wynikiem ma czas pokonania jednostek w T5-7, T6-8 i T7-9 (Tabela 4). Porównując czasy uzyskiwane w czasie pokonywania czterech jednostek płotkarskich wyznaczono, że najwyższa korelacja z rezultatem biegu dotyczy pokonania odcinka pomiędzy drugim i szóstym płotkiem. Czas pokonania pięciu jednostek płotkarskich ma bardzo dużą korelację w wyniku PB 400 m ppł, niezależnie od wybranej jednostki (5JP) (Tabela 4).

Wyższość drugiej części dystansu nad pierwszą ($r = 0,71$ vs. $r = 0,87$) potwierdziła analiza czasowych parametrów szacowanych (Tabela 5). Wykazano, że druga połowa dystansu jest pokonywana średnio o 3 sekundy wolniej od pierwszej, dodatkowo charakteryzuje się wyższym odchyleniem standardowym wynoszącym 0,85.

Tabela 3. Podstawowe parametry czasowe biegu na 400 m ppł kobiet (dane wyrażone w sekundach)

Zmienna	Średnia	Mediana	Mini	Max	Odch.std	Skośność	Kurtoza	Korelacja r
Podstawowe parametry czasowe (1PJ)								
t0-1	6,49	6,5	6	7,01	0,16	0,05	0,33	0,32
t1-2	4,18	4,19	3,86	4,6	0,13	0,21	-0,05	0,49
t2-3	4,26	4,24	3,96	4,7	0,13	0,50	0,06	0,56
t3-4	4,36	4,34	4	4,8	0,15	0,66	0,64	0,57
t4-5	4,48	4,48	4,2	4,88	0,13	0,54	0,11	0,65
t5-6	4,61	4,6	4,3	5,1	0,14	0,60	0,18	0,73
t6-7	4,75	4,73	4,39	5,4	0,15	0,42	0,61	0,72
t7-8	4,93	4,93	4,48	5,6	0,18	0,44	0,93	0,75
t8-9	5,10	5,1	4,62	5,8	0,17	0,44	0,69	0,72
t9-10	5,25	5,24	4,76	6	0,19	0,33	0,54	0,70
t10-F	6,07	6,04	5,21	8,1	0,35	1,21	4,79	0,48

(tx-y – czas potrzebny na pokonanie dystansu pomiędzy poszczególnymi płotkami)

Tabela 4. Czasowe parametry dodawane (dane w sekundach)

Zmienna	Średnia	Mediana	Mini	Max	Odch.std	Skośność	Kurtoza	Korelacja r
Dwie jednostki płotkarskie (2JP)								
T1-3	8,43	8,4	7,88	9,3	0,24	0,47	0,13	0,57
T3-5	8,83	8,8	8,24	10,1	0,25	0,91	2,27	0,68
T5-7	9,36	9,34	8,69	10,3	0,27	0,43	0,11	0,79
T7-9	9,99	10,1	8,87	11,4	0,53	-0,93	0,65	0,78
Trzy jednostki płotkarskie (3JP)								
T1-4	12,79	12,8	12,08	14	0,35	0,67	0,67	0,64
T4-7	13,83	13,8	12,92	15	0,37	0,41	-0,06	0,82
T7-10	15,27	15,24	13,95	17,4	0,47	0,42	0,87	0,81
Cztery jednostki płotkarskie (4JP)								
T1-5	17,26	17,2	16,28	18,8	0,44	0,71	0,59	0,70
T5-9	19,38	19,33	17,88	21,7	0,54	0,44	0,67	0,77

(Tx-y – łączny czas potrzebny na pokonanie dystansu pomiędzy wskazanymi płotkami).

Tabela 5. Czasowe parametry szacowane (dane w sekundach)

Zmienna	Średnia	Mediana	Mini	Max	Odch.std	Skośność	Kurtoza	Korelacja r
T _I 200H	25,71	25,67	24,24	27,76	0,59	0,59	0,66	0,71
T _{II} 200H	28,73	28,70	26,44	32,39	0,85	0,67	1,42	0,87
T _{II} 200H-T _I 200H	3,02	2,96	0,63	6,01	0,85	0,41	0,88	0,34
T _I 100mH	13,11	13,10	12,34	14,08	0,31	0,30	0,35	0,49
T _{II} 100m H	12,65	12,58	11,99	13,96	0,33	0,81	0,71	0,73
T _{III} 100m H	13,81	13,78	12,49	19,2	0,52	4,46	44,17	0,83
T _{IV} 100m H	14,79	14,92	13,28	17,61	1,75	-7,20	59,10	0,60

(T_I200H – czas pokonania pierwszej połowy dystansu, T_{II}200H – czas pokonania drugiej połowy dystansu, T_x100m H – czas pokonania kolejnych odcinków 100 metrowych).

4.3. Charakterystyka parametrów przestrzennych

Analiza liczby kroków wykonywana przez zawodniczki wskazuje, że średnio zawodniczki wykonują 184 kroki podczas pokonania dystansu 400 m ppł. Większość rozpoczyna bieg (dobieg do pierwszego płotka) wykonując 23 kroki, następnie kolejne przestrzenie, od pierwszego do siódmego płotka pokonują w rytmie 15 krokowym. W kolejnych dwóch przestrzeniach większość zawodniczek wykonuje szesnaście kroków, a w ostatniej przestrzeni (n9-10) wykonują siedemnaście kroków (Tab. 6). Na odcinku wybiegu (n10-F) zawodniczki wykonują od szesnastu do dwudziestu dwóch kroków, z medianą równą dwudziestu kroków. Fenomenem w ilości wykonywanych kroków jest Leah Nugent, która na Igrzyskach w 2016 r. pokonała pierwszą przestrzeń pomiędzy płotkami wykonując zaledwie trzynaście kroków, co jest rytmem dość charakterystycznym dla męskiej strategii biegu i praktycznie niespotykanym wśród kobiet. Nugent kolejne przestrzenie pokonywała w rytmie czternastokrokovym, ze zmianą na rytm piętnastokrokovy dopiero po pokonaniu 6 płotka. Największe rozpiętości w liczbie wykonanych kroków (6) jest charakterystyczna dla wybiegu (n10-F). Obserwuje się umiarkowaną korelację PB 400 m ppł z liczbą kroków wykonaną w drugiej części dystansu ($r=0,36$) i bardzo słabą korelację z pierwszą połową dystansu ($r=0,24$).

Tabela 6. Podstawowe parametry przestrzenne (liczba kroków)

Zmienna	Średnia	Mediana	Mini	Max	Odch.std	Skośność	Kurtoza	Korelacja r
n0-1	22,60	23,00	21,00	24,00	0,80	-0,22	-0,36	-0,09
n1-2	15,06	15,00	13,00	17,00	0,57	1,05	4,14	0,19
n2-3	15,05	15,00	14,00	17,00	0,56	1,22	4,07	0,14
n3-4	15,08	15,00	14,00	17,00	0,56	1,16	3,63	0,22
n4-5	15,12	15,00	14,00	17,00	0,57	1,13	2,99	0,26
n5-6	15,34	15,00	14,00	17,00	0,64	1,34	1,10	0,33
n6-7	15,55	15,00	14,00	17,00	0,71	0,73	-0,44	0,36
n7-8	15,94	16,00	14,00	18,00	0,78	0,19	-0,87	0,31
n8-9	16,32	16,00	15,00	18,00	0,76	0,23	-0,21	0,29
n9-10	16,59	17,00	15,00	19,00	0,75	0,04	0,19	0,30
n10-F	19,71	20,00	16,00	22,00	1,28	-1,18	1,11	0,29

(nx-y – liczba kroków wykonana pomiędzy poszczególnymi płotkami).

4.4. Analizy matematyczne w ocenie strategii biegu na 400 m przez płotki kobiet w ujęciu analizy regresji

W tej części dysertacji do wybrania zmiennych istotnie wpływających na rezultat biegu posłużono się analizą regresji krokowej postępującej z wykorzystaniem blisko 30

zmiennych – od podstawowych danych identyfikacyjnych (wiek, budowa ciała, WPT), podstawowych parametrów czasowych (1JP) do złożonych zmiennych przestrzennych.

Tabela 7. Parametry regresji dla zmiennej – czas biegu na 400 m przez płotki

Step	Entered	R-Square	R-Square	C(p)	RAMSE
1	t5_6	0,55	0,55	2140,13	0,73
2	t _{najwolniejsza}	0,77	0,77	1009,13	0,53
3	t2_3	0,83	0,83	666,81	0,44
4	t7_8	0,87	0,87	492,36	0,40
5	t10_F	0,90	0,90	330,78	0,35
6	t0_1	0,93	0,92	201,34	0,30
7	t6_7	0,95	0,94	105,51	0,26
8	t1_2	0,95	0,95	69,61	0,24
9	t4_5	0,96	0,96	34,16	0,22
10	t8_9	0,96	0,96	19,41	0,21
11	t3_4	0,97	0,96	6,40	0,21
12	WPT	0,97	0,96	6,30	0,21
13	wiek	0,97	0,96	5,28	0,20
14	N1_5	0,97	0,96	5,67	0,20

(wiek – wiek uzyskania PB (lata), WPT – wskaźnik poziomu techniki, tx_y – czas potrzebny na pokonanie wskazanego odcinka międzypłotkowego, N1_5 – liczba kroków wykonana pomiędzy 5 a 1 płotkiem).

Pośród potencjalnych predyktorów uwzględnionych w analizie, istotnie wpływające na rezultat biegu na 400 m ppł kobiet okazały się czasy uzyskane w poszczególnych przestrzeniach międzypłotkowych, za wyjątkiem odcinka pomiędzy 9 i 10 płotkiem (Tabela 13). Istotny wpływ na końcowy rezultat biegu mają także czas pokonania najwolniejszej przestrzeni międzypłotkowej ($t_{\text{najwolniejsza}}$), wiek, wskaźnik poziomu techniki (WPT) oraz liczba kroków wykonana pomiędzy 1 i 5 płotkiem. Nieistotne okazały się takie zmienne budowy ciała (BH i BW), wskaźnik BMI, staż treningowy oraz liczba kroków wykonana pomiędzy poszczególnymi płotkami.

4.5. Strategia biegu na 400 m przez płotki kobiet w ujęciu eksploracyjnej analizy czynnikowej (EFA)

Celem eksploracyjnej analizy czynnikowej jest wykrycie tych wspólnych czynników (nowego zbioru zmiennych), odpowiedzialnych za zachowanie się poszczególnych cech, czy też poszczególnych grup cech. Tak więc analiza czynnikowa EFA pozwoliła na wskazanie grup czynników istotnie wpływających na rezultat biegu na 400 m ppł kobiet.

Pierwszą grupą zmiennych (F1) istotnie korelujących z wynikiem są zmienne czasowe takie jak czasy potrzebne na pokonanie poszczególnych przestrzeni międzypłatkowych, czas pokonana najszybszej i najwolniejszej przestrzeni, rekord życiowy na 400 m oraz wskaźnik BMI (Tabela 8). W drugiej grupie zmiennych (F2) znalazły się parametry przestrzenne dodawane (N1-5, N6-10, N1-4, N4-7, N7-10, N1-10) oraz cechy budowy somatycznej BH i BW. Trzecią grupę zmiennych stanowią zmienne czasowe pierwszej (t1-2, t2-3, t3-4) i trzeciej (t7-8, t8-9, t9-10) sekcji biegu, czas wybiegu (t10-F) oraz czasy najszybszej i najwolniejszej przestrzeni międzypłatkowej. W grupie czwartej (F4) znalazły się zmienne wskazujące na doświadczenie startowe, mianowicie wiek i staż treningowy.

Tabela 4. Analiza EFA wybranych zmiennych w poszukiwaniu elementów strategii biegu na 400 m przez płotki

	F1	F2	F3	F4
Wysokość ciała (cm)	0,092	-0,413	-0,065	0,162
Masa ciała (kg)	-0,196	-0,369	0,070	0,080
BMI	-0,345	-0,019	0,165	-0,072
Wiek	-0,033	0,042	-0,250	1,042
Staż	-0,053	-0,088	0,020	0,615
Wiek inicjacji	0,012	0,172	-0,257	0,137
PB 400	0,503	-0,006	0,100	0,226
WPT	0,024	0,001	-0,097	-0,293
t0-1	0,415	0,049	-0,346	-0,046
t1-2	0,680	0,004	-0,459	0,001
t2-3	0,774	-0,043	-0,353	-0,005
t3-4	0,730	-0,068	-0,105	0,086
t4-5	0,786	-0,170	0,058	0,029
t5-6	0,838	-0,118	0,067	-0,091
t6-7	0,671	0,045	0,181	-0,074
t7-8	0,561	0,063	0,364	-0,017
t8-9	0,493	0,040	0,591	-0,053
t9-10	0,370	0,015	0,811	0,016
t10-F	0,054	0,135	0,605	0,087
t _{najszybsza}	0,723	0,003	-0,480	0,008
t _{najwolniejsza}	0,380	0,014	0,809	0,007
N1-5	-0,027	0,906	-0,258	-0,032

N6-10	0,062	0,864	0,178	0,157
N1-4	-0,058	0,904	-0,270	-0,044
N4-7	0,180	0,841	-0,047	0,036
N7-10	0,005	0,833	0,215	0,154
N1-10	0,006	0,934	0,099	0,126

F1- zmienne czasowe (Czynnik 1), F2- parametry przestrzenne (czynnik 2), F3- czynniki akcentują początkową i końcową część biegu (czynnik 3), F4- zmienne świadczą o przebiegu mistrzostwa sportowego (czynnik 4) (tx_y – czas potrzebny na pokonanie wskazanego docinka międzypłotkowego, PB400 – rekord życiowy na dystansie 400 m, WPT – wskaźnik poziomu techniki, staż – czas od momentu inicjacji do uzyskania PB w latach, wiek – wiek w chwili uzyskania PB w latach $T_{\text{najszybsza}}$ – czas pokonania najszybszej przestrzeni płotkarskiej, $T_{\text{najwolniejsza}}$ – czas pokonania najwolniejszej przestrzeni płotkarskiej, Nx-y – liczba kroków wykonana w poszczególnych jednostkach płotkarskich).

4.6. Różnica pomiędzy wybranymi parametrami biegu na dystansie 400 m ppł kobiet w różnych okresach czasowych

Pomimo ustanawiania kolejnych rekordowych rezultatów na przestrzeni ostatnich lat, średni poziom sportowy w biegu na 400 m przez płotki kobiet nie zmienił się istotnie od lat 90-tych XX wieku (Tabela 9). Zbliżone wartości (w całym okresie analizy) prezentują cechy dotyczące budowy ciała płotkarek – średnia wysokość ciał 172 cm, masa ciał na poziomie 60 kg oraz wskaźnik BMI wynoszący ok. 20.

Tabela 5. Charakterystyka najlepszych zawodniczek startujących na dystansie 400 m ppł z podziałem na okresy czasowe (n=142)

Zmienna	Grupa			ANOVA		
	A 1978-1996	B 1997-2012	C 2013-2022	F	p	Test Tukey'a
T400H (s)	54,24±0,94	53,95±0,89	53,93±1,20	4,07	0,05	AB* AC*
T400 (s)	51,84±1,94	51,91±1,30	51,79±1,35	0,24	NS	-
WPT* (s)	1,94±1,00	1,64±1,19	1,91±0,97	2,73	NS (0,07)	-
Wiek (lata)	25,04±3,64	26,85±3,50	26,20±3,24	8,53	0,01	AB** AC** BC*
Wiek inicjacji (lata)	19,67±2,83	18,33±2,90	16,07±1,54	40,41	0,001	AB* AC*** BC***
Wynik inicjacji (s)	56,45±1,55	58,66±2,25	59,41±2,05	56,56	0,001	AB*** AC*** BC*
Staż (lata)	5,37±2,67	8,52±3,01	10,13±3,55	46,26	0,001	AB*** AC*** BC***
Wysokość ciała (cm)	171,45±5,27	172,47±5,17	173,03±4,85	1,05	NS	-
Masa ciała (kg)	58,57±4,47	59,75±4,72	60,25±4,79	1,54	NS	-
BMI	19,91±1,05	20,08±1,28	20,11±1,21	0,40	NS	

(T400H – czas uzyskany na dystansie 400 m ppł, T400 – czas uzyskany na dystansie 400 m, WPT – wskaźnik poziomu techniki, Wiek – wiek uzyskania PB w latach). *-0,05; **-0,01; ***-0,001

Największe zróżnicowanie płotkarek z trzech grup dotyczy przebiegu kariery sportowej – obecnie zawodniczki są nieco starsze i zdecydowanie wcześniej rozpoczynają specjalizację w biegu na 400 m przez płotki. Wcześniejsze starty (średnio od 16. roku życia) sprawiają, że wyniki młodych płotkarek są zdecydowanie ($p \leq 0,001$) słabsze niż zawodniczek (o blisko 4 lata starszych) rozpoczynających specjalizację 30 lat temu. Obecnie czas potrzebny na osiągnięcia najlepszych wyników wydłużył się do ok. 10 lat – Tabela 9.

Analiza poszczególnych przestrzeni międzypłotkowych wskazuje na niewielkie ale istotne statystycznie różnice w pierwszej połowie biegu pomiędzy obserwowanymi grupami (Tabela 20). Strategia najszybszego „otwarcia” biegu obserwowana jest w grupie B, w tej też grupie obserwuje się najgorszy czas „wybiegu” (T10-F). Strategie biegowe grupy A i C charakteryzują się mniejszymi różnicami czasu pomiędzy odcinkiem rozpoczynającym, a kończącym bieg, co wskazuje na bardziej równomierne tempo biegu.

Śledząc czasy najszybszej ($t_{\text{najszybsza}}$) i najwolniejszej ($t_{\text{najwolniejsza}}$) przestrzeni istotne statystycznie różnice ($p \leq 0,001$) dotyczą jedynie jednostki najszybszej.

Podział biegu na sekcje (3JP i 4JP) pozwala przedstawić charakterystyczną strategię czasową biegu w trzech historycznych okresach:

- Płotkarki grupy A rozpoczynały bieg bardzo spokojnie, aby w końcowym biegu między płotkami uzyskać najlepsze czasy (Tabela 10).
- Grupa B to zdecydowanie najszybsze płotkarki w pierwszej części biegu (do 6.-7. płotka).
- Płotkarki ostatniego okresu (grupa C) pokonują dystans w tempie grupy poprzedniej, jednakże zachowują najwięcej sił na odcinek finiszowy (Tabela 10).

Współczesne zawodniczki (grupa C) minimalizują liczbę kroków między płotkami na każdym z etapów biegu. Największe różnice dotyczą początkowej części dystansu, którą najlepsze płotkarki świata pokonują w „rytmie” 14-krokowym.

Zachowawczy charakter rytmu kroków (=stały schemat 15-krokowy był charakterystyczny dla zawodniczek z grupy A) nie oznacza wzrostu poziomu sportowego. Zdecydowanie mniejsza liczba kroków w końcowej jego części jest charakterystyczna dla płotkarek ostatniego okresu – N7-10-N1-4; $p \leq 0,001$) (Tabela 10).

Tabela 6. Parametry czasowe najlepszych zawodniczek startujących na dystansie 400 m ppł z podziałem na okresy czasowe (n=142)

Zmienna	Grupa			ANOVA		
	A 1978-1996	B 1997-2012	C 2013-2022	F	p	Test Tukey'a
t0-1	6,57±0,16	6,44±0,14	6,49±0,16	17,72	0,001	AB*** AC**
t1-2	4,22±0,14	4,15±0,11	4,16±0,13	6,58	0,01	AB** AC*
t2-3	4,31±0,14	4,24±0,12	4,25±0,14	7,83	0,01	AB** AC*
t3-4	4,38±0,15	4,34±0,13	4,34±0,13	2,47	NS (0,08)	-
t4-5	4,51±0,14	4,45±0,12	4,48±0,14	3,14	0,05	AB*
t5-6	4,64±0,15	4,59±0,13	4,61±0,15	3,15	0,05	AB*
t6-7	4,76±0,14	4,74±0,17	4,73±0,14	0,25	NS	-
t7-8	4,92±0,17	4,94±0,19	4,93±0,15	0,35	NS	-
t8-9	5,09±0,16	5,09±0,17	5,10±0,17	0,03	NS	-
t9-10	5,20±0,17	5,26±0,19	5,26±0,20	2,47	NS (0,09)	-
t10-F	6,00±0,32	6,13±0,36	6,02±0,33	4,07	0,01	AB* BC**
t _{najszybsza}	4,21±0,14	4,14±0,11	4,16±0,13	7,31	0,001	AB*** AC*
t _{najwolniejsza}	5,21±0,17	5,27±0,19	5,26±0,19	2,39	NS	-
T1-4	12,91±0,38	12,73±0,30	12,76±0,35	6,75	0,001	AB*** AC*
T4-7	13,90±0,37	13,78±0,35	13,84±0,39	2,37	NS	-
T7-10	15,22±0,45	15,30±0,48	15,28±0,47	0,62	NS	-
T1-5	17,41±0,49	17,18±0,36	17,24±0,47	6,52	0,01	AB** AC**
T6-10	19,41±0,50	19,36±0,56	19,37±0,53	0,26	NS	-
T4-7-T1-4	0,99±0,33	1,05±0,31	1,08±0,23	1,80	NS	-
T7-10-T4-7	1,32±0,40	1,51±0,36	1,44±0,38	6,14	0,01	AB* AC*
T7-10-T1-4	2,32±0,51	2,47±0,50	2,51±0,45	6,74	0,001	AB*** AC***
T6-10-T1-5	2,57±0,57	2,86±0,56	2,77±0,52	6,70	0,001	AB*** AC***
t _{najwolniejsza} - t _{najszybsza}	0,92±0,62	1,12±0,22	1,10±0,21	7,19	0,001	AB*** AC*

(tx_y – czas potrzebny na pokonanie wskazanego docinka międzypłotkowego, PB400 – rekord życiowy na dystansie 400 m, WPT – wskaźnik poziomu techniki, staż – czas od momentu inicjacji do uzyskania PB w latach, wiek – wiek w chwili uzyskania PB w latach T_{najszybsza} – czas pokonania najszybszej przestrzeni płotkarskiej, T_{najwolniejsza} – czas pokonania najwolniejszej przestrzeni płotkarskiej, Nx-y – liczba kroków wykonana w poszczególnych jednostkach płotkarskich, Nx-y – N a-b – różnica liczby kroków wykonana pomiędzy poszczególnymi jednostkami płotkarskimi). *-0,05; **-0,01; ***-0,001

4.7. Różnice wybranych zmiennych między płotkarkami o zróżnicowanym poziomie (ANOVA)

Dokonując podziału zawodniczek ze względu na rezultaty osiągnięte w biegu na 400 m ppł, wyodrębniono trzy grupy różniące się w sposób istotny statystycznie ($p < 0,001$) (Tabela 12). Analiza budowy ciała zawodniczek poszczególnych grup wykazała istotne różnice w masie ciała oraz wskaźniku BMI, a także brak różnic w wysokości ciała. Wartości parametru BMI i masy ciała rosną odwrotnie proporcjonalnie do czasu potrzebnego zawodniczkom na pokonanie dystansu 400 m ppł, co wskazuje na lepszy poziom sportowy zawodniczek o mocniejszej budowie ciała. Średni wiek zawodniczek z najszybszej grupy (A') wynosi prawie 27 lat i jest blisko o 2 lata wyższy niż w grupie zawodniczek najwolniejszych (C').

Istotne różnice odnotowano także dla średnich wartości rezultatów uzyskanych na dystansie 400 m oraz w przypadku parametru TI. Wartości te różnią się istotnie pomiędzy wszystkimi grupami osiągając najniższe wartości w grupie najszybszych zawodniczek. Wskazuje to na lepszą wydolność zawodniczek oraz znacznie lepsze przygotowanie techniczne.

Tabela 7. Różnice w budowie ciała i zdolności motorycznych między płotkarkami o zróżnicowanym poziomie sportowym

Zmienna	Grupa			F	p	ANOVA		
	A'	B'	C'			A-B	A-C	B-C
T400H	53,38±0,42	54,51±0,29	55,83±0,67	612	0,001	xxx	xxx	xxx
Wiek	26,94±3,68	25,63±3,06	25,14±3,70	5,12	0,05		xx	
Wysokość ciała	172,56±5,23	172,76±5,36	172,26±5,52	0,23	NS			
Masa ciała	60,60±4,34	59,74±4,10	58,93±4,48	3,49	0,05		xx	
BMI	20,34±1,00	20,02±1,11	19,86±1,16	4,70	0,01	x	xx	
PB400m	51,34±1,14	51,99±1,08	52,44±1,24	20,31	0,001	xxx	xxx	xx
WPT	2,04±1,37	2,52±1,66	3,39±1,46	9,93	0,001	xx	xxx	xx

*n = 272 biegi x-0,05; xx-0,01; xxx-0,005 (T400H – wynik na dystansie 400 m ppł, Wiek – wiek uzyskania rezultatu na dystansie 400 m ppł, PB400m – rekord życiowy na dystansie 400 m, WPT – wskaźnik poziomu techniki).

Tabela 8. Różnice wybranych parametrów czasowych między płotkarkami o zróżnicowanym poziomie sportowym

Zmienna	Grupa			F	p	ANOVA		
	A'	B'	C'			A-B	A-C	B-C
T4-7-T1-4	0,94±0,25	1,07±0,30	1,11±0,36	6,36	0,001	xx	xxx	
T7-10-T4-7	1,37±0,33	1,51±0,39	1,46±0,44	3,01	NS			
T7-10-T1-4	2,31±0,42	2,58±0,47	2,57±0,58	7,86	0,001	xxx	xxx	

*n = 272 biegi x-0,05; xx-0,01; xxx-0,005 (Nx-y – N a-b – różnica liczby kroków wykonana pomiędzy poszczególnymi jednostkami płotkarskimi).

Tabela 9. Różnice wybranych parametrów przestrzennych między płotkarkami o zróżnicowanym poziomie sportowym

Zmienna	Grupa			F	p	ANOVA		
	A ‘	B’	C’			A-B	A-C	B-C
N1-4	45,02±1,25	45,26±1,23	45,63±1,84	2,72	0,05		x	
N4-7	45,56±1,23	46,10±1,73	46,90±2,05	12,40	0,001	x	xxx	xx
N7-10	48,39±1,63	49,12±1,99	49,72±2,32	8,95	0,001	x	xxx	
N4-7-N1-4	0,54±0,82	0,84±0,98	1,27±1,17	10,77	0,001	x	xxx	xx
N7-10-N1-4	3,37±1,40	3,86±1,69	4,09±1,94	3,85	0,05	x	xxx	
N7-10-N4-7	2,83±1,22	3,02±1,51	2,82±1,49	0,60	NS			

*n = 272 biegi; x-0,05; xx-0,01; xxx-0,005(Nx-y – liczba kroków wykonana w poszczególnych jednostkach płotkarskich , Nx-y – N a-b –różnica liczby kroków wykonana pomiędzy poszczególnymi jednostkami płotkarskimi).

Dokonując analizy dystansu 400 m ppł z uwzględnieniem podziału pod względem poziomu sportowego obserwuje się najmniejsze różnice czasowe pomiędzy poszczególnymi częściami dystansu (T4-7-T1-4; T7-10-T4-7; T7-10-T1-4) wśród zawodniczek z najszybszej grupy. Analiza wariancji (ANOVA) wykazała istotne zmiany pomiędzy różnicami wybranych parametrów czasowych, tj. różnic pomiędzy pierwszą i drugą częścią dystansu, pomiędzy grupą najszybszych (A’) i najwolniejszych (C’) zawodniczek, oraz pomiędzy grupą najszybszych zawodniczek (A’) i grupą średniego poziomu (B’) (Tabela 13).

Analiza parametrów przestrzennych wskazuje, że zawodniczki z najszybszej grupy (A’) wykonują najmniejszą liczbę kroków w każdej z ocenianych części dystansu. Analiza wariancji (ANOVA) potwierdziła występowanie istotnych różnic w liczbie kroków pomiędzy grupą najszybszych (A’) i najwolniejszych (C’) zawodniczek we wszystkich częściach dystansu oraz wskazuje na wystąpienie istotnych różnic pomiędzy grupą najszybszą (A’) i grupą o średnim poziomie (B’) dla drugiej (N4-7) i trzeciej (N7-10) części dystansu (Tabela 14).

Istotne różnice pomiędzy grupami o różnym poziomie sportowym wykazano także w kontekście analizy różnicy liczby kroków pomiędzy drugą i pierwszą sekcją (N4-7-N1-4) oraz pomiędzy trzecią i pierwszą (N7-10-N1-4) sekcją biegu.

DYSKUSJA

Wyniki niniejszej analizy nie wskazują aby parametry budowy somatycznej w istotny sposób wpływały na końcowy rezultat biegu płotkarskiego. Zależności takich nie zaobserwowano ani w stosunku do całości badanej grupy ani w podziale zawodniczek na grupy w zależności od okresu startów.

Za bark istotnych korelacji z wynikiem biegu na 400 m ppł kobiet może odpowiadać duża homogenność grupy – w przeciwieństwie do pracy Wesołowskiej (2006) w niniejszym badaniu oceniano tylko finalistki najważniejszych imprez lekkoatletycznych.

Wpływ techniki pokonywania płotka na końcowy rezultat biegu jest kwestią dyskusyjną, a jej ocena kinematyczna w warunkach startowych jest stosunkowo trudna. Ze względu na owe trudności w wielu pracach obrazujących i porównujących biomechanikę pokonywania płotków oraz wpływ zmęczenia na zaburzenia techniki biegu wykorzystywane są pomiary w warunkach izolowanych, jedynie próbujące odwzorować warunki panujące w trakcie właściwej rywalizacji (Guex, 2012).

Częstym motywem badawczym jest porównanie techniki pokonywania płotków wraz ze wzrostem zmęczenia, oceniane są wówczas takie parametry jak długość kroku przed i po pokonaniu płotka, położenie środka ciężkości oraz zmiany pozycji (ułożenia tułowia i kończyn) (Schwartz i wsp., 1990; Krzeszowski i wsp., 2016; Iwasaki i wsp., 2022). Kluczową kwestią techniki pokonywania płotków jest jednak jej użytkowy charakter, który powinien zapewniać jak najmniejsze spadki prędkości i wynikające z nich straty czasowe. Zachować należy tzw. „płynność biegu”, która pozwala na optymalizację energii wydatkowanej na bieg. Indeks techniczny (TI), a więc różnica pomiędzy rezultatem osiągniętym na dystansie płotkarskim, a na dystansie płaskim wydaje się skuteczną metodą do oceny techniki pokonywania płotków w ujęciu użytkowym biegu (Iskra i wsp., 2022).

Niniejsze analizy nie wykazały aby TI istotnie korelował z wynikiem biegu na dystansie 400 m ppł kobiet w odniesieniu do finalistek najważniejszych zmagania lekkoatletycznych. Fakt ten można tłumaczyć bardzo dobrym przygotowaniem technicznym u wszystkich zawodniczek. Wskaźnik TI rośnie proporcjonalnie do uzyskanych rezultatów, jego wartość jest najniższa w grupie zawodniczek o najwyższym poziomie (najlepszych rezultatach uzyskanych na dystansie 400 m ppł).

Analiza korelacji parametrów biegu istotnie wpływających na końcowy rezultat biegu wykazała najwyższą korelację z parametrami czasowymi – zarówno pojedynczymi (1JP) jak i dodawanymi (łączącymi od dwóch do kilku JP). Czas pokonania odcinka pomiędzy 6 a 10 płotkiem wydaje się być jednym z najbardziej istotnych parametrów decydującym o rezultacie biegu na dystansie 400 m ppł kobiet. Rozłożenie dystansu na pojedyncze odcinki (1 JP) wskazuje, że najistotniejszym fragmentem biegu jest drugi wiraż, a czasy potrzebne na pokonanie poszczególnych odległości międzypłotkowych tego fragmentu wykazują najwyższą korelację z wynikiem końcowym. Analiza struktury przestrzennej nazywanej potocznie „rytmem płotkarskim” również wykazała, że najwyższe wartości korelacji z wynikiem końcowym przypadają na fragment biegu pomiędzy 5 a 8 płotkiem. Najbardziej prawdopodobnym wyjaśnieniem tego zjawiska jest zmiana „rytmu” – dołożenie jednego lub dwóch kroków w tym fragmencie biegu, co istotnie wpływa na czas pokonania przestrzeni płotkarskiej po zmianie liczby kroków oraz możliwości popełnienia błędu związanego z dostosowaniem długości kroków po zmianie „rytmu biegu”. Znaczenie zmiennych odnotowywanych na drugim wirażu biegu potwierdzono m. in. w pracach McFarlane (2004) oraz Iskry i wsp. (2022).

Stosunkowo często wykorzystywanym podziałem dystansu 400 m ppł jest podział na trzy części, tj. T1-3, T4-7, T7-10. Zasadniczo ten podział dotyczy jedynie części płotkarskiej (n1-10), z pominięciem odcinka dobiegu (od startu do pierwszego płotka) oraz odcinak wybiegu (od ostatniego płotka do linii mety), nie mniej jest często stosowany w wielu opracowaniach naukowych. Klasyfikacja ta została poparta wcześniejszymi analizami metabolicznymi i biomechanicznymi oraz obserwacjami prowadzonymi przez trenerów (Yasui i wsp. 1996; Lopez del Amo i wsp. 2012). Analiza różnic czasowych, szczególnie różnic pomiędzy fragmentem trzecim (T7-10) a fragmentem pierwszym (T1-4) jest najniższa wśród kobiet startujących w latach 1978-1996 i wzrasta w kolejnych okresach. Wyniki te wskazują, że współczesne zawodniczki preferują strategię szybkiego otwarcia biegu. Wyniki te są zbieżne z analizą czasów potrzebnych na pokonanie pojedynczych przestrzeni płotkarskich, gdzie średnie czasy potrzebne na pokonanie poszczególnych przestrzeni w pierwszej połowie dystansu ($t_{0-1}...t_{5-6}$), są wyższe i istotnie różne od czasów uzyskiwanych przez zawodniczki startujące w okresach 1977-2012 oraz 2013-2022.

Analiza czasowa dystansu uwzględniająca podział na dwie połowy ukazuje, że pierwsza połowa jest pokonywana średnio o 3 sekundy szybciej niż druga. Analizy wskazują jednak, że czas pokonania drugiej połowy dystansu jest ważniejszy w kontekście

rezultatu końcowego. Wartość różnicy parcjalej pomiędzy pierwszą i drugą połową części płotkarskiej, a więc różnicy pomiędzy czasem pokonania odcinka pomiędzy 6 a 10 płotkiem w porównaniu do czasu potrzebnego na pokonanie dystansu pomiędzy 1 a 5 płotkiem wynosi średnio 2,75 s. dla całej badanej grupy. Uwzględniając podział zawodniczek na okresy startowe zauważa się, że zawodniczki pierwszego okresu (lata 1978-1996) preferowały równe tempo na przestrzeni całego dystansu, czego efektem są najmniejsze odnotowane różnice pomiędzy czasem potrzebnym na pokonanie pierwszej i drugiej części dystansu. O różnicach strategii biegu na dystansie 400 m ppł w grupie elitarnych zawodników płci męskiej pisali Iskra i wsp. (2021). Na podstawie swoich analiz wskazali, że klasyczny schemat równej strategii biegu powinien charakteryzować się jak najmniejszą różnicą pomiędzy pierwszą i drugą połową dystansu, nie przekraczając 2,5 s.

Najczęściej wykorzystywana analiza regresji w odniesieniu do biegu na 400 m przez płotki dotyczy czasu końcowego. W analizie uwzględniającej rekordowe wyniki w konkurencji mężczyzn uwzględniono przede wszystkim drugą część dystansu (II200H), zarówno w ujęciu czasowym, jak i przestrzennym (liczba kroków) – Iskra i wsp. (2023).

Analiza własna (400 m przez płotki kobiet) nie potwierdza rezultatów zebranych w analizach dystansu męskiego. Najważniejszy parametr (t5-6) potwierdza wyniki wielu analiz, które właśnie w tym miejscu (tzw. „wejście w wiraż”) uzasadniają pierwsze zmiany „rytmu kroków” (Brüggeman i Susanka 1988, Ditroilo i Marini 2000, Grouner i Nixdorf 2011, Iskra i wsp. 2022).

Drugi parametr uwzględniony w analizie regresji, dotyczy końcowego odcinka drugiego wirażu (t7-8). Analiza regresji dotycząca całego dystansu potwierdza także znaczenie najwolniejszego odcinka biegowego. Jeżeli czas tego fragmentu biegu jest znaczący (=wysoka prędkość biegu), to może być decydujące w końcowym rezultacie (Iskra 2014; Iskra i wsp., 2023).

O mistrzostwie technicznym świadczy bieg między płotkami, czyli dystans od pierwszego do dziesiątego płotka (T1-10). W tej wersji analizy regresji decydujące znaczenie w przypadku dystansu męskiego ma dystans między czwartym a siódmym płotkiem. Te trzy odległości między płotkami wskazywane są jako kluczowe według wielu zawodników i trenerów (Iskra, 1999; Boyd, 2000; Greene, 2008; McFarlane, 2004), znajdują także potwierdzenie w analizach przeprowadzonych w trakcie najważniejszych imprez światowych (zestawienie źródeł przedstawiono w pracy Iskry 2023). W przypadku grupy kobiet (badania

własne) odcinki najważniejsze zostały przesunięte o jeden płotek (t5-6, t7-8), jednakże w dalszym ciągu wskazują na decydujące znaczenie drugiego wirażu. Tak jak w przypadku całościowego ujęcia biegu zmienne przestrzenne (kroki międzypłotkowe) są zdecydowanie podrzędne. Zebrane dane potwierdzają nowe podejście do biegania kobiet na dystansie 400 m ppł, podkreślając znaczenie biegu po drugim wirażu oraz znaczenie tego elementu w nauczaniu i treningu (Iskra i Walaszczyk, 2007).

Uwzględnienie zmiennych dotyczących wybranej (jednej z trzech) części biegu pozwala na wyodrębnienie najbardziej reprezentatywnych parametrów. Wyniki badań potwierdziły wcześniejsze spostrzeżenia; najlepsze części dystansu to – t2-3 (pierwsza część biegu), t5-6 (druga, środkowa część biegu) oraz t8-9 (ostatnia część). Wg wielu szkoleniowców może to mieć istotne znaczenie w kontroli treningu sportowego i analizy skuteczności startowej (Boyd 2000, Hemeed i wsp. 2020, McFarlane 2004, Ozaki i wsp. 2019).

Powyższy opis strategii czasowej i przestrzennej pokonania dystansu 400 m ppł jest jedynie próbą określenia średnich parametrów analizowanej grupy lub stosownych jej podgrup. Wybór optymalnej strategii jest rzeczą indywidualną i powinien być dopasowany do warunków fizycznych zawodniczki oraz jej zdolności koordynacyjnych i wytrzymałości.

Historia startów na dystansie 400 m ppł pokazuje, że trudno jest wskazać najskuteczniejszą strategię wśród istniejących taktyk. Finałowe zawody rozgrywane podczas Igrzysk Olimpijskich i Mistrzostw Świata wskazują, że o zwycięstwie decydują różne strategie, tj. od utrzymywania wysokich prędkości przez cały wyścig, przez zrównoważone strategie szybkościowe („technika” przez płotki), po oczekiwanie na finałowy etap („strategia wytrzymałościowa”) (Behm, 2016; Quercetani 2009).

Obserwowany w ostatnich latach wzrost poziomu sportowego zarówno wśród kobiet jak i mężczyzn biegających dystans 400 m ppł jest składową wielu elementów z pogranicza treningu i technologii. Wybitne wyniki uzyskane w ostatnich latach są wynikiem kilku wybitnych indywidualności a nie szerokiej grupy najlepszych płotkarek. Analiza biegu najlepszych zawodniczek oraz wskazanie kluczowych fragmentów biegu może przyczynić się do zmian w sposobie i metodach treningu pośród pozostałych zawodniczek, co może doprowadzić do wyrównania poziomu sportowego a finalnie zwiększyć atrakcyjność rywalizacji na dystansie 400 m przez płotki kobiet.

WNIOSKI

I. Odpowiedzi na pytania badawcze:

1. Spośród analizowanych parametrów mistrzostwa sportowego w biegu na 400 m przez płotki kobiet jako najważniejsze parametry należy wskazać parametry czasowe. Zmienne determinujące parametry przestrzenne („rytm płotkarski”) wykazują znacznie niższą korelację z wynikiem końcowym, a podstawowe parametry identyfikujące zawodniczek (tj. parametry budowy ciała oraz wiek i rozwój kariery sportowej) niemal nie wykazują związku z wynikiem końcowym w grupie elitarnych zawodniczek rywalizujących na dystansie 400 m przez płotki.

2. Najistotniejszymi zmiennymi wpływającymi na końcowy rezultat biegu na dystansie 400 m ppł są parametry czasowe odnotowane w drugiej połowie dystansu (T_{6-10}), z których najwyższą wartość korelacji z wynikiem końcowym wykazuje czas potrzebny na pokonanie przestrzeni pomiędzy 7 i 8 płotkiem (t_{7-8}).

3. Analiza regresji wskazuje odcinek pomiędzy 5 i 6 płotkiem (t_{5-6}) jako najistotniejszą zmienną biegu. Podział dystansu na trzy części wskazuje, że najistotniejszymi fragmentami są odpowiednio t_{2-3} , t_{5-6} oraz t_{8-9} . Analiza czynnikowa pozwoliły z kolei na usystematyzowanie wszystkich analizowanych zmiennych i podział ich na cztery główne grupy: zmienne czasowe (Czynnik 1), parametry przestrzenne (czynnik 2), czynniki akcentujące początkową i końcową część biegu (czynnik 3) oraz zmienne świadczą o przebiegu mistrzostwa sportowego (czynnik 4).

4. Różnica w strateg biegu z uwzględnieniem różnych poziomów zaawansowania zawodniczek wskazuje na zmiany w liczbie wykonywanych kroków, która jest istotnie mniejsza w grupie najszybszych zawodniczek.

5. Zmiennymi w największym stopniu różnicującymi grupy płotkarek w ujęciu historycznym są średnie czasy potrzebne na pokonanie poszczególnych przestrzeni w pierwszej połowie dystansu ($t_0-1...t_{5-6}$). Czasy te u zawodniczek pierwszego okresu są wyższe i istotnie różne od czasów uzyskiwanych przez zawodniczki startujące w okresach 1977-2012 oraz 2013-2022. Wyniki te wskazują, że współczesne zawodniczki preferują strategię szybkiego otwarcia biegu.

II. Weryfikacja hipotez:

A. Potwierdzono hipotezę, że o sukcesie w biegu na 400 m przez płotki kobiet decyduje czas pokonania drugiej części dystansu.

B. Potwierdzono hipotezę, że płotkarki w ostatnim okresie charakteryzują się większą masą ciała a także wykonują mniejszą liczbą kroków między płotkami.

C. Wykorzystanie analizy regresji i analizy czynnikowej pozwoliło na wyodrębnienie grup różnorodnych zmiennych mających znaczenie w ocenie strategii biegu na 400 m przez płotki. Analiza regresji wskazuje odcinek pomiędzy 5 i 6 płotkiem (t5-6) jako najistotniejszy fragment biegu. Podział dystansu na trzy części wskazuje, że najistotniejszymi fragmentami są odpowiednio t2-3, t5-6 oraz t8-9. Analiza czynnikowa pozwoliła z kolei na usystematyzowanie wszystkich analizowanych zmiennych i podział ich na cztery główne grupy.

D. Nie potwierdzono hipotezy aby płotkarki o wyższym poziomie zaawansowania charakteryzowały się niższym wskaźnikiem poziomu przygotowania technicznego.

E. Potwierdzono, że rekordy świata i Europy uzyskane w ostatnich latach są wynikiem kilku wybitnych indywidualności a nie szerokiej grupy najlepszych płotkarek.

PIŚMIENNICTWO

1. Adamczyk, JG, Boguszewski D, Siewierski M. 2012. Somatic build of female 400-metres hurdles runners. *Fiziceskoe vospitanie studentom*; 2:108-113.
2. Amara S, Mkaouer B, Chaabene H, Negra Y, Hammoudi-Riahi S, Bensalah F. 2017. Kinetic and kinematic analysis of hurdle clearance of an african and a world champion athlete: A comparative study. *South African Journal for Research in Sport, Physical Education and Recreation*; 39:1-12
3. Arnold M. 1980. *Hurdling*. London: British Athletic Board, London.
4. Balsalobre-Fernández C, Tejero-González CM, Del Campo-Vecino J, Alonso-Curiel D. 2013. The Effects of a Maximal Power Training Cycle on the Strength, Maximum Power, Vertical Jump Height and Acceleration of High-Level 400-Meter Hurdlers. *Journal of Human Kinetics*; 36(1):119-126.
5. Bankin WN. 1995. Analysis of the competitive activity of young runners of various qualifications in the 400 m hurdles. *Teoria i Praktyka Fizycznej Kultury*; 3:3-6.
6. Beckenham M, Rosemond D. 2006 Establishing an ideal stride pattern for a potential elite female 400 m hurdle. *Modern athlete and coach*; 44(4):3-11.
7. Buttlar M. 2012. IAAF World Junior Championships in Athletic. *Statistics handbook. International Amateur Athletic Federation*, Monaco.
8. Brejzer W. 1985. Women's 400 m hurdles training. *Modern Athlete and Coach* 3; 42-43.
9. Brejzer W. 1986. Na dystancii. *Legkaja Atletika*; 10:16-17.
10. Brejzer W, Kajtmazowa J. 1979. Bieg R. Nehemiaha. *Legkaja Atletika*; 1:14-15.
11. Brejzer W, Korchemny R. 1990. The preparation of women for the 400 metres hurdles. *New Studies in Athletics*; 4:21-28.
12. Carnes J. 2000. Hurdle triumphs of the past century. *Track and Field Coaches Review*; 3:28-29.
13. Carr G. 1997. *Mechanics of Sport. Human Kinetics, Champaign, IL*. Comstock (1929)
14. Čoh M, Jost B, Skof B. 2000. Kinematic and dynamic analysis of hurdle clearance technique. [w]: (red.: Y. Hong), *Proceedings of 18th International Symposium on Biomechanics in Sports*. Hong Kong: Departament of Sports Science and Physical Education, The Chinese University of Hong Kong, pp. 236-239.

15. Čoh M. 2003. Biomechanical analysis of Colin Jackson's hurdle clearance technique. *New Studies in athletics*; 1:33-40.
16. Čoh M. 2004. Biomechanical analysis of 110 m hurdle clearance technique. *Modern Athlete and Coach*; 42(4):4-8.
17. Čoh M., Iskra J. 2012. Biomechanical studies of 110 m hurdle clearance technique. *Sport Science*; 5(1):10-14.
18. Dundar S, Yapıcı A, Çelik E, Yaan T. 2015. A record Holder Female Athlete,s Training Loads and its Distribution in Women 400 meter Hurdle Running. *International Journal of Sport Culture and Science*; 3(3):35-43.
19. Ewen S. 1975 Některá čísla a fakta z běhu na 400 m perek žen. *Atletika*; 20-21. [W]: Le 400 m haies feminina. *Education Physique et Sport*; 146:51-54.
20. Falbriard M. 2020. Hurdle Clearance Detection and Spatiotemporal Analysis in 400 Meters Hurdles Races Using Shoe-Mounted Magnetic and Inertial Sensors. *Sensors (Basel)*; 8 20(2):354.
21. Gołębiowski W, Stroynowski J. 1956. *Królowie ringu i bieżni*. Wydawnictwo Iskry, Warszawa.
22. Greene D, Leyshon W, O'Donoghue PG. 2008. Elite male 400 m hurdle tactics are influenced by race leader. In: World Congress of Performance Analysis of Sport. Otto von Guericke University, Magdeburg, 8.
23. Guex K. 2012. Kinematic Analysis of the Womanis 400m Hurdles. *New Studies in Athletics*; 27(1/2):41-61.
24. Gupta S, Goswami A, Mukhopodhayay S. 1999 Heart rate and blond lactate in 400 m flat and 400 m hurdles running. A comparative study. *Indian Journal Physiology and Pharmacology*; 43:361–366.
25. Gurchiek RD, McGinnis RS, Needle AR, McBride JM, van Werkhoven H. 2017. The use of a single inertial sensor to estimate 3-dimensional ground reaction force during accelerative running tasks. *Journal of Biomechanics*; 16(61):263-268.
26. Hamacher H. (2007) *Leichtathletik in 19. Jahrhundert: Band I (1891-1900), Band II (1881-1890)*. Dusseldorf. [W: German; eng.: Athletics in XIX centenary. *History and statistics*]. (522+748 pp.).
27. Heazelwood J. 2015. Convergence and Divergence of Performances Across the Athletic Events for Men and Women: A Cross-Sectional Study 1960–2012. [W: Proceedings of the 10th International Symposium on Computer Science in Sports (ISCSS). Cham: *Springer International Publishing*; 145-151.

28. Hill AV, Lupton H. 1923 Muscular Exercise, Lactic Acid, and the Supply and Utilization of Oxygen, *QJM: An International Journal of Medicine*; 16(62):135–171.
29. Hill AV. 1925. "Memories and reflections (unpublished manuscript)." *The AV Hill Papers, Churchill Archives, Cambridge, England*.
30. Hochmuth G. 1984. *Biomechanik sportlicher Bewegungen*. 5 Auflage, Sportverlag, Berlin (Ost).
31. Holl H. 1888. *The science and art of training: a handbook for athletes*. London, Trubner. (124 pp).
32. Hommel H. 1988. NSA photosequences 4- 110 m hurdles– Stephane Caristan (Fra). *New Studies in Athletics*; 2:75-82.
33. Hommel H. 1990. NSA photosequences 14- 400 m – Andre Phillips and Edwin Moses. *New Studies in Athletics*; 5(4):64-72.
34. Hommel H, Vernon J. 1991. NSA photosequences 16- 100 meters hurdles– Yordanka Donkova. *New Studies in Athletics*; 6(2):67-71.
35. Hommel H, Arnold J. 1993. NSA photosequences 26 - 110 meters hurdles: Roger Kingdom. *New Studies in Athletics*; 8(2):65-72.
36. Hyjek-Młynarczyk K, Piechota K., Iskra J., Pietrzak M. 2017. The EMG analysis of hurdler's upper limb muscles in the period of specialized exercises. *Scientific Review of Physical Culture*; (92):190-195.
37. Hyjek-Młynarczyk K, Iskra J. 2020. Arm action in hurdle clearance in groups of different age and sport level. *Journal of Physical Education & Health Social Perspective*; 9(16):37-47.
38. Hymanas R 1999. *IAAF progression of world best performances and official world record*. IAAF, Monaco.
39. Iliew I, Primakow J. 1978. Faktornata struktura na teknikata w bieganeto na 110 m s priepastwia. *Trenorska Misl*; 4:7-13.
40. Iskra J. 1998. *Biegi przez płotki. Teoretyczne podstawy i praktyczne rozwiązania*. Katowice.
41. Iskra J. 1999. *Bieg na 400 m przez płotki*. Uniwersytet Rzeszowski, Rzeszow.
42. Iskra J, Bacik B. 1999. Hurdle clearance technique of Europe-an Champion in 400 m. *Kinesiologia Slovenic*;, 5:70.
43. Iskra J, Bacik B, Król H. 2000. The effect of specific exercises on changes in hurdle technique. W: (red. J. Raczek, Z. Waśkiewicz, G. Juras). *Current Research in Motor Control*. Katowice, University School of Physical Education; 104-117.

44. Iskra J, Waśkiewicz Z, Bacik B. 2003. The structure on the hurdlers stride among world class athletes in light of factor analysis. *Antropomotoryka*; 25:47-52.
45. Iskra J. 2005. *Rozwój biegów przez płotki na świecie i w Polsce do 2004 roku*. Politechnika Opolska, Opole 2005.
46. Iskra J, Walaszczyk A. 2007. Types of stride pattern and time distribution in elite 400-m hurdlers. *Motor Control*; 11:185–186.
47. Iskra J, Coh M. 2011. Biomechanical studies on running the 400 m hurdles. *Human Movement*; 4:315-323.
48. Iskra J. 2012. Athlete typology and training strategy in the 400m hurdles. *New Studies in Athletics*; (1-2):27-37.
49. Iskra J. 2014. *Trening płotkarzy na 400 m*. AWF, Katowice.
50. Iskra J, Przednowek K. 2016. Influence of fatigue in the selected kinematic parameters of hurdle clearance in 400 m race – in search of an accurate training test. W: 34th International Conference on Biomechanics in Sports, Tsukuba; 687-690.
51. Iskra J, Matusiński A, Otsuka M, Guex KJ. 2021. Pacing Strategy in Men's 400 m Hurdles Accounting for Temporal and Spatial Characteristics of Elite Athletes. *Journal of Human Kinetics*; 79:175-186.
52. Iskra J, Przednowek K, Domaradzki J, Coh M, Gwiazdoń P, Mackała K. 2022. Temporal and Spatial Characteristics of Pacing Strategy in Elite Women's 400 Meters Hurdles Athletes. *International Journal of Environmental Research and Public Health*; 19(6):3432.
53. Iskra J. 2023. *Strategia biegu na 400 m przez płotki mężczyzn*. Politechnika Opolska, Opole.
54. Iwasaki R, Shinkai H, Nunome H, Ito N. 2022. Kinematic Factors Associated with Hitting Hurdles during the Initial Phase of a 110-m Hurdle Race. *Journal of Human Kinetics*; 83:5-12.
55. Kaufmann E. 1976. Biomechanical analysis of intermediate and steeplechase hurdling technique. W: (red. P. V. Komi), *Biomechanics V-B*. Baltimor, University Park Press, pp. 181- 187.
56. Kłapcińska B, Iskra J, Poprzęcki S, Grzesiok K. 2001. The effect of sprint (300 m) running on plasma lactate, uric acid, creatine kinase and lactate dehydrogenase in competitive hurdlers and untrained men. *Journal's Impact IF of Journal of Sports Medicine and Physical Fitness*; 3:306-311.

57. Kostial J. 1978. Struktura sportoveho vykonu v behu na 110 m prekazok z hladiska motorickych schopnosti a telesneho rozvoja [The structure of sport performance in the 110-metre hurdles from the point view of motor abilities and physical development]. *Teorie a praxe telesne Vychovy*; 6:356-365.
58. Konieczny M, Iskra J. 2016. The use of New Technologies in diagnosing asymetry in muscle activity and motor control activities based on the example of Young hurdlers. *Journal of Physical Education and Health*; 5(8):49-56.
59. König E. 1990. Zur Entwicklung im 400-m-Hürdenlauf der Frauen. *Der Leichtathlet* 29:8-10; 30:8-10.
60. Król H, Bacik, B. 1997. Kinematyka kroku płotkowego w zależności od wysokości płotka. *Antropomotoryka*, 16: 103-111.
61. Król H. 2016. *Biomechaniczne aspekty ćwiczeń doskonalących technikę sportową*. Akademia Wychowania Fizycznego im. Jerzego Kukuczki w Katowicach, Katowice.
62. Kryściak J, Podgórski T, Eichler A. 2015. Lactate concentration and creatine kinase activity after 110-m and 400-m hurdles races. *Trends in Sport Sciences*; 22:179-184.
63. Lawson G. 1997. World record breakers in track and field athletics. *Human Kinetics*, Champaign.
64. LeMasurier J, Watts D. 1980. *Athletics, track events*. Pelham, London. (96 pp.).
65. Letzelter H. 1983. *Stride pattern in the 400 m hurdles for women*. In: Women's track and field athletics. (red. A. Foulkes). IAAF/DLV; 242-258.
66. Letzler H. 1985. *Zur Schrittgestaltung im 400-m-Hürdenlauf der Frauen* [W: red.: N.Müller, D.Augustin, B.Hunger] „Frauenleichtathletik“. Niederhausen; 211-225.
67. Letzelter H i Letzelter M. 1978. The influence of form and technique on the 400 m hurdles for men and for women. *Track and Field quarterly Review*; 4:50-54.
68. Letzelter M. 1979. Schrittgestaltungim 400-m-lauf der Männer und Frauen bei den Olympischen Spielen 1976. *Leistungssport*; 3:296-304.
69. Letzelter H i Letzelter M 1980. Geschwindigkeitsverhalten beim 400-m-Hürdenlauf der Frauen. *Leistungssport*; 4:300-310.
70. Letzelter, H. 1983. Stride pattern in the 400 m hurdles for women. In Proceedings of the Women's Track and Field Athletics. 1st IAAF Congress on Women's Athletics, Mainz; 242–258.
71. Letzelter H, Letzelter M, Honda Y, Steiman W. 1995. Schrittgestaltung im 400-m Hürdenlauf der Jugend. *Leichtathleti*; 10:41-47; 11:49-51; 12:52-58.

73. Li J, Fu D. 2000. The kinematic analysis on the technique between run and hurdle clearance of 110 m hurdles. W: (red. Y. Hong) 18th International Symposium on Biomechanics in Sport; How we applied sports biomechanics to the preparations for the Olympic Games, pp. 87-88.
74. Lipoński W. 1987. *Humanistyczna encyclopedia sportu*. Sport i Turystyka, Warszawa.
75. Lovesey P. 1979. *The official centenary history of the AAA*. Guinness Books, Enfield.
76. Lovesey P. 1980. *The official centenary history of the Amature Athletic Association*. London: Guinness Superlatives Limited. (222 pp.).
77. Matousek R, Sedlacek J. 1987. Vzláh sportovního výkonu na 400 m překazek muzů a rychlosti behu v jednotlivých rytmických jednotkách. *Teoria a Praxe telesna Vychovy*; 12:732-742.
78. Matthews P. 1982. *The Guinness book of track and field athletics. Facts and feats*. Middlesex, Guinness, Superlatives Limited.
79. Matthews P. 2011. *Athletics 2011*. The international track and field annual. Cheltenham/London, The Sports Book/International track and Field Statisticians.
80. McLean B. 1994. The biomechanics of hurdling: force plate analysis to assess hurdling technique. *New Studies in a Athletics*; (10)1:67-79.
81. Mehlich R. 2004. *Poczucie rytmu ruchu zawodników uprawiających bieg przez płotki*: [rozprawa doktorska]. Katowice: AWF, 2004.
82. Mero A., Luhtanen P. 1986. Biomechanische Untersuchung des Hürdenlaufs während der Weltmeisterschaften in Helsinki. *Leistungssport*, 1, 42-43.
83. Mertens JC, Boschmann A, Schmidt M, Plessl C. 2018. Sprint diagnostic with GPS and inertial sensor fusion. *Sports Engineering*; 21:441–451.
84. Miskos G. 1988. Biomechanická analýza prebehu perkazek. *Teorie a Praxe Telesia Vychovy*; 11:648-654.
85. Miskos G, Susanka P. 1986. Hurdle races. W: (red. P. Susanka, G.-P. Brüggemann, E. Tsarouchas) 1 st World Junior Championships. Athens'86. IAAF Biomechanical Research, D1-D13.
86. Moravec P, Susanka P. 1986. Metodické poznámky průbehu některých závodu na ME Stuttgartu. *Atletika*; 12:17-20.
87. Moravec P, Susanka P, Stepanek J. (1990) Casová analýza, frekvence a délka kroku na ME 1990. *Atletika*; 12:13-20.

88. O'Donoghue P. 2015. An introduction to performance analysis of sport. Studies in Sports Performance Analysis. Routledge, New York.
89. Otrubiannikow PJ, Razumowski JA. 1988. *Sprint s barierami*. Zdrowia, Kijów.
90. Otsuka M., Isaka T. 2019. Intra-athlete and inter-group comparisons: Running pace and step characteristics of elite athletes in the 400-m hurdles. *PLoS ONE*; 14(3): e0204185
91. Ozaki Y, Ueda T, Fukuda T, Inai T, Kido E, Narisako D. 2019. Regulation of Stride Length During the Approach Run in the 400-M Hurdles. *Journal of Human Kinetics*; 69:59-67.
92. Park YJ, Ryu JK, Ryu JS, Kim TS, Hwang WS, Park SK, Yoon S. 2011. Kinematic analysis of hurdle clearance technique for 110-m men's hurdlers at IAAF World Championships, Daegu 2011. *Korean Journal of Sport Biomechanics*; 21:520-540.
93. Pietraszewski P, Gołaś A, Krzysztofik M, Śrutwa M, Zając A. 2021. Evaluation of Lower Limb Muscle Electromyographic Activity during 400 m Indoor Sprinting among Elite Female Athletes: A Cross-Sectional Study. *International Journal of Environmental Research and Public Health*; 18(24):13177.
94. Pietrzak M, Iskra J. 2016. Changes in women's 400 m hurdle run from 1978 to 2014. *Physical Activity Review*; 4:132-138.
95. Przednowek K, Iskra J, Krzeszowski T. 2014. The analysis of hurdling steps using an algorithm of computer Vision: the case of well-trained athlete. *Medycyna Sportowa*; 1(30):307-313.
96. Przednowek K, Iskra J, Krzeszowski T, Wiktorowicz K. 2016. Evaluation of kinematic parameters of hurdle clearance during fatigue In men's 400m hurdles – research using the method of computer version. [W: (red. Kajetan Słomka, Grzegorz Juras)] *Current research in motor control V*, 100-105.
97. Qiuhua HE, Xinfu T, Ciaohong Y. 2002. The space-temporal features of pacing rhythm of Chinese super women 400-hurdle racers. *Sichuan Sports Science*; 1:1-6.
98. Quercetani RL. 2009. *A World History of hurdle and Steeplechase Racing. 1860-2008. Men and Women*. EditVallard; Milan.
99. Quercetani RL. 2020. *A History of Modern Track and Field Athletics (1860-2000)*. Track and Field News. Mountain View.
100. Quinn DM. 2010. External effects in the 400-m hurdles race. *Journal of Applied Biomechanics*; (26)2:171-179.

101. Salo A, Grimshaw, PN. 1996. The repeatability of motion analysis and the reproducibility of athletes in sprint hurdles. [W: Proceedings of the XIII International Symposium for Biomechanics in Sports 9red.; T. Bauer)] (pp. 380-383).
102. Salo A. 2002. Technical changes in hurdle clearances at the beginning of 110 m hurdle event- a pilot study. [W: Proceedings of the XX International Symposium on Biomechanics in Sports Spain: Universidad de Extremadura 9red.: Gianikellis KE.)]. (pp. 84-87).
103. Schwirtz A, Baumann W, Grob V, Vonstein W. 1990. Fatigue Effects in the 400 m Hurdles Technique. [W: Techniques in Athletics. The First International Conference Proceedings, Vol.2, Conference proceedings Deutsche Sporthochschule Koln (red.: Bruggemann G, Ruhl JK.)]. pp. 440-446.
104. Sedlacek J, Caha j. 1988. 400 m prekazek žen. *Atletika*; 1:14-15.
105. Sedlacek J, Matousek R. 1985. Analýza změn rychlosti na 400 m prekážek. *Atletika*; 10:16-18.
106. Setuain I, Lecumberri P, Ahtiainen JP, Mero AA, Häkkinen K, Izquierdo M. 2018. Sprint mechanics evaluation using inertial sensor-based technology: A laboratory validation study. *Scandinavian Journal of Medicine & Science in Sports*; 28(2):463-472.
107. Skowronek T, Słomka K, Juras G, Szade Bartłomiej. 2013. Sense of rhythm does not differentiate professional hurdlers from non-athletes. *Perceptual and Motor Skills: Motor Skills & Ergonomics*; 117(1):1-10.
108. Stastny O. 1978. Technik- und Rhythmusschulung für 400-m-Hürdenläuferinnen. *Leichtathletik* 17, *Die Lehre der Leichtathletik* 18:585-586.
109. Stastny O. 1984. Technique and Rhythm Development for Women's 400m Hurdles. *Modern Athlete and Coach*; (22)4:32-33.
110. Stepanek J, Moravec P, Susanka P. 1990. Casova analyza, frekvence a daleka kroku na ME 1990. *Atletika*; 12:13-20.
111. Stiepanow W. 1985. Wtoroje woschozdenie. *Legkaja Atletika*; 5:12-14.
112. Stiepanow W. 1987. 400 m s/b: pierwszy jubilej. *Legkaja Atletika*; 3: 6-10.
113. Stiepanow W i Stiepanowa M. 1982. 400 m s/b: na distancii ženszcziny. *Legkaja Atletika*; 9:10- 13.
114. Stiepanow W, Stiepanowa M. 1996. 400 metrow s barierami. Kak trenirowatsa i dobítsa ženszczinam - barieristkam. *Legkaja Atletika*; 5:2-7.
115. Stiepanowa M. 1996. Moja szkoła. *Legkaja Atletika*; 1:10-12.

116. Stiepanowa M. 1997. My experiences in the 400 m hurdles. *Modern Athlete and Coach*; 11:31-34.
117. Susanka P, Miskos G, Millerova V, Dostal E, Barac F. 1988. Time analysis of the sprint hurdle event at the II World Championships in athletics: the 1987 International Athletic Foundation - IAAF Scientific Report. *New Studies in Athletics*; 2:51-72.
118. Susanka P. 1993. Tak beha prekazy J. Akii-Bua. *Atletika*; 2:14-15.
119. Tulloh B. 2005. Record predictions: what are the absolute limits to human performance levels. *Peak Performance*; 220:1-4.
120. Valamatos MJ, Valamatos MJ, Mil-Homens P, Velosa A. 2005. Dynamic take-off hurdles clearance: changes on the mechanical power output variables produced by the muscle-skeletal system on the take-off phase of hurdles clearance, induced by a specially designed fatigue protocol. *Revista Portuguesa de Ciencias do Desporto*; 1:15-30.
121. Webster FAM. 1922. *Hurdling and steeplechasing*. London, Athletic Publications (68 pp., photos).
122. Webster FAM. 1929. *Athletic up to date*. London: Frederick Warner and Co.
123. Wübenhorst K. 1978. Die Entwicklung des 400-m.-Hürdenlaufens der Frauen in der DDR. *Der Leichtathlet*; 5-6.
124. Xinyong W, Manyun Z. 2003. Analysis on the rhythm of stride in male 400 m hurdles. *Journal of Anhui Sports Science*; 4:36–37.
125. Yasui T, Aoyama K, Ogiso K, Asaba K, Ogura Y. 1996. The study of the model interval time in 400m hurdle race for men. (red. JM Abrantes) 14th International Symposium on Biomechanics in Sports. pp. 431–434.
126. Zelencowa T. 1982. Fiziczeskije dannyje barieristki i ritm biega. *Legkaja Atletika*; 9:13.
127. Zeng LP, Wei JJ. 1998. The characteristics of outstanding women runners during 400m hurdle race. *Journal of Hubei Sports Science*; (17)2:23-25.
128. Zouhal H, Jabbour G, Jacob C, Duvigneau D, Botcazou M, Ben Abderrahaman A, Prioux J, Moussa E. 2010. Anaerobic and aerobic energy system contribution to 400-m flat and 400-m hurdles track running. *The Journal of Strength and Conditioning Research*; 24(9):2309-15.