

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.*

SPIS TREŚCI

WYKAZ SKRÓTÓW	5
WSTĘP	6
1.1. Bieg na 400 m przez płotki – charakterystyka konkurencji.....	8
1.2. Technika płotkarska – podstawowe informacje.....	10
1.3. Parametry czasowe dystansu 400 m przez płotki kobiet.....	12
1.4. Parametry przestrzenne dystansu 400 m przez płotki kobiet.....	14
1.5. Przegląd piśmiennictwa w ujęciu analizy biegów przez płotki	16
2. CEL PRACY I PYTANIA BADAWCZE.....	22
3. MATERIAŁ I METODY BADAŃ.....	24
3.1. Materiał	24
3.2. Analiza statystyczna.....	25
3.2.1. Podstawowe miary statystyczne	25
3.2.2. Analiza korelacji rangowej rhoSpearmana	25
3.2.3. Analiza regresji (krokowa postępująca)	26
3.2.4. Analiza czynnikowa (eksploracyjna, EFA) - selekcja zmiennych wpływających na wyniki biegu 400 m ppł kobiet	27
3.2.5. Analiza wariancji (ANOVA) –część I.....	27
3.2.6. Analiza wariancji (ANOVA) – część II.....	28
4. WYNIKI.....	30
4.1. Budowa ciała i przygotowanie motoryczne jako podstawowe parametry charakteryzujące najlepsze zawodniczki rywalizujące w biegu na 400 m przez płotki	30
4.2. Charakterystyka parametrów czasowych.....	31
4.3. Charakterystyka parametrów przestrzennych	36
4.4. Związki wybranych parametrów z wynikiem biegu na 400 m przez płotki kobiet – zestawienie zbiorowe	38

4.5. Analizy matematyczne w ocenie strategii biegu na 400 m przez płotki kobiet w ujęciu analizy regresji.....	41
4.6. Strategia biegu na 400 m przez płotki kobiet w ujęciu eksploracyjnej analizy czynnikowej (EFA)	45
4.7. Różnica pomiędzy wybranymi parametrami biegu na dystansie 400 m ppł kobiet w różnych okresach czasowych	47
4.8. Różnice wybranych zmiennych między płotkarkami o zróżnicowanym poziomie (ANOVA).....	50
DYSKUSJA.....	52
WNIOSKI	60
PIŚMIENNICTWO	62
STRESZCZENIE.....	71
SUMMARY	73
SPIS TABEL.....	75
SPIS RYCIN	77

WYKAZ SKRÓTÓW

- IAAF – (ang. International Amateur Athletic Federation)- Międzynarodowa Federacja Lekkiej Atletyki
EMG – (ang. electromyography) elektromiografia
AAC – (ang. Amature Athletic Club) Amatorski Klub Lekkoatletyczny
BH – (ang. body high) wysokość ciała
BW – (ang. body weight) masa ciała
CK – (ang. creatine kinase) kinaza keratynowa
EFA – eksploracyjna analiza czynnikowa
LA (ang. Lactate acid level)poziom mleczanów
IO – Igrzyska Olimpijskie
m – bieg na dystansie metrycznym
ME – Mistrzostwa Europy
MŚ – Mistrzostwa Świata
NRD - Niemiecka Republika Demokratyczna
PB – (ang. personal best) – rekord życiowy
ppł – bieg przez płotki
TDpre - dotknięcie opuszków palców kończyny dolnej zakroczonej podłoża będące początkiem ostatniego kontaktu przed atakiem płotka
TOpre - atakowanie płotka czyli odbicie z kończyny zakroczonej, stanowiące ostatni kontakt z podłożem przed płotkiem, połączone z wyprowadzeniem kończyny atakującej
TDpost - lądowanie za płotkiem – pierwszy kontakt kończyny atakującej z podłożem
TOpost - kontakt stopy kończyny dolnej zakroczonej z podłożem za pokonywanym płotkiem
y – bieg na dystansie jardowym
ZSRR - Związek Socjalistycznych Republik Radzieckich
WPT - wskaźnik poziomu techniki

WSTĘP

Bieg przez płotki to widowiskowa konkurencja biegowa, rozgrywana obecnie na bieżni, na dystansach 100 m, 110 m oraz 400m. Podwalinami biegów płotkarskich były crossy terenowe (Lipoński, 1987). Trudno ustalić kiedy narodziły się biegi terenowe, a badacze historii lekkiej atletyki są w tym temacie poróżnieni wskazując szerokie ramy czasowe sięgające od starożytności (Gołębiowski i Stroynowski 1956) do wieku XIX (Lipoński, 1987). Przeniesienie rywalizacji biegaczy terenowych na płyty stadionu zostało zapoczątkowane w Anglii. Pierwsze oficjalne doniesienia o biegu okrężnym z wykorzystaniem płotków – dystans 440 y (400 m) ppł pochodzą z roku 1860. Bieg ten odbył się w Oxfordzie, a jego zwycięzcą został Irlandczyk A. Pearce, uzyskując rezultat 64,0 s.

Na rezultat biegu płotkarskiego składa się połączenie szybkości pokonywanych odcinków pomiędzy płotkami oraz techniki pokonywania płotka, na dystansie okrężnym istotne znaczenie przypisuje się również wytrzymałości. Chcąc omówić podstawy techniki pokonywania płotków nie można nie wspomnieć o Arturze Croome, studencie z Oxfordu, który jako pierwszy wykonywał charakterystyczny dla płotkarzy ruch nogi atakującej nad płotkiem. Wykorzystanie takiego sposobu poruszania datowane jest na rok 1886 i uznawane za podstawy współczesnej techniki biegu przez płotki (Lovesey 1979, Matthews 1982). Istotne udoskonalenia w technice pokonywania płotków przypisywane są również Alwinowi Christianowi Kraenzleinowi. Lawson (1997) pisał o tym pochodzący z Milwaukee zawodniku, iż był pierwszą osobą która przez płotki biegała, a nie skakała. Wszystko to przez wprowadzenie charakterystycznego wyprostu nogi atakującej płotek – tzw. „leg extender style”.

Marginalizacja roli kobiet w wielu aspektach życia, w tym ich udziału w aktywności sportowej ma odzwierciedlenie także w historii lekkiej atletyki i biegów płotkarskich. Początki oficjalnych informacji o kobiecym zaangażowaniu w biegi płotkarskie sięgają przełomu XIX i XX w. Pierwsze żeńskie zmagania lekkoatletyczne odbywały się w 1895 r. w Poughkeepsie w stanie Nowy York pod nazwą „Field Day”. Badacz historii lekkiej atletyki Quercetani (2000) wskazuje, że bieg płotkarski kobiet był jedną z rozgrywanych w czasie tych zawodów konkurencji. Bieg ten należy zatem traktować jako pierwsze oficjalne żeńskie zmagania na dystansie płotkarskim. Dystans i rezultaty tego biegu pozostają nieznane (Iskra 2005). Pierwszy oficjalnie odnotowany rezultat w biegu płotkarskim kobiet należy do Mary

C. Morgan i pochodzi z 1914 r. W czasie rywalizacji w Bryn Mawr College Field Day pokonała ona dystans 100 y z ośmioma płótkami o wysokości 75 cm w czasie 15 2/5 s (Hymans 1999). Za pierwsze międzynarodowe zawody lekkoatletyczne kobiet uznaje się zorganizowane w Monte Carlo w 1921 r. tzw. „Monte Carlo Games”, nazywane także Międzynarodowymi Igrzyskami Kobiet.

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 płótkami 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 płótkami zyskiwał na popularności wchodząc w 1977 r. do programu Pucharu Europy. Medalistkami finału tej imprezy, rozegranym 13 sierpnia w Helsinkach, były: nowa rekordzistka świata Karin Rossley (NRD), z rezultatem 55,63 s; Tatiana Storożewa (ZSRR) i Krystyna Kacperczyk (POL). Pełne uznanie i akceptacja dystansu 400 n ppł kobiet miało miejsce podczas Igrzysk Olimpijskich w Los Angeles w 1984 r., zapisując się na stałe do programu Igrzysk. Prym na listach światowych tamtego okresu wiodły zawodniczki Związku Radzieckiego, były one autorkami 5 najlepszych wyników w roku 1984. Ze względu na sytuację polityczną i bojkot tamtych Igrzysk przez kraje socjalistyczne. Pierwszą złotą medalistką Igrzysk Olimpijskich na dystansie 400 m ppł została Marokanka Nawal El Moutawakil, jej rezultat 54,61 s był wynikiem o blisko sekundę gorszym od uzyskanego przez Martinę Stiepanową na Zawodach Przyjaźni – alternatywnej rywalizacji zorganizowanej przez kraje bojkotujące Igrzyska Olimpijskie 1984. 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 płótkarskich 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. czekali niespełna 12 miesięcy, później Sydney McLaughlin wyrubowała rekord świata na 50.68 s. co czyni ją jak na razie jedyną kobietą, której udało się ta sztuka (Iskra, 2005; <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.

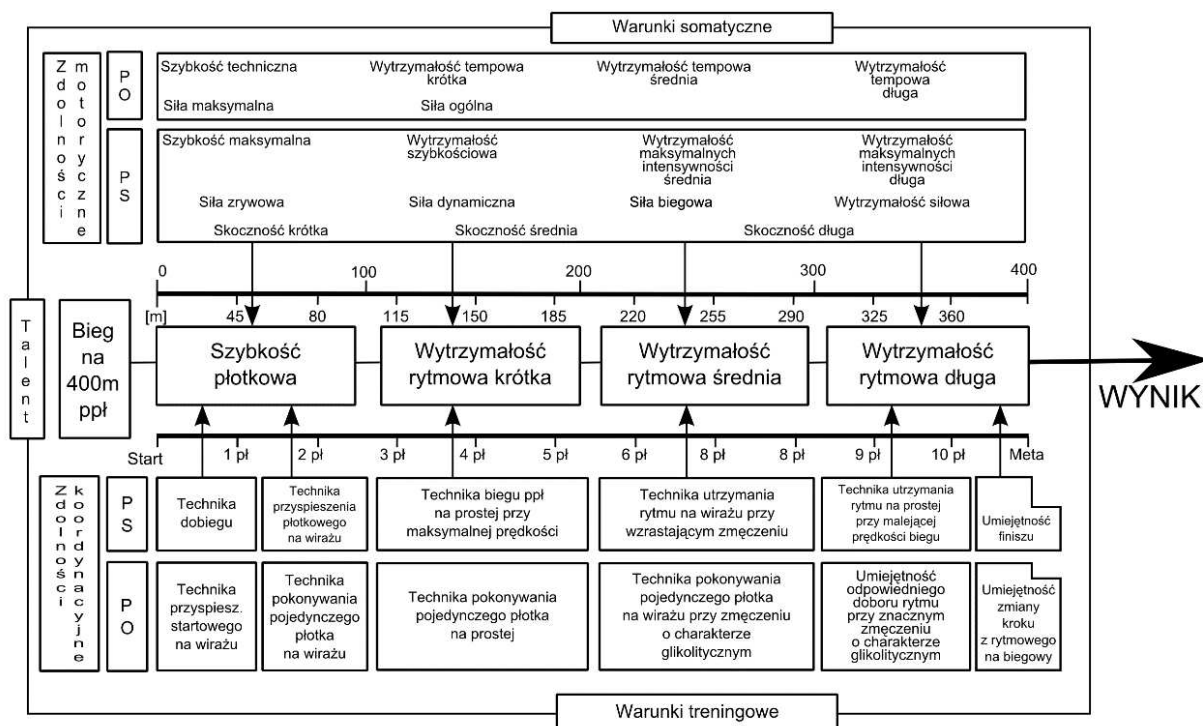
1.1. Bieg na 400 m przez płotki – charakterystyka konkurencji

Bieg na dystansie 400 m ppł uważany jest za jeden z najtrudniejszych dystansów wśród konkurencji lekkoatletycznych. Quercetani (2009) określa bieg na dystansie jednego okrążenia z płotkami jako wydarzenie zabójcze dla człowieka ang.: „the man-killer event”. 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).

Pokonanie poszczególnych składowych można opisać parametrami czasowo-przestrzennymi czyli czasem potrzebnym zawodnikowi na pokonanie poszczególnych części dystansu oraz liczbą kroków wykonanych w kolejnych częściach dystansu. Obie składowe tworzą strategię pokonania dystansu, mianowicie wykonania założonej liczby kroków na poszczególnych etapach biegu, nazywanych w żargonie trenerskim „rytmem płotkarskim” oraz odpowiednim doбором prędkości, która przekłada się na czas pokonywania poszczególnych fragmentów. Obie te składowe stanowią podstawowe elementy porównawcze pomiędzy poszczególnymi zawodnikami i ich strategiami pokonania dystansu. Niezależnie od wybranej strategii utrzymanie prędkości pomiędzy płotkami na jednakowym poziomie wiąże się z powtarzalnością zachowania osobniczego, czyli zachowaniem rytmicznym (Mehlich 2004). Przyjęcie zatem odpowiedniego „rytmu” biegu (uwzględniając czynniki związane z pokonaniem dystansu) ma decydujące znaczenie w rezultacie końcowym. (Otsuka i Isaka, 2019). Zaproponowana przez Iskrę struktura biegu na dystansie jednego okrążenia z płotkami dowodzi, że biegi ten to niezwykle specyficzna i niepowtarzalna konkurencja, gdzie o wynikach decydują 4 czynniki: szybkość, wytrzymałość, siła i technika.



Rycina 1. Struktura biegu na 400 m przez płotki (Iskra 1999).

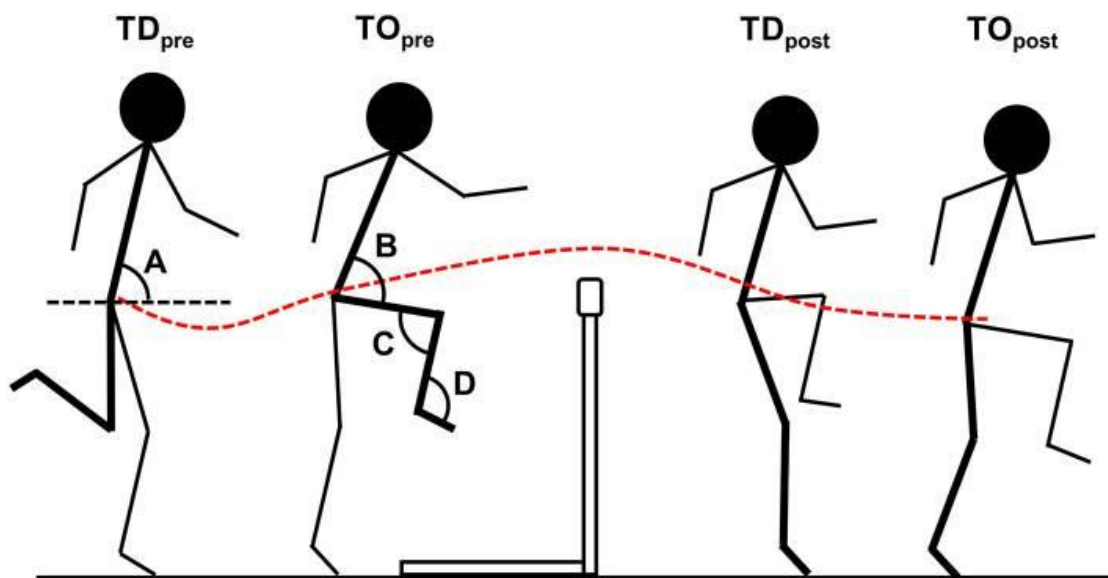
1.2. Technika płotkarska – podstawowe informacje

Próby wyjaśnienia i opisanie techniki pokonywania płotka należy rozpocząć od przybliżenia i wyjaśnienia pojęcia techniki ruchu, które to pojęcie różni się w interpretacji poszczególnych autorów. Hochmuth (1984) technikę ruchu w ujęciu sportowym określa jako „szczególny proces służący do rozwiązania problemu ruchu”, Carr (1997) definiuje to jako „wzór i sekwencja ruchów”. Definicję techniki ruchu szerzej opisuje zaś Bober, który uważa, że „technika sportowa to ciąg faz i sekwencja ruchów, przebiegających w uporządkowanej kolejności i podporządkowanych biomechanicznym zasadom, które służą do wykorzystania potencjału strukturalnego i funkcjonalnego człowieka, celem uzyskania maksymalnego rezultatu sportowego” (Król, 2016). Zestawiając powyższe definicje techniki ruchu z techniką pokonywania płotka, można stwierdzić, że nadrzędnym celem techniki jest możliwie optymalne pokonanie płotka. Technika pokonywania 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.

Pokonanie „przejście” pojedynczego płotka podzielić można na fazy (na podstawie Bissas, 2022):

- dotknięcie opuszków palców kończyny dolnej zakroczonej podłoża będące początkiem ostatniego kontaktu przed atakiem płotka (TD_{pre})
- atakowanie płotka czyli odbicie z kończyny zakroczonej, stanowiące ostatni kontakt z podłożem przed płotkiem, połączone z wyprowadzeniem kończyny atakującej (TO_{pre})
- lot nad płotkiem
- lądowanie za płotkiem – pierwszy kontakt kończyny atakującej z podłożem (TD_{post})
- kontakt stopy kończyny dolnej zakroczonej z podłożem za pokonywanym płotkiem (TO_{post})



Rycina 2. 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. 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 Olimpijskie 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 tryumfatorce, która w chwili zwycięstwa miała 36 lat.

Wyniki Mistrzostw Świata z 1983 r. z Rzymu przyczyniły się do pełnej akceptacji strategii „umiarkowanego tempa” co skutkowało minimalną stratą czasu w drugiej części biegu (Sabine Busch – 1,2 s). Spokojne tempo biegu w początkowej jego części było także elementem sukcesu w biegu na Igrzyskach Olimpijskich w Seulu w 1988 roku. Rosjanka Tatiana Ledowskaja rozpoczęła bieg w sprinterskim stylu, wyprzedzając na półmetku dystansu Debbie Flintoff-King o 6 m (5H – 22,9/23,6 s). Dramatyczny finisz i zwycięstwo Australijki o 0,01 s wznowiły dyskusje (także naukowe) o skutecznej strategii biegu.

Kolejnej analizie przypadły na Mistrzostw Europy w Splicie w 1990 roku, które tym razem padły łupem Tatiany Ledowskaj. Zaprezentowała ona podobną jak na Igrzyskach w 1988 roku strategię „szybkiego tempa” w początkowej fazie biegu (10,4 s - 2H, 23,0 s – 5H), zwyciężając z czasem 53,62 s (WPT = 4,0). Srebrny medal zdobyła, biegnąca równym tempem (D = 2,6 s) Szwajcarka Anita Protti. Igrzyska w Seulu (1988) i Mistrzostwach Europy w Splicie (1990) to także czas początku kariery sportowej Sally Gunell w biegu na 400 m przez płotki. Przebieg mistrzostwa sportowego angielskiej płotkarki był modelowy w kontekście dystansu 400 m ppł. Gunnell była czołową zawodniczką Wielkiej Brytanii na dystansie 100 m przez płotki, następnie doskonaliła się na przedłużonych dystansach 200

i 400 m, aby finalnie rywalizować na dystansie jednego okrążenia z płótkami. Pierwszym międzynarodowym sukcesem na dystansie 400 m ppł w wykonaniu Gunnell było srebro zdobyte na Mistrzostwach Świata w Tokio, gdzie przegrała z Ledowską (53,11/53,16 s) biegnąc spokojnie do połowy dystansu (5H – 23,6 s / Ledowska 23,3 s); na mecie do zwycięstwa zabrakło 0,05 s (odpowiednio 2,5/3,1 s). Strategia stałego tempa biegu pozwoliła Gunnell na sięgnięcie po złoty medal Igrzysk Olimpijskich w Barcelonie (1992 r.), jej rezultat to 53,23 s. Pełną dojrzałość techniczną Angielka zaprezentowała w czasie Mistrzostw Świata w Stuttgarcie w 1993 r., gdzie po porywającym pojedynku z Sandrą Patrick-Farmer zwyciężyła ustanawiając rekord świata (52,74 s.). Kluczem do sukcesu po raz kolejny okazała się strategia stałego tempa - Gunnell jak zawsze rozpoczęła spokojnie w rytmie 15-krokovym (23,65/23,40 s Farmer). Mistrzostw Świata w Göteborgu (1995) pozwoliły na zebranie kolejnych danych, z których najistotniejsze wydają się być dane dotyczące Kim Batten i Tonja Buford-Bailey (złotej i srebrnej medalistki) od startu do mety biegiły w równym tempie, finiszując w czasach 52,61 i 52,62 s (pierwszy to rekord świata). Obie płótkarki na półmetku miały czas 23,1 s.

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 płótkarki (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).

Inauguracyjnymi zawodami na szczeblu międzynarodowym, które pozwoliły na analizę startową „rytmu biegu” na 400 m przez płotki kobiet były rozegrane w 1978 r. w Pradze Mistrzostwa Europy. Zwyciężczynią tych zmagani była Tatiana Zelentsova, która ustanowiła rekord świata (54,89 s) biegnąc cały dystans w rytmie 17-krokowym. Taki rytm biegu umożliwił pokonywanie płotków „lepszą” nogą, a ponadto nie wymuszał konieczności wydłużania kroków (Breizer i Korchemny, 1990). W okresie inauguracji dystansu 400 m ppł odnotowywano także zmiany ilości kroków z 17 na 18 (El Moutawakil w czasie biegu na

Igrzyskach w 1984 r.). 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 kontynuowanie pokonywaniem przeszkód w rytmie 17 krokowym oraz szablon 15 i 16 krokowy. W pierwszym wariantcie 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). Zaletą tego rozwiązania jest atakowanie końcowych płotków „lepszą” kończyną. 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-krokowym kończyła bieg z atakowaniem płotka „lepszą” kończyną w rytmie 17-krokowy. Wariant 16-17 był specyficzny, zważywszy, że Bidouane miał doskonałe warunki fizyczne (174 cm/60 kg).

Pierwsze próby biegu w rytmie 15-krokowym, który to należy traktować jako nawiązując do ideału rytmu 13-krokowego w grupie mężczyzn, podjęła wybitna biegaczka na 400 m (49, 24 s w 1984 r.), Sabine Busch. Wysoka (177 cm) zawodniczka niemieckiego pochodzenia w większości biegów do ostatniej prostej biegała w rytmie „jednonożnym”-15-krokowym; często w ostatniej odległości musiała jednak dodać jeden (16) lub dwa (17) kroki. Pierwszą płotkarką stale biegającą od startu do mety rytmem 15-krokowym 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 rozpoczęciem biegu w rytmie dwunożnym – 14-krokowym. 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-krokowym (szablon – 4x14+3x15+2x16). W późniejszym okresie bieg 14-krokowy 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-krokowy (Bol).

1.5. Przegląd piśmiennictwa w ujęciu analizy biegów przez płotki

Dokonując przeglądu literatury podejmującej zagadnienia dotyczące biegu przez płotki napotyka się publikacje zarówno popularnonaukowe jak i wnikliwe prace naukowo-eksperymentalne. Za pionierską publikację podejmującą zagadnienie analizy biegu płotkarskiego uznaje się pochodząca z 1887 roku pracę „Athletics and Football” napisaną przez Shermana. Autor skupia się głównie na technice biegu oraz procesie szkoleniowym nauczania techniki pokonywania płotków. Rok później ukazała się książka H. Holl’a (1888) pt.: „The science and art of training”. Jednymi z pierwszych prac były także książki autorstwa brytyjskiego trenera F. A. M. Webstera (1922, 1929), które również traktowały o metodach szkoleniowych. Pierwszą publikacją zajmującą się wyłącznie tematyką płotkarską jest praca „How to hurdles” autorstwa Comstock’a z 1929 r. Pozycje podejmujące tematykę 400 m ppł można podzielić na literaturę szkoleniowo-trenerską, opisującą metody nauki techniki płotkarskiej i aspekty treningowe oraz prace badawcze.

Trenerzy i badacze niemal od samego początku kobiecej rywalizacji na dystansie 400 m ppł podejmowali się analiz różnych aspektów tej konkurencji. Wstępnych wniosków dotyczących m.in. wieku mistrzostwa sportowego oraz porównania wyników uzyskiwanych na dystansie płaskim i płotkarskim, wyznaczając tym samym tzw. wskaźnik poziomu techniki (WPT) dokonał w swoich pracach Baczworow (1978; 1979). Analiz z zakresu strategii

przestrzennej biegu (liczby kroków oraz ich długości i częstotliwości) dokonywali i prezentowali w swoich pracach Helga i Manfred Letzelter (Letzelter H. 1983, 1985; Letzelter M. 1979; Letzelter H i Letzelter M 1978, 1980; Letzelter H. i wsp. 1995). Interesujących danych (m.in. zmiany prędkości biegu) na imprezach rangi mistrzowskiej dostarczyli Eberhard König i Klaus Wübenhorst (König 1990), Wübenhorst (1978). Prób analiz czasowych i przestrzennych parametrów kobiecej rywalizacji na dystansie 400 m ppł jako jedni z pierwszych dokonali Ewen (1975), LeMasurier i Watts (1980), Arnold (1980). Z uwagi na fakt, że wspomniani autorzy byli także trenerami ich prace wносиły wiele walorów szkoleniowych. Istotny wpływ na postrzeganie analiz związanych ze strategią biegu na dystansie 400 m przez płotki kobiet wnieśli badacze z byłych krajów socjalistycznych, głównie ze Związku Radzieckiego, gdzie szczególne uznanie w tej dziedzinie należy się Witalijowi Brejzerowi, który opracował wiele publikacji prezentujących dane dotyczące biegu w sposób kompilacyjny (budowa ciała, długość i częstotliwość kroków, technika pokonywania płotków, trening) (Brejzer 1985, 1986, Brejzer i Korchemny 1990). Owocnych analiz dokonała także Marina Stiepanowa oraz jej trener i mąż Wiaczesław Stiepanow (Stiepanow 1985, 1987, Stiepanow i Stiepanowa 1982, 1996, Stiepanowa 1996, 1997). Warto przypomnieć, że Stiepanowa trzykrotnie poprawiała rekord świata w biegu na 400 m ppł (1979 r. oraz dwukrotnie w 1986 r.) i zdobyła złoty medal Mistrzostw Europy (1986 r.). Łączenie aspektów praktycznych i naukowo-teoretycznych było także domeną Tatiany Zelencowej, która w swojej publikacji zauważyła zależności poziomu sportowego w biegu na 400 m rzez płotki z budową ciała oraz z poziomem przygotowania biegowego na dystansach 100-800 m (Zelencowa 1982). Wysoką aktywność publikacyjną wykazywali także trenerzy i naukowcy pochodzący z byłej Czechosłowacji, a później z Czech. Jednymi z pierwszych prac były publikacje dotyczące obserwacji podstawowych elementów strategii biegu w kontekście praktyki szkolenia (Dostal 1971, Stastny 1977, 1978, 1984, Kostial 1978). Dalsze analizy wiązały się z projektami badawczymi realizowanymi w międzynarodowych zespołach (Miskos i Susanka 1986, Moravec i Susanka 1986, Moravec i wsp. 1990, Sedlacek i Caha 1988, Sedlacek i Matousek 1985, Stepanek i wsp. 1990, Susanka i wsp. 1988).

Pośród bardziej współczesnych publikacji warte wymienienia są prace o charakterze statystycznym, prezentujące liczne wyniki, autorstwa Petera Matthews'a (2011) czy Buttler'a (2012). Wnikliwy przegląd i rozbudowane analizy statystyczne wyników zebranych podczas Igrzysk Olimpijskich w latach od 1896 do 2008 włącznie, można znaleźć w książce Iskry (2012). Pośród autorów artykułów o charakterze empirycznym wymienić należy Carnes'a (2000), Tulloh'a (2005) czy Pietrzaka i Iskty (2016). Artykuł ostatniego z wymienionych jest

znaczący w ujęciu niniejszej pracy, gdyż traktuje on o zmianach odnotowanych na przestrzeni lat od 1978 do 2014 na dystansie 400 m ppł kobiet. Autor wykazuje na mocniejszą budowę ciała współczesnych zawodniczek, oraz szybsze pokonywanie pierwszej części dystansu, co ma odzwierciedlenie w koncepcji treningu. Analizy statystyczne i ich opracowania stanowią również podstawy do opracowania optymalnych strategii, takim przykładem jest matematyczny model wpływu poszczególnych zmiennych na końcowy wynik biegu 400 m ppł, zarówno dla kobiet jak i mężczyzn opracowany przez Quinn'a (2010). Interesującym wnioskiem tych badań wydaje się wskazanie najbardziej zewnętrznego toru jako optymalnego w kontekście rezultatu biegu. Opracowania historyczne pozwalają także śledzić zmianę poziomu sportowego na przestrzeni lat (Heazelwood, 2015). Badacze w swoich analizach doszukują się różnych powiązań z rezultatami poszczególnych zawodników, próbują typować optymalne parametry fizyczne oraz najlepsze metody szkoleniowe i strategię na pokonanie dystansu (Otsuka i Isaka, 2019; Ozaki i wsp., 2019; Dundar i wsp., 2015).

Trenerzy od zawsze poszukiwali osób o ponadprzeciętnych zdolnościach, które zwykle korelują z budową ciała: odpowiednią wysokością i masą ciała oraz długością kończyn. Materiałem służącym do znalezienia i wyznaczenia optymalnych parametrów jakimi powinien charakteryzować się „modelowy” zawodnik są dane zebrane podczas najważniejszych startów jakimi są Igrzyska Olimpijskie, Mistrzostwa Świata, czy mistrzostwa poszczególnych kontynentów, na których osiągane są najwartościowsze rezultaty. Zgodnie z wnioskami uzyskanymi przez Adamczyka i wsp. (2012) optymalna wysokość ciała zawodniczek rywalizujących na dystansie 400 m ppł mieści się w przedziale 170 – 173 cm, przy masie ciała około 57-58 kg. Autor podkreśla, że znaczenie wysokości ciała w odnoszeniu lepszych wyników miało większy związek w przeszłości niż w chwili publikacji jego badań. Podobne wnioski znajdują się także w pracach Pietrzaka i Iskry (2016) oraz Iskry (2022), należy jednak zauważyć, że zebrane dane pochodzą maksymalnie z roku 2017 i nie obejmują aktualnie najlepszych zawodniczek w historii dyscypliny (McLaughlin, Bol) mierzących odpowiednio 175 cm i 184 cm. Odnosząc porównanie wysokości ciała w stosunku do rezultatu w grupie najlepszych na świecie mężczyzn parametr ten jest jeszcze trudniejszy do ustalenia, gdyż wśród medalistów najważniejszych imprez znajdują się zarówno zawodnicy bardzo wysocy – Benjamin 191 cm, Dos Santos 200 cm, jak i niscy – Jackson 173 cm. Wysokość ciała nie jest zatem znaczącym kryterium przesądzającym o możliwym do osiągnięcia poziomie sportowy. Lepszymi w tej ocenie wydają się wskaźniki takie jak BMI czy wskaźnik budowy ciała Rohrera (Adamczyk, 2012). Parametry budowy ciała, szczególnie wysokości ciała, a co za tym idzie długość kończyn mają znaczący wpływ

na długość kroku biegowego, co z kolei wpływa na strategię pokonania całego dystansu. Mówiąc o strategii biegu należy zaznaczyć, że jest ona wypadkową wielu składowych, z których obok wspomnianych warunków somatycznych istotne są także szybkość i wytrzymałość zawodnika oraz technika pokonania płotków (Iskra i Coh, 2011). Jak podkreśla Iskra (2014) technika płotkarska spełnia jedynie charakter użytkowy, jej poprawność nie jest zatem najistotniejsza – kluczowe jest szybkie pokonanie płotka przy zachowaniu płynności biegu oraz uzyskaniu jak najmniejszych spadków prędkości w czasie pokonywania kolejnych przeszkód. W ocenie techniki pomocne są wszelakiego rodzaju badania biomechaniczne, które swoje początki datują na 1887 r. i publikację autorstwa Montague Shearmana. Pierwsze analizy techniki były stosunkowo prymitywne i polegały na ocenie techniki z serii zdjęć wykonanych w czasie zawodów. O wiele skuteczniejszym rozwiązaniem było wykorzystanie kinogramów. Pionierami wykorzystującymi kinogramy w analizie techniki płotkarskiej byli Toni i Elfriede Nett (1969). Zaproponowana przez nich metoda analizy techniki pokonywania płotków znalazła duże uznanie u innych badaczy, co odzwierciedlają liczne publikacje m.in.: Brejzer i Kajtmazowa (1979), Hommel (1988), Brejzer (1986), Hommel (1990), Hommel i Vernon (1991), Susanka (1993), Hommel i Arnold (1993). Ze względu na techniczne możliwości związane z analizą biegu, zwłaszcza niedogodności przeprowadzania pomiarów w biegu okrężnym, znacznie częściej napotyka się publikacje odnoszące się do dystansu 100 i 110 m ppł (Li, 2000; Salo, 2002; Čoh, 2003; Park i wsp., 2011; Skowronek i wsp. 2013).

Badania w biegach okrężnych bardzo rzadko dotyczą analizy całego dystansu (Kaufmann 1976), najczęściej spotyka się analizy wybranych odcinków biegu (Iskra 1998; Iskra i Bacik 1999; Salo 2002). Do najczęściej analizowanych odcinków biegu należą płotki ustawione w środkowej części dystansu. Warianty analizy 3- go i 4-tego płotka przyjęto w pracach Mero i Luhtanena (1986), Miskosa. (1988), Salo i Grimshawa (1996 i 1998), Iskra i wsp. (prace z lat 1997 – 2016), Król i Bacik (1997), Salo (2002), (Čoh 2012), Iwasaki i wsp., 2022). Dane z analiz biomechanicznych można podzielić na przestrzenne (głównie długości i wysokości), czasowe i czasowo-przestrzenne (Iliev i Primakov 1978, Otrubiannikow i Razumowski 1988, McLean 1994). Do najczęściej analizowanych parametrów należą: zmiany prędkości poziomych i pionowych, odległość i wysokość ogólnego środka ciężkości, zmiany prędkości i odległość od miejsca odbicia do płotka i od płotka do miejsca lądowania, czas kontaktu stopy z podłożem, zmiany kąta ułożenia stawów kolanowych, skokowych oraz kąt pochylenia tułowia (Coh, 2004; Valamatos i wsp., 2005; Amara i wsp., 2017). Słabą stroną powyższych badań i publikacji jest mała liczebność

badanych, oparta na pojedynczych przypadkach lub maksymalnie kilkunastu osobach, przeważnie płci męskiej. Na tym tle wyróżnia się publikacja Guex'a (2012), w której analizuje biegi ponad 40 zawodniczek.

Precyzyjną metodą przydatną w ocenie techniki i ekonomii ruchu są badania dynamograficzne wykorzystujące czułe platformy tensometryczne pozwalające na pomiar siły reakcji podłoża oraz rzetelne pomiary parametrów czasowych i prędkościowych. Jednym z prekursorów tego rodzaju badań był Schwirtz, który dokonał oceny wpływu zmęczenia w biegu na 400 m ppł na zmiany siły reakcji podłoża podczas kroku płotkowego (Schwirtz i wsp., 1990). Platformy tensometryczne dowiodły, że wzrost poziomu zaawansowania zawodników przekłada się na krótszy czas kontaktu z podłożem oraz mniejszą wartością maksymalną siły pionowej w pozycji odbicia (McLean, 1994; Coh i wsp., 2000). Ostatnimi laty popularne w tego typu analizach jest wykorzystywanie różnego rodzaju czujników i markerów opartych na magnetycznych inercyjnych jednostkach pomiarowych (MIMU) (Gurchiek i wsp., 2017; Mertens i wsp., 2018; Setuain i wsp., 2018). Falbriard (2020) wykorzystał i potwierdził skuteczność stosowania tego typu czujników w analizie parametrów czasowo-przestrzennych na dystansie określonym. Niewątpliwą zaletą takich czujników jest ich niska waga i minimalny wpływ na zawodnika, co pozwala na wykonanie pomiarów w czasie zawodów, a nie jedynie w czasie badań w warunkach izolowanych, które mogą odbiegać od tych występujących w czasie rozgrywania konkurencji. Badaniem bazującym na wykorzystaniu naskórnych czujników pozwalających na ocenę funkcji układu mięśniowego jest elektromiografia (EMG), która rejestruje zmiany potencjału elektrycznego w mięśniach. W ostatnich kilku latach analizy tego typu podejmowali Konieczny (2016) oraz Pietraszewski i wsp. (2021). Unikatowe w tym zestawieniu są prace Hyjek-Młynarczyk i wsp., (2017, 2020), która jako pierwsza badała aktywność mięśni kończyn górnych (napięcie bioelektryczne w mięśniach: dwugłowy i trójgłowy ramienia, naramienny oraz ramiennie-promieniowy) w czasie pokonywania płotków.

Na płynne pokonanie płotków obok techniki składają się również tempo i charakter biegu. Mocne otwarcie wiąże się z większym wyczerpaniem organizmu w drugiej części dystansu co może wpływać na jakość pokonania ostatnich metrów. Oceny charakterystyki kroków i tempa biegu podejmowali w swoich badaniach m. in. Guex (2012), Otsuka i Isaka (2019) i Ozaki i wsp. (2019). Badania ostatniego z wymienionych autorów podejmowały ciekawą zależność nad długością kroku i jego regulacją (korekcją) w czasie dobiegu do pierwszego płotka. Wykazał on na większy spadek prędkości przed płotkiem wraz ze wzrostem błędu w pierwszej części dystansu Ozaki i wsp. (2019).

Kolejną kluczową kwestią optymalizacji warunków biegu jest adaptacja do wysiłku, jakiemu w czasie biegu muszą sprostać zawodniczki i zawodnicy. Obserwacja zmian wysiłkowych jakie zachodzą w organizmach zawodników jest przedmiotem badań wielu fizjologów i biochemików. Pierwsze prace z zakresu specyfiki energetycznej wysiłku i mechanicznej funkcji mięśni pochodzą z początku XX w. Przedstawione wówczas przez Hill'a i Lupton'a (1923) oraz Hill'a (1925) teorie dotyczące podstaw fizjologii wysiłku są cytowane w wielu współczesnych publikacjach. Przedmiotem rozważań biochemików jest głównie selekcja parametrów krwi takich jak zmiana poziomu mleczanu (LA), kinazy kreatynowej (CK), dehydrogenazy mleczanowej (LD), kwasu moczowego czy enzymów antyoksydacyjnych (Kłapcińska i wsp., 2001; Kryściak i wsp., 2015). Wykorzystanie substratów energetycznych w czasie pokonywania dystansu 400 m ppł było przedmiotem badań Kaczmarczyka i wsp. (2016). Ze względu na stosunkowo ubogą literaturę dotyczącą przemian fizjologicznych u osób rywalizujących na dystansie płotkarskim, często naukowcy i trenerzy odnoszą się do badań realizowanych na dystansie płaski. Jak wykazał Zouhal i wsp. (2010) istnieją jednak istotne różnice we wkładzie tlenowym i powiązanych z nim zmianami biochemicznymi występującymi u zawodników rywalizujących na dystansach 400 m i 400 m ppł, co sugeruje, że wyniki te nie powinny być porównywane oraz, że dla obu dystansów należy opracowywać różne koncepcje treningowe.

Analizy naukowe wydają się zasadne i konieczne w opracowaniu jak najlepszych strategii treningowych i startowych. Nieustanny rozwój technologiczny oraz modyfikacje procesów treningowych pozwalają kreować coraz to nowsze strategie rozwoju zawodników. Zasadne więc wydaje się prowadzenie kolejnych badań, które pozwolą ocenić i porównać nowoprowadzane idee z myślami szkoleniowymi realizowanymi w latach ubiegłych.

2. CEL PRACY I PYTANIA BADAWCZE

Prace z zakresu „taktyki” i uwarunkowań sukcesów na dystansie 400 m przez płotki (także mężczyzn) zostały w pewnym okresie zaniechane, gł. z racji stabilizacji a nawet regresu wyników. Znaczący progres wyników na dystansie 400m przez płotki kobiet, do którego doszło na przełomie kilku ostatnich lat, skłania do poszukiwania czynników wpływających na ten progres. Podjęcie tej tematyki może wskazać na aktualnie najistotniejsze zmienne wpływające na czas pokonania dystansu 400m przez kobiety oraz przedstawić zmiany tych cech w ujęciu historycznym. Wyniki niniejszej analizy mogą stanowić istotny wkład w opracowanie strategii treningowych, które pozwolą szerszej grupie zawodniczek na osiąganie jak najlepszych rezultatów.

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. W analizie uwzględniono finałowe biegi z 10 Igrzysk Olimpijskich, 17 finałów Mistrzostw Świata oraz 14 Mistrzostw Europy. Baza danych stanowiąca podstawę do opracowania prezentowanych wyników została utworzona z wykorzystaniem m.in. bazy danych Międzynarodowej Federacji Lekkiej Atletyki (<https://worldathletics.org>) oraz opracowań umieszczonych pod Tabelą 1.

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 całościowe 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

Kolejnym etapem analizy było uwzględnienie testu korelacji rangowej Spearmana. Podstawowe miary statystyczne pozwoliły na stosunkowo przejrzystą prezentację wyników, co stanowiło punkt wyjścia do dalszych analiz. Pierwsze 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.

Za pomocą opisanych metod scharakteryzowano:

- podstawowe zmienne badanej grupy tj.: wiek uzyskania PB, uzyskany rezultat (PB), wysokość oraz masę ciała, wskaźnik BMI, staż treningowy, rekord życiowy (PB) 400 m, czy wskaźnik poziomu techniki (TI)
- podstawowe parametry czasowe
- czasowe parametry dodawane
- czasowe parametry szacowane
- różnice parametrów czasowych
- czasowe parametry procentowe
- podstawowe parametry przestrzenne
- różnice parametrów przestrzennych

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. Procedura regresji krokowej postępującej opiera się na krokowym (jedna zmienna – jeden krok) wprowadzaniu zmiennych do modelu, w którym na początku nie ma żadnego predyktora i co krok do modelu wprowadzane są kolejne. Metoda ta oparta jest na wartościach progowych wprowadzenia zmiennej, tzw. próg wejścia. Wartości te oparte są na statystyce F -Snedecora dla analizy istotności danego predyktora w kontekście predykcji zmiennej zależnej.

Analiza regresji pozwala na opisanie współzależności kilku zmiennych przez dopasowanie do nich funkcji i została wykorzystana m. in. w analizie biegów przez płotki (Iskra i wsp., 2016; 2023).

Podstawowe znaczenie w końcowym wnioskowaniu z wykorzystaniem analizy regresji jest wybór metody oraz, co bardziej istotne, wybór zmiennych. We wcześniejszej pracy (Iskra i wsp. 2022) autorzy skoncentrowali się na podstawowych parametrach czasowych i przestrzennych trzech części biegu.

W analizie oceniono wpływ 30 zmiennych, wybranych na podstawie analizy korelacji rang Spearmana, na rezultat biegu na dystansie 400 m ppł kobiet oraz części dystansu pomiędzy pierwszym i dziesiątym płotkiem (T1-10) a także, na czasy pokonania trzech poszczególnych części biegu (T1-4, T4-7, T7-10).

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 wariacji (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 w przypadku, gdy dane nie miały charakteru gaussowskiego (rozkładu normalnego). Normalność rozkładów oceniano za pomocą testu Shapiro-Wilka. Jako test post hoc posłużono się testem Tukeya.

W oparciu o analizy wielu autorów dotyczących zmiennych determinujących wynik na dystansie 400 m przez płotki oraz wcześniejsze opracowania własne i Iskry (Iskra i wsp. 2022, Iskra 2023) wybrano podstawowe zmienne z trzech obszarów:

A. Zmienne charakteryzujące budowę ciała (wysokość ciała - BH, masa ciała - BW, wskaźnik BMI), wiek oraz poziom zdolności motorycznych (rekord życiowy w biegu na 400 m - PB400m) i umiejętności technicznych (wskaźnik poziomu techniki - WPT) zawodniczek (Tabela 2).

B. Zmienne czasowe – czas dobiegu do pierwszego płotka (t_{0-1}), czasy poszczególnych odcinków między płotkami (t_{1-2} , t_{2-3} ,... t_{9-10}), czas odcinka finiszu (t_{10-F}) oraz czasowe parametry dodawane (T_{1-4} , T_{4-7} , T_{7-10}).

C. Zmienne przestrzenne, czyli liczba kroków między kolejnymi płotkami) – podobnie, jak w przypadku parametrów czasowych uwzględniono kolejne podcinki (n_{1-2} , n_{2-3} ,... n_{9-10}) oraz wybrane części dystansu (N_{1-4} , N_{4-7} , N_{7-10}).

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	14	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 ($t_{5-6}, t_{6-7}, t_{7-8}, t_{8-9}$). Przyczyną takiej zależności najprawdopodobniej jest kumulujące się zmęczenie w trakcie pokonywania dystansu i większa konsekwencja (strata czasowa) w przypadku popełnienia błędu przy pokonywaniu płotka, zwłaszcza na drugim wirażu, który jest uznawany za najtrudniejszy fragment biegu. 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}). Zaskakująca może wydawać się słaba korelacja z czasami pokonania odcinków na których dochodziło do zmiany liczby kroków ($t_{pre1}, t_{post1}, t_{pre2}, t_{post2}$) (Tabela 4).

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 5). 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 5).

Wyższosc drugiej części dystansu nad pierwszą ($r = 0,71$ vs. $r = 0,87$) potwierdziła analiza czasowych parametrów szacowanych (Tabela 6). Wykazano, że druga połowa dystansu jest pokonywana średnio o 3 sekundy wolniej od pierwszej, dodatkowo charakteryzuje się wyższym odchyleniem standardowym wynoszącym 0,85. Po rozbiciu dystansu na cztery równe części wykazano, że największa korelacja z wynikiem odnosi się do czasu pokonania drugiego wirażu ($T_{III}100m - r = 0,83$). W podziale dystansu na cztery części po 100 m obserwuje się, że zawodniczki najszybciej pokonują pierwszą prostą biegu ($T_{II}100m$), a potrzebują na to średnio 12,65 s. Najwolniejszy jest ostatni odcinek biegu ($T_{IV}100m$), a czas potrzebny na jego pokonanie jest o ponad dwie sekundy dłuższy niż odcinak najszybszego. Na pokonanie wiraży zawodniczki potrzebują średnio 13,11 s i 13,81 s, odpowiednio dla pierwszego i drugiego wirażu (Tabela 6).

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. Skrajne i charakterystyczne parametry czasowe biegu na 400 m ppł kobiet

T _{pierwsza}	4,18	4,20	3,86	4,6	0,13	0,21	-0,05	0,50
T _{druga}	4,26	4,24	3,96	4,7	0,13	0,50	0,06	0,56
T _{najszybsza}	4,17	4,16	3,86	4,6	0,13	0,28	0,02	0,52
T _{przedostatnia}	5,10	5,1	4,62	5,8	0,17	0,44	0,69	0,72
T _{ostatnia}	5,25	5,24	4,76	6	0,19	0,33	0,54	0,68
T _{najwolniejsza}	5,25	5,24	4,76	6	0,18	0,39	0,55	0,69
t _{przed1}	4,61	4,6	4,04	5,29	0,24	0,15	-0,04	0,07
t _{po1}	4,81	4,8	4,15	5,6	0,27	0,14	-0,23	0,09
t _{przed2}	4,91	4,9	4,3	5,5	0,24	-0,06	0,07	0,23
t _{po2}	5,10	5,1	4,41	5,6	0,23	-0,51	0,41	0,20

(T_{pierwsza} – czas pokonania pierwszej przestrzeni płotkarskiej, T_{druga} – czas pokonania drugiej przestrzeni płotkarskiej, T_{najszybsza} – czas pokonania najszybszej przestrzeni płotkarskiej, T_{przedostatnia} – czas pokonania przedostatniej przestrzeni płotkarskiej, T_{ostatnia} – czas pokonania ostatniej przestrzeni płotkarskiej, T_{najwolniejsza} – czas pokonania najwolniejszej przestrzeni płotkarskiej, T_{przed1} – czas pokonania przestrzeni plotkarskiej przed pierwszą zmianą liczby kroków, T_{po1} – czas pokonania przestrzeni plotkarskiej po pierwszej zmianie liczby kroków, T_{przed2} – czas pokonania przestrzeni plotkarskiej przed drugą zmianą liczby kroków, T_{po2} – czas pokonania przestrzeni plotkarskiej po drugiej zmianie liczby kroków).

Tabela 5. 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 6. 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).

Tabela 7. Różnice parametrów czasowych (dane w sekundach)

Zmienna	Średnia	Mediana	Mini	Max	Odch.std	Skośność	Kurtoza	Korelacja r
t _{najszybszy} - t _{najwolniejszy}	1,06	1,09	0,66	1,67	0,39	0,23	0,46	0,26
Różnice parcjalne								
T6-10-T1-5	2,75	2,76	0,90	4,60	0,56	0,08	0,41	0,32
T4-7-T1-4	1,04	1,02	0,20	1,80	0,30	-0,03	-0,02	0,25
T7-10-T4-7	1,44	1,40	0,60	2,90	0,38	0,39	0,61	0,17
T7-10-T1-4	2,48	2,49	0,90	3,90	0,50	0,09	0,05	0,30
T3-5-T1-3	0,40	0,40	-0,20	1,60	0,21	0,58	3,20	0,07
T6-8-T1-3	1,27	1,30	0,40	2,02	0,32	-0,11	-0,32	0,25
T8-10-T1-3	1,90	1,89	0,70	2,94	0,38	0,04	-0,02	0,27
T6-8-T3-5	1,21	1,20	0,40	2,00	0,34	-0,07	-0,52	0,34
T8-10-T3-5	1,87	1,87	0,70	2,94	0,41	0,04	-0,30	0,30
T8-10-T6-8	0,66	0,67	-0,10	1,41	0,27	-0,08	0,10	0,05

(t_{najszybszy}-t_{najwolniejszy} – różnica pomiędzy najszybciej i najwolniej pokonana przestrzenią płotkarską, Tx-y-Ta-b – różnica pomiędzy wskazanymi jednostkami płotkarskimi).

Średni przyrost czasu potrzebnego na pokonanie kolejnych przestrzeni płotkarskich wzrasta o nieco ponad 0,1 s w każdej kolejnej jednostce (Tabela 3). Analiza różnic parametrów czasowych (Tabela 7) wykazała, że różnica czasowa pomiędzy najszybszą i najwolniejszą przestrzenią płotkarską u kobiet wynosi średnio 1,06 s. Nie wykazano aby ten parametr istotnie korelował z wynikiem biegu. Przyrosty czasu pomiędzy kolejnymi sekcjami (T1-4; T4-7; T7-10) wynosi

odpowiedni 1,04 i 1,44 s. Różnica pomiędzy sekcją pierwszą i trzecią wynosi z kolei 2,48 s i wykazano, że parametr ten wykazuje słabą (0,3) korelację z finalnym rezultatem biegu.

Tabela 8. Czasowe parametry procentowe

Zmienna	Średnia	Mediana	Mini	Max	Odch.std	Skośność	Kurtoza	Korelacja r
Parametry czasowe dodawane (1 JP) -%								
%t0-1	11,88	11,88	10,92	12,79	0,33	-0,04	-0,04	-0,33
%t1-2	7,64	7,64	7,04	8,23	0,22	-0,03	0,05	-0,06
%t2-3	7,80	7,79	7,11	8,41	0,22	-0,12	-0,21	0,00
%t3-4	7,97	7,99	7,26	9,66	0,24	1,04	8,92	0,01
%t4-5	8,19	8,20	7,54	8,73	0,20	-0,20	0,53	0,04
%t5-6	8,44	8,44	7,72	9,07	0,19	-0,24	0,98	0,19
%t6-7	8,69	8,70	7,88	9,28	0,22	-0,13	0,81	0,22
%t7-8	9,03	9,02	8,05	10,24	0,26	0,28	3,23	0,30
%t8-9	9,33	9,34	8,30	9,89	0,24	-0,47	1,14	0,20
%t9-10	9,60	9,60	8,55	10,25	0,28	-0,40	0,53	0,19
%t10-F	11,11	11,09	10,52	14,07	0,57	0,78	1,84	0,15
Parametry czasowe dodawane (2 JP) -%								
%T1-3	15,44	15,44	14,15	16,65	0,40	-0,09	0,14	-0,04
%T3-5	16,17	16,16	14,80	17,74	0,37	-0,14	1,70	0,03
%T5-7	17,13	17,14	15,61	18,06	0,36	-0,57	1,29	0,23
%T7-9	18,35	18,36	16,51	19,68	0,42	-0,55	2,56	0,29
Parametry czasowe dodawane (3 JP) -%								
%T1-4	23,42	23,47	21,70	25,06	0,55	-0,32	0,49	-0,03
%T4-7	25,32	25,35	23,20	26,43	0,47	-0,84	2,06	0,19
%T7-10	27,96	28,02	25,05	29,61	0,63	-0,83	2,35	0,28
Parametry czasowe dodawane (4 JP) -%								
%T1-5	31,61	31,66	29,24	33,66	0,67	-0,47	1,06	-0,02
%T6-10	36,64	36,70	32,94	38,61	0,73	-1,16	3,73	0,30
„Połówki” dystansu								
%I200H	47,24	47,27	44,73	49,44	0,78	-0,26	0,47	0,27
%II200H	52,76	52,73	50,56	55,27	0,78	0,26	0,47	-0,27

(%tx-y – procentowa wartość czasu potrzebna na pokonanie wskazanego odcinka względem całości dystansu, %Tx-y – procentowa wartość czasu potrzebna na pokonanie wyznaczonej jednostki płotkarskiej w stosunku do całości dystansu, %I200H – procent wartości czasu potrzebnego na pokonania pierwszej połowy dystansu, %II200H – procent wartości czasu potrzebnego na pokonania drugiej połowy dystansu).

Czasowe parametry procentowe opisują średni procent czasu jaki zawodniczki potrzebują na pokonanie poszczególnych odcinków dystansu. Procentowa ilość czasu potrzebna na pokonanie dystansu od startu do pierwszego płotka oraz od płotka ostatniego do linii mety jest zbliżona do siebie i wynosi odpowiednio 11,88 i 11,11% (Tabela 8). Zbliżona wartość procentowa czasu potrzebnego na pokonanie tych odcinków i różnica 15 metrów w dystansie pomiędzy nimi wskazuje na znacznie większą prędkość zawodniczek na początku biegu. Procentowy udział czasu potrzebnego na pokonanie następujących po sobie przestrzeni

międzyplotkowych systematycznie rośnie od 7,64% na pierwszej do 9,6% dla ostatniej przestrzeni. Największy przyrost parametru procentowego obserwuje się w przestrzeni pomiędzy 7 i 8 plotkiem. Odpowiedzialne za to mogą być trudności związane z biegiem po drugim łuku, zmiana liczby wykonywanych kroków oraz przemiany fizjologiczne związane z zaspokojeniem potrzeb energetycznych organizmu w trakcie specyficznego rodzaju wysiłku. Stosunkowo równe przyrosty procentowej wartości czasu potrzebnego na pokonanie dystansu obserwuje się w podziale odcinka plotkarskiego na sekcje dwujednostkowe (2JP). Podział dystansu na „połówki” wskazuje, że średnio 5,5% czasu więcej zawodniczki potrzebują na pokonanie drugiej połowy okrążenia (Tabela 8).

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. 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 ($r=0,24$). Dokonując analizy dystansu w oparciu o podział na 3JP wykazano, że najważniejszy jest odcinek pomiędzy czwartym a siódmym płotkiem ($r=0,36$) (Tabela 10).

Tabela 9. 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).

Tabela 10. Dodawane zmienne przestrzenne 2-3-4 JP (liczba kroków)

Zmienna	Średnia	Mediana	Mini	Max	Odch.std	Skośność	Kurtoza	Korelacja r
N1-10	142,07	141,00	129,00	158,00	5,49	0,51	0,24	0,37
N1-5	60,30	60,00	55,00	68,00	2,17	1,18	3,97	0,24
N6-10	64,40	64,00	58,00	72,00	2,62	0,36	-0,28	0,36
N1-4	45,19	45,00	41,00	51,00	1,64	1,20	4,08	0,21
N4-7	46,01	45,00	42,00	51,00	1,75	1,19	1,19	0,36
N7-10	48,85	49,00	44,00	55,00	2,06	0,20	-0,28	0,33
N1-3	30,11	30,00	27,00	34,00	1,11	1,13	4,07	0,16
N3-5	30,20	30,00	28,00	34,00	1,11	1,17	3,55	0,25
N6-8	31,49	31,00	28,00	35,00	1,39	0,47	-0,63	0,35
N8-10	32,90	33,00	30,00	37,00	1,42	0,16	0,04	0,31

(Nx-y – liczba kroków wykonana w poszczególnych jednostkach płotkarskich).

Tabela 11. Parametry przestrzenne – różnice (liczba kroków)

Zmienna	Średnia	Mediana	Mini	Max	Odch.std	Skośność	Kurtoza	Korelacja r
N6-10-N1-5	4,09	4,00	0,00	11,00	2,00	0,41	0,37	0,23
N4-7-N1-4	0,82	0,00	0,00	4,00	1,02	0,88	-0,40	0,29
N7-10-N1-4	3,66	3,00	0,00	10,00	1,68	0,37	0,53	0,20
N7-10-N4-7	2,84	3,00	0,00	7,00	1,40	0,23	0,13	0,04
N3-5-N1-3	0,09	0,00	-2,00	2,00	0,44	2,54	12,16	0,21
N6-8-N1-3	1,39	1,00	0,00	5,00	1,11	0,42	-0,34	0,26
N8-10-N1-3	2,79	3,00	0,00	7,00	1,21	0,34	0,65	0,19
N6-8-N3-5	1,29	1,00	0,00	4,00	1,04	0,35	-0,52	0,20
N8-10-N3-5	2,70	2,00	0,00	7,00	1,17	0,26	0,71	0,14
N8-10-N6-8	1,40	1,00	-1,00	4,00	0,99	0,29	-0,10	-0,06

(Nx-y – N a-b – różnica liczby kroków wykonana pomiędzy poszczególnymi jednostkami płotkarskimi).

Średnia liczba kroków wykonana w drugiej połowie dystansu wzrasta o cztery (Tabela 11), przy czym zaobserwować można grupę zawodniczek, która nie wykonuje zmiany liczby kroków pomiędzy żadną przestrzenią płotkarską. Największy odnotowany przyrost liczby wykonanych kroków pomiędzy pierwszą i drugą połową dystansu to jedenaście. Bazując na wskaźnikach uśrednionych można wskazać, że czołowe zawodniczki wykonują średnio 15,85 kroku w każdej przestrzeni płotkarskiej (Tabela 9).

Dzieląc dystans na połowy odnotowuje się średnio 15,11 kroku wykonanego celem pokonania przestrzeni między płotkami w pierwszej części dystansu oraz o jeden krok więcej, przypadający na przestrzenie należące do drugiej połowy. W podziale trójsekcyjnym dystansu obserwuje się przyrost liczby kroków średnio o 0,82 pomiędzy pierwszą i drugą sekcją (N4-7-N1-4) oraz o 2,84 kroku pomiędzy sekcją drugą i trzecią (N7-10-N4-7) (Tabela 11). Nie wykazano aby parametry przestrzenne (ilość wykonanych kroków) w znaczącym stopniu korelowała z PB 400 m ppł.

4.4. Związki wybranych parametrów z wynikiem biegu na 400 m przez płotki kobiet – zestawienie zbiorowe

Celem odpowiedzi na pytanie – „co decyduje o wynikach w biegu na 400 m przez płotki?” na początkowym etapie analizy wykorzystano analizę korelacji (Tabela 12). Otrzymane wyniki wykazała, że czas pokonania drugiej połowy dystansu (TII200H) najsilniej koreluje z końcowym rezultatem biegu ($r=0,87$) (Tabela 12). W podziale na odcinki 100 metrowe, wykazano iż najistotniejszy jest czas pokonania drugiego łuku biegu (TIII100H) a korelacja z wynikiem wynosi 0,83. Podział biegu na sekcje po 3JP wskazuje na silną korelację drugiej (T4-7) i trzeciej (T7-10) sekcji ($r=0,82$ i $r=0,81$). Podział dystansu na pojedyncze przestrzenie międzypłotkowe wykazał, że największy wpływ na PB 400 m ppł ma czas pokonania przestrzeni pomiędzy 7 i 8 płotkiem ($r=0,75$). Silną korelację ($r \geq 0,7$) i istotny statystycznie ($p < 0,001$) związek z końcowym rezultatem wykazują także czasy pokonania poszczególnych przestrzeni pomiędzy płotkami zlokalizowanymi w drugiej połowie dystansu (t5-6, t6-7, t8-9, t9-10). Umiarkowany wpływ na rezultat biegu wykazują czasy pokonania dobiegu (t0-1), wybiegu (t10-F), czas potrzebny na pokonanie przestrzeni pomiędzy pierwszym i drugim płotkiem (t1-2) ma niską korelację z wynikiem ($r=0,32$). Stosunkowo niewielki wpływ na wynik mają parametry przestrzenne (liczba wykonanych kroków). Analizy wykazały nieznacznie wyższe wartości korelacji parametrów przestrzennych z PB 400 m ppł w środkowej (N4-7) i końcowej (N7-10) sekcji biegu niż w sekcji pierwszej. Bardzo słabą korelację wykazuje większość podstawowych parametrów identyfikujących takich jak wzrost, masa ciała, wskaźnik BMI, wiek uzyskania rekordu życiowego oraz okres stażu treningowego ($r < 0,2$).

Tabela 12. Analiza korelacji wyniku biegu na 400 m przez płotki kobiet z wybranymi zmiennymi

Grupa zmiennych	NS	$p \leq 0,05$ ($r=0,11$)	$p \leq 0,01$ ($r=0,18$)	$p \leq 0,001$ ($r=0,26$)	$p \leq 0,001$ ($r \geq 0,50$)
1. Podstawowe parametry (identyfikujące)	Wiek Inic (-0,09) Wynik Inic (0,04)	WPT (-0,11)	Wysokość ciała (-0,14) Masa ciała (-0,20) BMI (-0,12) Wiek PB (0,18) Staż (-0,16)	PB400H (0,41)	
2a. Podstawowe parametry czasowe (1)				t0-1 (0,32) t1-2 (0,49) t10-F (0,48) t _{pierwsza} (0,50)	t2-3 (0,56) t3-4 (0,57) t4-5 (0,65) t5-6 (0,73) t6-7 (0,72) t7-8 (0,75)

					t8-9 (0,72) t9-10 (0,70)
2b. Podstawowe parametry czasowe (2)	t _{przed1} (0,07) t _{po1} (0,09)		t _{przed2} (0,28) t _{po2} (0,20)		t _{druga} (0,56) t _{przedostatnia} (0,72) t _{najszybsza} (0,52) t _{najwolniejsza} (0,69)
3. Dodawane parametry czasowe					T1-4 (0,64) T4-7 (0,82) T7-10 (0,81) T1-5 (0,70) T6-10 (0,85)
4. Szacowane parametry czasowe				TI100H (0,49)	TI200H (0,71) TII200H (0,87) TIII100H (0,73) TIII100H (0,83) TIV100H (0,60)
5. Różnice parametrów czasowych		T7-10-T4-7 (0,17)	T4-7-T1-4 (0,25)	t _{najwolniejsza} - t _{najszybsza} (0,26) T6-10-T1-5 (0,32) T7-10-T1-4 (0,30)	
6. Procentowe wskaźniki czasowe	T4-7%400H (0,08)	T1-5%400H (-0,15) T1-4%400H (-0,15)	T6-10%400H (0,24) T7-10%400H (0,23)		
7. Parametry przestrzenne			N1-5 (0,24) N1-4 (0,21)	N1-10 (0,37) N6-10 (0,36) N4-7 (0,36) N7-10 (0,33)	
8. Różnice parametrów przestrzennych	N7-10-N4-7 (0,04)		N6-10-N1-5 (0,23) N7-10-N1-4 (0,20)	N4-7-N1-4 (0,29)	

(PB – rekord życiowy, WPT – wskaźnik poziomu techniki, tx-y – czas potrzebny na pokonanie dystansu pomiędzy poszczególnymi płotkami, nx-y – liczba kroków wykonana pomiędzy poszczególnymi płotkami, T_{pierwsza} – czas pokonania pierwszej przestrzeni płotkarskiej, T_{druga} – czas pokonania drugiej przestrzeni płotkarskiej, T_{najszybsza} – czas pokonania najszybszej przestrzeni płotkarskiej, T_{przedostatnia} – czas pokonania przedostatniej przestrzeni płotkarskiej, T_{ostatnia} – czas pokonania ostatniej przestrzeni płotkarskiej, T_{najwolniejsza} – czas pokonania najwolniejszej przestrzeni płotkarskiej, T_{przed 1} – czas pokonania przestrzeni płotkarskiej przed pierwszą zmianą liczby kroków, T_{po 1} – czas pokonania przestrzeni płotkarskiej po pierwszej zmianie liczby kroków, T_{przed 2} – czas pokonania przestrzeni płotkarskiej przed drugą zmianą liczby kroków, T_{po 2} – czas pokonania przestrzeni płotkarskiej po drugiej zmianie liczby kroków, Nx-y – liczba kroków wykonana w poszczególnych jednostkach płotkarskich, Nx-y – N a-b – różnica liczby kroków wykonana pomiędzy poszczególnymi jednostkami

płatkarskimi, % t_{x-y} – procentowa wartość czasu potrzebna na pokonanie wskazanego odcinka względem całości dystansu, % T_{x-y} – procentowa wartość czasu potrzebna na pokonanie wyznaczonej jednostki płatkarskiej w stosunku do całości dystansu, % I_{200H} – procent wartości czasu potrzebnego na pokonania pierwszej połowy dystansu, % II_{200H} – procent wartości czasu potrzebnego na pokonania drugiej połowy dystansu)

4.5. 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.

W analizie uwzględniono:

- końcowy wynik w biegu na 400 m przez płotki (Tabela 13),
- czas pokonania wyłącznie dystansu między płotkami (T1-10) – Tabela 14,
- czas pokonania trzech części biegu (T1-4, T4-7, T7-10) – tabele 15,16,17.

Tabela 13. 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_{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.

Tabela 14. Parametry regresji dla zmiennej – czas biegu między płotkami (T1-10)

Step	Entered	R-Square	R-Square	C(p)	RMSE
1	t5_6	0,58	0,58	5691,26	0,55
2	t7_8	0,75	0,75	3322,14	0,42
3	t _{najszybsza}	0,83	0,83	2236,39	0,35
4	t8_9	0,90	0,90	1249,91	0,27
5	t3_4	0,93	0,93	797,32	0,23
6	t9_10	0,94	0,94	614,79	0,20
7	t6_7	0,96	0,96	403,58	0,17
8	t4_5	0,97	0,97	264,48	0,15
9	t2_3	0,97	0,97	220,90	0,14
10	t1_2	0,97	0,97	193,24	0,14
11	N1_10	0,98	0,97	176,84	0,14
12	N6_10	0,98	0,98	120,64	0,12
13	N1_5	0,98	0,98	88,89	0,12
14	N1_4	0,98	0,98	79,55	0,12
15	wiek_ini	0,98	0,98	71,94	0,11
16	WPT	0,98	0,98	69,14	0,11
17	wiek	0,98	0,98	64,94	0,11
18	staż	0,99	0,99	28,49	0,10
19	PB400	0,99	0,99	29,28	0,10

(wiek – wiek uzyskania PB (lata), WPT – wskaźnik poziomu techniki, tx_y – czas potrzebny na pokonanie wskazanego odcinka międzypłotkowego, Nx_y – liczba kroków wykonana pomiędzy wskazanymi płotkami).

Poszukując predyktorów istotnie wpływających na czas pokonania dystansu pomiędzy 1 i 10 płotkiem, zauważono, że istotne znaczenie, obok czasów pokonania poszczególnych przestrzeni między płotkami, ma także liczba kroków wykonana na długości całego odcinka N1-10 oraz liczba kroków odcinków dodawanych N1-5, N6-10, N1-4 (Tabela 14). Istotne znaczenie wykazały również takie zmienne jak: czas rekordu życiowego uzyskanego na dystansie płaskim (PB 400 m), indeks WPT oraz wiek inicjacji, wiek w chwili uzyskiwania PB 400 m ppł i staż treningowy. Nieistotne okazały się zmienne somatyczne: masa ciała, wzrost oraz wskaźnik BMI.

Tabela 15. Parametry regresji dla zmiennej – czas biegu w pierwszej części biegu (T1-4)

Step	Entered	R-Square	R-Square	C(p)	RMSE
1	t2_3	0,75	0,75	754,33	0,16
2	t3_4	0,87	0,87	292,28	0,11
3	t1_2	0,95	0,95	8,03	0,07
4	staż	0,95	0,95	0,50	0,07

(tx_y – czas potrzebny na pokonanie wskazanego docinka międzypłotkowego, staż – czas od momentu inicjacji do uzyskania PB w latach).

Poszukując predyktorów istotnych dla czasu pokonania pierwszej sekcji biegu (T1-4) wykazano, że istotne są jedynie czasy potrzebne na pokonanie poszczególnych przestrzeni (t1-2, t2-3, t3-4) oraz staż treningowy (Tabela 15). Bez znaczenia dla osiągnięcia najlepszych rezultatów okazały się cechy somatyczne zawodniczek (masa i wysokość ciała, BMI) oraz liczba wykonywanych kroków.

Tabela 16. Parametry regresji dla zmiennej – czas biegu w drugiej części biegu (T4-7)

Step	Entered	R-Square	R-Square	C(p)	RMSE
1	t5_6	0,84	0,74	-192,94	0,15
2	t4_5	0,91	0,91	-309,04	0,11

(tx_y – czas potrzebny na pokonanie wskazanego docinka międzypłotkowego).

W środkowej sekcji biegu (T4-7) jedynymi istotnymi predyktorami kształtującymi rezultat pokonania tej sekcji są czasy potrzebne na pokonanie przestrzeni pomiędzy 4 i 5 płotkiem oraz 5 i 6 płotkiem (Tabela 16). Pozostałe z analizowanych zmiennych nie wykazały istotnego wpływu na wynik sekcji T4-7.

Tabela 17. Parametry regresji dla zmiennej – czas biegu w trzeciej części biegu (T7-10)

Step	Entered	R-Square	R-Square	C(p)	RMSE
1	t8_9	0,78	0,78	272,27	0,21
2	t9_10	0,89	0,89	34,05	0,14
3	PB400	0,90	0,90	18,45	0,14
4	WPT	0,91	0,91	4,77	0,13
5	BMI	0,91	0,91	2,11	0,13
6	staż	0,91	0,91	2,79	0,13

(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).

Kluczowy wpływ na rezultat ostatniej sekcji biegu (T7-10), obok czasów potrzebnych na pokonanie ostatniej i przedostatniej przestrzeni międzypłotkowej (t8-9 i t9-10), okazał się czas uzyskany na dystansie płaskim (PB400) (Tabela 17). Ostatni fragment odcinka

plotkarskiego jest bardzo wymagający technicznie, co potwierdza istotny wpływ wskaźnika WPT oraz wymaga dużego doświadczenia co może sugerować istotny wpływ stażu treningowego. Istotne znaczenie wydaje się mieć także siła generowana z masy mięśniowej, na co wskazuje udział wskaźnika BMI.

4.6. 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 międzypłotkowych, czas pokonana najszybszej i najwolniejszej przestrzeni, rekord życiowy na 400 m oraz wskaźnik BMI (Tabela 18). 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 międzypłotkowej. W grupie czwartej (F4) znalazły się zmienne wskazujące na doświadczenie startowe, mianowicie wiek i staż treningowy.

Tabela 18. 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 międzyplotkowego, 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 plotkarskiej, T_{najwolniejsza} – czas pokonania najwolniejszej przestrzeni plotkarskiej, Nx-y – liczba kroków wykonana w poszczególnych jednostkach plotkarskich).

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

Pomimo ustanawiania kolejnych rekordowych rezultatach na przestrzeni ostatnich lata, średni poziom sportowy w biegu na 400 m przez płotki kobiet nie zmienił się istotnie od lat 90-tych XX wieku (Tabela 19). 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.

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 19.

Tabela 19. 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)				56,56	0,001	AB*** AC*** BC*
	56,45±1,55	58,66±2,25	59,41±2,05			
Staż (lata)				46,26	0,001	AB*** AC*** BC***
	5,37±2,67	8,52±3,01	10,13±3,55			
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

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 20).

- 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 20).

Tabela 20. 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**
$t_{\text{najszybsza}}$	4,21±0,14	4,14±0,11	4,16±0,13	7,31	0,001	AB*** AC*
$t_{\text{najwolniejsza}}$	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***
$t_{\text{najwolniejsza}} - t_{\text{najszybsza}}$	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 $T_{\text{najszybsza}}$ – czas pokonania najszybszej przestrzeni płotkarskiej, $T_{\text{najwolniejsza}}$ – 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

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 20).

Tabela 21. Parametry przestrzenne najlepszych zawodniczek startujących na dystansie 400 m ppt z podziałem na okresy czasowe (n=142)

Zmienna	Grupa			ANOVA		
	A 1978-1996	B 1997-2012	C 2013-2022	F	p	Test Tukey'a
N1-10	142,12±5,65	142,81±4,90	140,67±6,07	3,52	0,05	AB* AC* BC*
N1-5	60,94±2,50	60,13±1,94	59,88±2,03	5,51	0,01	AB* AC**
N6-10	64,20±2,63	64,83±2,40	63,85±2,89	3,60	0,05	BC*
N1-4	45,67±1,87	45,06±1,47	44,85±1,52	5,80	0,01	AB* AC**
N4-7	46,04±2,00	46,15±1,58	45,72±1,73	1,38	NS	-
N7-10	48,76±2,05	49,15±1,91	48,42±2,28	2,91	0,05	BC*
N6-10-N1-5	3,26±1,77	4,70±1,81	3,97±2,20	14,47	0,001	AB*** AC**
N4-7-N1-4	0,37±0,83	1,09±0,99	0,87±1,08	14,11	0,001	AB*** AC**
N7-10-N1-4	3,09±1,56	4,09±1,56	3,57±1,81	9,48	0,001	AB*** BC**
N7-10-N4-7	2,72±1,49	3,00±1,33	2,70±1,38	1,53	NC	

(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

4.8. 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 22). 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 22. 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 23. 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 24. 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 23).

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 24).

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

Jak już wspomniano bieg na dystansie 400 m ppł to bardzo widowiskowa konkurencja, wymagająca od zawodniczek i zawodników wszechstronnych zdolności kondycyjnych i koordynacyjnych. W analizie biegów ocenia się zwykle dwie główne składowe jakimi są parametry czasowe i parametry przestrzenne. Mniejszą wagę poświęca się ocenie techniki biegu oraz technice pokonywania płotka.

Autorzy tacy jak Iskra (2003) czy Gasilewski (2009) wskazują na istotny wpływ budowy somatycznej na technikę pokonywania płotków oraz specyfikę biegu pomiędzy płotkami. Analizy przeprowadzone na mężczyznach startujących na dystansie 400 m ppł wskazały, że budowa somatyczna jest szczególnie ważnym elementem wpływającym na poziom osiągniętych wyników. Dzieje się tak za sprawą przepisów regulujących parametry dystansu, tj. wysokość płotków oraz odległości pomiędzy nimi (Iskra 2003).

Badania przeprowadzone przez Wesołowską (2006) na grupie uczennic szkół średnich wykazały, że największe zależności pomiędzy wynikiem a budową somatyczną występują u kobiet w wieku 17 lat. Autorka jako najbardziej prognostyczne czynniki wskazuje odpowiednie proporcje ciała oraz długość kończyn dolnych.

Masa mięśniowa, obwód uda oraz grubości fałdu skórno-tłuszczowego, a także wysokość ciała i masa tkanki aktywnej to elementy istotnie wpływające na rezultat biegu przez płotki według badań Iskry (2001).

Publikacja Pietrzaka i Iskry (2016), w której dokonano m. in. oceny budowy somatycznej zawodniczek i ich zmian w latach od 1978 do 2014, wskazuje, że zawodniczki mają coraz mocniejszą budowę ciała.

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).

Niektórzy autorzy (Gupta i wsp., 1999; Guex, 2012) wskazują, że poza techniką pokonywania przeszkody poziom wytrzymałości beztlenowej oceniany wynikiem biegu na płaskim dystansie 400 m jest istotnie powiązany z czasem biegu na 400 m ppł. Analizy przeprowadzone na potrzeby tej rozprawy wskazują jednak na spadek tej relacji, a także brak istotnej korelacji między wynikiem końcowym a TI ($r = 0,11$).

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 międzypłatkowych 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 odcinaka 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).

W oparciu o powyższy podział Iskra i wsp. (2021) wyróżnili różne strategie pokonywania dystansu wśród elitarnych zawodników płci męskiej. Każda z pokonywanych części została przez nich sklasyfikowana jako („szybka”, „średnia” i „wolna”) i była rozpatrywana indywidualnie w porównaniu do średniej wyników całej badanej grupy. W niniejszym badaniu zauważono istotne różnice w czasie potrzebnym na pokonanie pierwszej części dystansu w analizach uwzględniających różne okresy startowe kobiet. Analizy te wykazały, że zawodniczki startujące przed rokiem 1997 biegały istotnie wolniej niż zawodniczki późniejszych okresów. 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 ($t_{0-1} \dots t_{5-6}$), 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 parcjalnej 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.

Drugim istotnym aspektem analizy strategii biegu na dystansie 400 m ppł jest tak zwany „rytm płotkarski”, czyli liczba kroków wykonywana pomiędzy poszczególnymi jednostkami płotkarskimi. W większości analiz wskazano stałą liczbą kroków: 15 lub 16 w pierwszej części dystansu (Bankin, 1995; Qiuhua i wsp., 2002; Beckenham i Rosemond, 2006). Wnioski płynące z niniejszej analizy są zgodne z tymi prezentowanymi w pracach powyżej wspomnianych autorów. Podkreślić należy, iż niektóre najlepsze biegaczki na świecie pierwszą część dystansu pokonują w „rytmie” 14 kroków. Bieg „rytmem” 15 krokovym na odcinku całego dystansu jest zjawiskiem bardzo incydentalnym i jedynie kilku zawodniczkom udało się ta sztuka: Ponomariewa, Bol.

Mocne otwarcie biegu związane z mniejszą liczbą kroków w pierwszej fazie biegu prowadzi do szybszego narastania zmęczenia, co w konsekwencji przedkłada się na zmniejszenie prędkości w dalszej części biegu i wymusza na zawodniczkach zmianę liczby kroków pomiędzy płotkami. Na przykładzie owej analizy zmiana rytmu najczęściej dokonywana jest po 6 płotku. Zwykle objawia się to dodaniem jednego kroku na drugim łuku oraz przejściem w „rytm” 17 krokovy na ostatniej prostej. Opisane zjawisko zmiany „rytmu” biegu w drugiej części dystansu zostało odnotowane w licznych publikacjach (Beckenham i Rosemond, 2006; Xinyong i Manyun, 2003).

Szybszy start biegu świadczy o przygotowaniu siłowym i szybkościowym, odzwierciedla się również we wcześniejszych rozważaniach dotyczące masy ciała. Stwierdzenie to jest spójne z publikacją Pietrzaka i Iskry (2016), którzy wskazują, że kobiety o typie siłowym i szybkościowym istotnie szybciej pokonują pierwszą część dystansu. Ponadto zauważyli, że struktura przestrzenna, czyli liczba kroków wykonanych w kolejnych przestrzeniach międzypłatkowych jest ściśle związana ze wzrostem zmęczenia i skróceniem długości kroku. Tyczy się to szczególnie współczesnych płatkarek, które zaczynają bieg szybciej, wykonując mniej kroków, niż robiły to zawodniczki w latach 80. i 90. (Pietrzak i Iskra, 2016; Przednowek i wsp. 2016).

Iskra i wsp. (2022) w badaniach, których celem było wskazanie optymalnej strategii w biegu na 400 m kobiet, wskazują na szczególne uwzględnienie wpływu asymetrii. Jest to istotne nie tylko ze względu na różnice w uzyskanych wynikach, ale również liczbę kroków wykonanych pomiędzy płatkami oraz liczbę zmian kończyny dolnej atakującej z lewej na prawą i odwrotnie.

Aspekt asymetrii czynnościowej ciała ludzkiego dotyka wielu dyscyplin sportu wymagających efektywnego wykorzystania obu kończyn. Problem ten jest bardzo istotny w odniesieniu do dystansu 400 m ppł, a w zasadzie do pokonywania kolejnych płatków. W ujęciu biomechanicznym optymalnym rozwiązaniem byłoby atakowanie wszystkich płatków lewą kończyną dolną, co pozwoliłoby zminimalizować negatywne skutki działania siły odśrodkowej (Iskra, 2012). Taki wariant może zostać spełniony jedynie, gdy zawodniczki przemieszczałyby się w „rytmie” 15 lub 17 krokowym. Rytm 15 krokowy jest praktycznie nieosiągalny do wykonania, z kolei rytm 17 krokowy był popularny w okresie rozwoju konkurencji. Współczesna strategia biegu, która charakteryzuje się stosunkowo szybkim rozpoczęciem biegu skutkuje wzrostem zmęczenia, a w konsekwencji skróceniem długości kroku w dalszej części biegu, co finalnie wymusza zmianę liczby kroków i atakowanie przeszkód kończyną „słabszą”. Sposoby radzenia sobie zawodników ze zjawiskiem asymetrii funkcjonalnej były przedmiotem badań Iskry i Walaszczyk (2007) oraz Iskry (2008).

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).

Wykorzystanie analizy czynnikowej w poszukiwaniu grup zmiennych wpływających na końcowy wynik to sprawdzona metoda analizy naukowej, także w biegu przez płotki (Iskra

i wsp., 2021, 2022). Analiza EFA to jedna ze statystycznych metod analizy czynnikowej, która pozwala na wyodrębnienie najważniejszych zmiennych (parametrów) w ocenie mistrzostwa sportowego. W poszukiwaniu „zwycięskich” parametrów naukowcy i trenerzy szukają odpowiedzi na pytanie – co jest najważniejsze? Eksploracyjna analiza czynnikowa grupuje związane ze sobą zmienne, wyodrębniając najważniejsze. Jest ona zbliżona do powszechniej stosowanej analizy PCA (Principal Component Analysis), różnica polega na selekcji zmiennych: w analizie PCA ze zbioru zmiennych odrzucane są najmniej istotne czynniki, z kolei w analizie EFA do pustego zbioru włączane są kolejno czynniki od najistotniejszego. Zastosowanie tego typu analiz służy skompresowaniu liczby zmiennych i było już wielokrotnie wykorzystywane w ocenie techniki ruchu w wybranych dyscyplinach sportu (Campos i wsp. 2013, Federoff i wsp. 2012). Campos i wsp. (2013) wyodrębnili grupy parametrów charakteryzujących odbicie w skoku w dal, Federoff i wsp. (2012) technikę zjazdu na nartach, a Dona i wsp. (2009) chód sport. Podstawy wykorzystania PCA w analizie sportowej przedstawili Hughes i Barlett (2002) oraz O’Donoghue (2008).

Wykorzystanie PCA w ocenie biegu na 400 m przez płotki ma wieloletnią tradycję. Analizy dotyczą elementów budowy ciała (Iskra i wsp., 2003), obciążeń treningowych czy parametrów kinematycznych pokonywania płotka (Iskra i wsp., 2003).

W analizie własnej (400 m ppł. kobiet) wyodrębniono cztery czynniki wyraźnie różnicujące zmienne czasowe (Czynnik 1) i parametry przestrzenne (czynnik 2). To nieco inne dane w porównaniu z grupą mężczyzn (Iskra i wsp., 2023), w której dominujące znaczenie miały parametry związane z liczbą kroków. Dwa kolejne czynniki akcentują początkową i końcową część biegu (czynnik 3) oraz te zmienne, które świadczą o przebiegu mistrzostwa sportowego (czynnik 4). Wyodrębniony w grupie mężczyzn czynnik obejmujący budowę ciała (Iskra i wsp., 2023) został zawarty w czynniku 1 (BMI) oraz w czynniku 2 (wysokość i masa ciała).

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 zawodniczki (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 (t_{5-6}) jako najistotniejszy fragment 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.

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. Buttler 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 motorickyh 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 ex ample 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 Manner und Frauen bei den OlympischenSpielen 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. Vzhľad sportovního výkonu na 400 m překazek mužu 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 prebehu nekterých závodu na ME Stuttgartu. *Atletika*; 12:17-20.
87. Moravec P, Susanka P, Stepanek J. (1990) Casová analýza, frekvence a daleka 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*; 21:5209–540.
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 Rhythmus-schulung 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 Hurdlers. *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: pierwyj 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.

STRESZCZENIE

Bieg przez płotki kobiet na dystansie 400 m to widowiskowa konkurencja, której początki wywodzą się z crossowych biegów terenowych. Przeniesienie rywalizacji biegaczy terenowych na płyty stadionu zostało zapoczątkowane w Anglii. Pierwsze żeńskie zmagania lekkoatletyczne na dystansie płotkarskim odbywały się w 1895 r. w Poughkeepsie w stanie Nowy York pod nazwą „Field Day”. Za pierwsze międzynarodowe zawody lekkoatletyczne kobiet uznaje się zorganizowane w 1921 r. tzw. „Monte Carlo Games”. Dystans 400 m ppł kobiet w 1984 r. zagościł na stałe w programie Igrzysk Olimpijskich.

Bieg na dystansie 400 m ppł uważany jest za jeden z najtrudniejszych dystansów wśród konkurencji lekkoatletycznych. Trudności przypisywane pokonywaniu tego dystansu wynikają ze złożonej specyfiki biegu, mianowicie połączenia zdolności szybkościowych i wytrzymałościowych oraz umiejętności technicznych związanych z pokonywaniem kolejnych płotków. Bieg przez płotki złożony jest z dwóch kluczowych aspektów: biegu sprinterskiego pomiędzy płotkami i elementów technicznych związanych z efektywnym pokonaniem kolejnych płotków.

Na potrzeby analiz bieg na dystansie 400 m ppł dzielony jest w wielu różnych wariantach, z których najczęściej wyróżnia się podział na pierwszą i drugą połowę dystansu lub rozpatrywanie kolejno następujących po sobie odcinków 100 metrowych. Celem bardziej wnikliwej analizy dystans dzielony jest 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). Pokonanie poszczególnych składowych dystansu można opisać parametrami czasowo-przestrzennymi. Obie składowe tworzą strategię pokonania dystansu, mianowicie wykonania założonej liczby kroków na poszczególnych etapach biegu, nazywanych w żargonie trenerskim „rytmem płotkarskim” oraz odpowiednim doбором prędkości, która przekłada się na czas pokonywania poszczególnych fragmentów. Obie te składowe stanowią podstawowe elementy porównawcze pomiędzy poszczególnymi zawodnikami i ich strategiami pokonania dystansu.

Określenie czasowo-przestrzennej strategii biegu na 400 m przez płotki kobiet na mistrzowskim poziomie zaawansowania było kluczowym celem niniejszej pracy.

Materiałem badawczym, który stał się podstawą opracowań związanych z realizacją podejmowanego tematu są 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.

Analizy statystyczne przeprowadzono w oparciu o analizy regresji, analizy eksploracyjnej analizy czynnikowej oraz analizę ANOVA.

Wyniki niniejszych analizy nie wskazują aby parametry budowy somatycznej w istotny sposób wpływały na końcowy rezultat biegu płotkarskiego. Za bark istotnych korelacji z wynikiem biegu na 400 m ppł kobiet może odpowiadać duża homogenność grupy. Niniejsze analizy nie wykazały aby TI istotnie korelował z wynikiem biegu na dystansie 400 m ppł kobiet w odniesieniu do finalistek najważniejszych zmagani lekkoatletycznych. 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. Analiza regresji wskazuje odcinek pomiędzy 5 i 6 płotkiem (t5-6) jako najistotniejszy fragment biegu. 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.

Wybór optymalnej strategii biegu jest jednak rzeczą indywidualną i powinien być dopasowany do warunków fizycznych zawodniczki oraz jej zdolności koordynacyjnych i wytrzymałości.

SUMMARY

The women's 400 m hurdles race is a spectacular competition whose origins come from cross-country races. The transfer of cross-country runners' competition to the track was initiated in England. The first women's track and field competition on the hurdle distance took place in 1895 in Poughkeepsie, New York under the "Field Day" name. The first international track and field competition for women was considered to be organized in 1921, the so-called "Monte Carlo Games". In 1984, the women's 400 m hurdles became a permanent discipline of the Olympic Games program.

The 400 m hurdle run is considered one of the most difficult distances among track and field competitions. The difficulties attributed to covering this distance result from the complex character of the run, namely the combination of speed and endurance abilities as well as technical skills related to clearing the subsequent hurdles. The hurdles race consists of two key aspects: the sprint race between the hurdles and the technical elements related to the effective clearing the subsequent hurdles .

For the purposes of the analysis, the 400 m hurdle run is divided into many different variants, the most common of which are the division into the first and second half of the distance or consideration of successive 100-meter sections. For a more thorough analysis, the distance is divided into three components: runway - from the start to the first hurdle (45 m), run between the hurdles - 9 spaces between hurdles, 35 m each, and finish - the distance between the last hurdle and the finish line (40 m) . Covering the individual components of the distance can be described by time and space parameters. Both components form a strategy for covering the distance, namely taking the assumed number of steps at individual stages of the run, called in the coaching jargon "stride pattern" and the appropriate speed, which create the time of covering sections. Both of these components are the basic elements of comparison between competitors and their strategies to cover the distance.

Determining the spatio-temporal strategy of women's 400 m hurdles at the master level was the key objective of this paper.

The research material, which became the basis for studies related to the implementation of the undertaken topic, are the results obtained from the preliminary analysis of 324 individual 400m hurdles, in which 151 female runners participated, during the most important championship level athletics competitions held in the years 1978 to 2022.

Statistical analysis was performed based on regression analyses, exploratory factor analysis and ANOVA analysis.

The results of these analysis do not indicate that the parameters of the anthropometric characteristics significantly affect the final result of the hurdle race. The large homogeneity of the group may be responsible for the lack of significant correlations with the results of the women's 400 m hurdles. These analyzes did not show that TI significantly correlated with the result of the women's 400 m hurdles run in relation to the finalists of the most important athletics competitions. The correlation analysis of running parameters significantly affecting the final result of the run showed the highest correlation with time parameters - both single (1 JP) and added (combining from two to several JP). The time of covering the section between the 6th and 10th hurdles seems to be one of the most important parameters determining the result of the women's 400 m hurdles race. The regression analysis indicates the section between the 5th and 6th hurdles (t5-6) as the most important part of the run. The difference in the running strategy, taking into account the different levels of advancement of the competitors, indicates changes in the number of steps taken, which is significantly lower in the group of the fastest competitors.

However, the choice of the optimal running strategy should be considered individually and adjusted to the athlete's physical conditions and her coordination abilities and endurance

SPIS TABEL

Tabela 1. Finałowe biegi na 400 m przez płotki uwzględnione w analizie	25
Tabela 2. Charakterystyka badanej grupy i korelacja poszczególnych parametrów z wynikiem biegu na dystansie 400m ppł.....	30
Tabela 3. Podstawowe parametry czasowe biegu na 400 m ppł kobiet (dane wyrażone w sekundach)	32
Tabela 4. Skrajne i charakterystyczne parametry czasowe biegu na 400 m ppł kobiet.....	32
Tabela 5. Czasowe parametry dodawane (dane w sekundach).....	32
Tabela 6. Czasowe parametry szacowane (dane w sekundach).....	33
Tabela 7. Różnice parametrów czasowych (dane w sekundach).....	33
Tabela 8. Czasowe parametry procentowe	34
Tabela 9. Podstawowe parametry przestrzenne	36
Tabela 10. Dodawane zmienne przestrzenne 2-3-4 JP	37
Tabela 11. Parametry przestrzenne – różnice	37
Tabela 12. Analiza korelacji wyniku biegu na 400 m przez płotki kobiet z wybranymi zmiennymi	38
Tabela 13. Parametry regresji dla zmiennej – czas biegu na 400 m przez płotki.....	41
Tabela 14. Parametry regresji dla zmiennej – czas biegu między płotkami (T1-10)	42
Tabela 15. Parametry regresji dla zmiennej – czas biegu w pierwszej części biegu (T1-4)	43
Tabela 16. Parametry regresji dla zmiennej – czas biegu w drugiej części biegu (T4-7)	43
Tabela 17. Parametry regresji dla zmiennej – czas biegu w trzeciej części biegu (T7-10)	43
Tabela 18. Analiza EFA wybranych zmiennych w poszukiwaniu elementów strategii biegu na 400 m przez płotki	45
Tabela 19. Charakterystyka najlepszych zawodniczek startujących na dystansie 400 m ppł z podziałem na okresy czasowe (n=142).....	47
Tabela 20. Parametry czasowe najlepszych zawodniczek startujących na dystansie 400 m ppł z podziałem na okresy czasowe (n=142)	48
Tabela 21. Parametry przestrzenne najlepszych zawodniczek startujących na dystansie 400 m ppł z podziałem na okresy czasowe (n=142).....	49
Tabela 22. Różnice w budowie ciała i zdolności motorycznych między płotkarkami o zróżnicowanym poziomie sportowym	50
Tabela 23. Różnice wybranych parametrów czasowych między płotkarkami o zróżnicowanym poziomie sportowym.....	50

Tabela 24. Różnice wybranych parametrów przestrzennych między płotkarkami o zróżnicowanym poziomie sportowym	51
--	----

SPIS RYCIN

Rycina 1. Struktura biegu na 400 m przez płotki (Iskra 1999).....	10
Rycina 2. 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.....	11