



AKADEMIA WYCHOWANIA FIZYCZNEGO
IM. POLSKICH OLIMPIJCZYKÓW WE WROCLAWIU

Mateusz Jopek

**ASYMETRIA FUNKCJONALNA W
KSZTAŁTOWANIU SZYBKOŚCI MAKSYMALNEJ
W POWTARZANYCH BIEGACH SPRINTERSKICH**

Rozprawa doktorska wykonana w Zakładzie Lekkoatletyki

Promotor

prof. dr hab. Krzysztof Maćkała

Wrocław 2024

Spis treści

I WSTĘP	3
I 1. Wprowadzenie	3
I 2. Charakterystyka biegów sprinterskich	3
I 3. Motoryczne podstawy biegów krótkich	5
I 4. Fizjologiczne podstawy szybkości w biegach krótkich	6
I 5. Prędkość biegu jako funkcja długości i częstotliwości kroku	9
I 6. Kinematyczna struktura biegów sprinterskich	10
I 7. Asymetria funkcjonalna	13
II CEL PRACY I PYTANIA BADAWCZE	17
II 1. Cel pracy	17
II 2. Pytania badawcze	17
III MATERIAŁ I METODY BADAWCZE	18
III 1. Materiał badawczy	18
III 2. Przebieg badań	19
III 2.1. Pomiary budowy somatycznej	20
III 2.2. Pomiar parametrów kinematycznych biegu na 50 m	20
III 3. Analiza statystyczna	22
IV ANALIZA WYNIKÓW	25
IV 1. Charakterystyka badanych grup	25
IV 1.1. Parametry kinematyczne	26
IV 2. Analiza asymetrii	32
IV 2.1. Charakterystyka asymetrii między zawodnikami i między biegami	32
IV 2.2. Regresja krokowa wsteczna	44
IV 2.3. Profile asymetrii	46
V DYSKUSJA	50
V 1. Analiza kinematyki oraz indeksów symetrii biegu na 50 metrów z podziałem na poszczególne fazy	50
V 1.1. Całkowity dystans 50 metrów	51
V 1.2. Dystans 20 metrów (faza przyspieszenia startowego)	52
V 1.2. Dystans 30 metrów (faza prędkości maksymalnej)	55

V 2. Podsumowanie	61
V 3. Ograniczenia	62
VI WNIOSKI – PRAKTYCZNA APLIKACJA	63
VII LITERATURA	65
STRESZCZENIE	78
ABSTRACT	80
SPIS RYCIN	82
SPIS TABEL	83
SPIS WYKRESÓW	84

I WSTĘP

I 1. Wprowadzenie

Skuteczność w biegach sprinterskich zależy od wielu czynników, w tym strategii startowej, długości kroku, częstotliwości kroku, wymagań fizjologicznych, biomechaniki, wpływów nerwowych, składu mięśni, antropometrii oraz warunków na bieżni i warunków środowiskowych (Coh i wsp. 2010). Start w biegu krótkim oraz faza przyspieszenia zależy w dużej mierze od generowanej siły podstawowych grup mięśniowych. Dodatkowymi czynnikami wpływającymi na skuteczność startu z bloku są: czas reakcji (czas do rozpoczęcia reakcji na dźwięk pistoletu startowego), czas ruchu (początek reakcji do końca ruchu) i czas odpowiedzi. Maksymalna prędkość biegu jest wynikiem długości kroku i częstotliwości kroku. Długość kroku może być znacznie ograniczona przez warunki somatyczne danej osoby poziom mocy kończyn dolnych, stopień i elastyczność i ruchomości stawów oraz technikę biegu. Na częstotliwość kroku może wpływać stopień funkcjonalności układu nerwowo-mięśniowego oraz uwarunkowania treningowe. Ze względu na dwunożny charakter lokomocji w biegach sprinterskich, należy zwrócić uwagę na obustronną asymetrię podczas kroku biegowego, która ma również wpływ na efektywność generowania maksymalnej prędkości. W związku z tym uwarunkowania fizjologiczne, budowa ciała, właściwy trening są najbardziej wpływowymi determinantami poprawy wyników sprintu (Mero i wsp. 1992, Majumdar i wsp. 2011, Jousté i wsp. 2016, Haugen i wsp. 2019a, Haugen i wsp. 2019b, Bissas i wsp. 2022).

I 2. Charakterystyka biegów sprinterskich

Pojęcie sprintu odnosi się do krótkich i intensywnych wysiłków biegowych, które wymagają wysokiej wydolności beztlenowej układu (Amusa i wsp. 2003). W większości sportów uzyskiwanie jak najwyższego poziomu szybkości, przejawiającego się formą biegu sprinterskiego, czyli trybem przemieszczania się z dużą prędkością ma kluczowe znaczenie na osiągnięty wynik (Cissik 2002, Cronin i wsp. 2005, Sugisaki i wsp. 2011). Nie inaczej jest w lekkiej atletyce, gdzie czystym przejawem pojęcia sprintu są biegi krótkie: 60 m na hali oraz klasyczne dystanse 100 i 200 m rozgrywane na stadionie. Pomimo tego, najbardziej ekscytującym wydarzeniem w światowej rywalizacji jest bieg na dystansie 100 metrów.

Możliwość uzyskania tytułu najszybszego człowieka na Ziemi oraz ustanowienie nowego rekordu świata jest zaszczytem spotykającym się z wielkim uznaniem. Sprinterzy z całego globu dążą do tego, aby rywalizować ze sobą o miano najszybszego człowieka na świecie. Dzieje się to podczas największych międzynarodowych imprez, począwszy od czasów starożytnej Grecji, a następnie kontynuując to od nowożytnych igrzysk olimpijskich rozegranych w 1896 roku (Yuk 2011).

Głównym celem w biegach sprinterskich jest pokonanie określonego dystansu w jak najkrótszym czasie. W przeciwieństwie do innych biegów sprinterskich, takich jak biegi na 200 metrów lub 400 metrów realizowanych po łuku, głównie biegi po prostej (60 oraz 100 metrów) są najczęściej wykorzystywanymi dystansami do badań nad kluczowymi aspektami biegów sprinterskich. Skuteczność w biegach krótkich po prostej zależy od wielu czynników, które można podzielić na: środowiskowe, mechaniczne/sprzętowe, biomechaniczne oraz psychofizjologiczne (Majumdar i wsp. 2011). Elementami ruchu w trakcie biegu sprinterskiego są: praca kończyn dolnych, praca kończyn górnych, postawa oraz harmonijna koordynacja wszystkich komponentów ciała biorących udział podczas biegu z maksymalną prędkością (Ariani 2021). Czas biegu sprinterskiego uzyskany przez zawodników jest mocno skorelowany z maksymalną prędkością rozwijaną podczas jego trwania. Istotnym czynnikiem ograniczającym bieg sprinterski jest siła grawitacji, której zawodnicy muszą się przeciwstawiać w trakcie całego biegu. Uzyskują to poprzez generowanie dużej siły pionowej reakcji podłoża podczas każdego kroku biegowego, aby osiągnąć jak największą prędkość (Maćkała 2007, Coh i wsp. 2010a).

W biegach krótkich sprinter musi szybko reagować (czas reakcji), przyspieszać tak długo, jak to możliwe (moc), osiągać najwyższą możliwą prędkość biegu (prędkość maksymalna), utrzymywać ją tak długo, jak to możliwe (wytrzymałość na prędkość maksymalną) i minimalizować utratę prędkości spowodowaną zmęczeniem (wytrzymałość na prędkość submaksymalną). Klasyczny bieg sprinterski może być podzielony na następujące fazy: wyjścia z bloków, przyspieszenia, prędkości maksymalnej i zwalniania, które są powszechnie przyjęte jako determinanty krzywej prędkości w stosunku do czasu (Smirniotou i wsp. 2008). Najbardziej skomplikowaną częścią biegów sprinterskich jest przyspieszenie startowe, którego celem jest dążenie do osiągnięcia jak najwyższej wartości prędkości maksymalnej. Większość światowej klasy sprinterów prędkość maksymalną

osiąga pomiędzy 60 a 70 m biegu (Coh i wsp. 2010). Słaby czas reakcji, błędy techniczne podczas wyjścia z bloków oraz niezdolność do rozwinięcia jak najwyższej prędkości w tej fazie (przyspieszenie) biegu, negatywnie wpływa na końcowy wynik biegu (Smajlovic i wsp. 2006, Gürses i wsp. 2018). Prawdopodobnie jest to spowodowane brakiem utrzymania właściwej optymalizacji kroku biegowego (długość/częstotliwość) w fazie przyspieszenia startowego, co wpływa na wielkość rozwijanej prędkości (Smajlovic i wsp. 2006, Gürses i wsp. 2018). Jest to istotny element, ponieważ w początkowej fazie przyspieszenia sprinter porusza się krokiem odbijającym, a w dalszej fazie biegu krokiem zamachowym (Coh i wsp. 2010).

I 3. Motoryczne podstawy biegów krótkich

Zdolności motoryczne są niewątpliwie bardzo złożonym zagadnieniem, które poprzez liczne teorie i eksperymenty jest stosunkowo dobrze zbadane. Uczestniczą one w realizacji wszystkich rodzajów ruchu, a u ich podstaw leży sprawność układów, zwłaszcza nerwowo-mięśniowego, który odpowiada za intensywność, czas trwania i regulację ruchu. Te zdolności zapewniają silne, szybkie, trwałe, precyzyjne i skoordynowane wdrażanie różnych zadań motorycznych (Pavlović, 2006). Wielu autorów w dotychczasowych badaniach doszło do wniosku, że istotny wpływ na wyniki w biegach krótkich mają właśnie zdolności motoryczne i funkcjonalne (Homenkov 1997, Brown i wsp. 2000a, Markovic i wsp. 2007, Coh i wsp. 2010, Iseni i wsp. 2015). Siła eksplozywna, szybkość i gibkość to kluczowe zdolności, które mogą wpłynąć na poprawę osiągnięć sprintera (Radic i wsp. 2009, Iseni i wsp. 2015).

Szczególne uwagę w biegach krótkich trenerzy skupiają na sile eksplozywnej oraz szybkości reakcji nerwowo-mięśniowej sprintera (Aslani 2016). Siła eksplozywna jako zdolność motoryczna, jest jednym z głównych determinantów sukcesu w niemalże każdej dyscyplinie sportowej, która wymaga realizacji zadania ruchowego/startowego w jak najkrótszym czasie (Newton i wsp. 1994). Siła eksplozywna, a właściwie moc eksplozywna, jest fundamentalna z punktu widzenia biegów krótkich, gdyż sprinter wykorzystuje ją w momencie wyjścia z bloku startowego i fazie przyspieszenia. Wykazuje ona również duży wkład w proces generowania prędkości maksymalnej na dystansie (Ihsan 2020). Skuteczność wykorzystania mocy eksplozywnej uwarunkowana jest jej wielokierunkowym

oddziaływaniem wynikającym z połączenia dwóch podstawowych zdolności motorycznych, a mianowicie szybkości i siły (Bafirman 2008). Doprecyzowując, jej skuteczność przejawia się w postaci zdolności mięśni do radzenia sobie z obciążeniem przy dużej szybkości skurczu (Jamal i wsp. 2012). To, jak duża będzie siła eksplozywna, zależy od procentu i składu aktywnych jednostek motorycznych danej grupy mięśniowej (Ae i wsp. 1996, Coh i wsp. 2010).

Dodatkowo, w przypadku wielu specyficznych struktur ruchowych moc eksplozywna przedstawiana jest w postaci trzy-elementowego modelu składającego się z szybkości, siły i koordynacji. Według Coh i wsp. 2010b, Qaili i wsp. 2020, brak dostatecznej koordynacji nerwowo-mięśniowej jest głównym determinantem ograniczającym rozwój mocy eksplozywnej.

Istnieje również bardzo silny związek pomiędzy wyjściowym poziomem mocy, a skutecznością sprintu. Im krótszy dystans sprintu, tym silniejsze powiązanie z poziomem mocy (Haugen i wsp. 2019). W swoich badaniach, Seiler i wsp. 2007, Haugen i wsp. 2019 potwierdzają, że zapotrzebowanie na moc wyjściową, często zwaną mocą szczytową w biegach krótkich rośnie wykładniczo wraz z prędkością. Dlatego Loturco i wsp. 2014 uważa, że programy treningowe motorycznie ukierunkowane na rozwój siły, szybkości i mocy, w znacznym stopniu zwiększają możliwości osiągnięcia lepszych wyników w biegach sprinterskich.

I 4. Fizjologiczne podstawy szybkości w biegach krótkich

Biegi krótkie wykonywane po prostej na dystansie 60 oraz 100 metrów są w głównej mierze realizowane w warunkach przebiegu procesów beztlenowych, co oznacza, że fizjologiczne oddychanie mitochondrialne obejmujące zużycie tlenu ma minimalny wkład w generowaną energię. Termin mocy beztlenowej opisuje maksymalne tempo metabolizmu adenozynotrójfosforanu (ATP) przez organizm podczas krótkiego maksymalnego wysiłku. Czynniki metaboliczne są ważnymi determinantami skuteczności biegu sprinterskiego i maksymalnej wydajności beztlenowej organizmu sprintera (Van Praagh i wsp. 2002). Uważa się, że czynniki genetyczne przyczyniają się do około 50% wariacji fenotypu krótkotrwałej wydajności beztlenowej, chociaż pozostaje niejasny rzeczywisty wpływ rozwoju środowiska i czynników genetycznych na różnice obserwowane

w fenotypie (Newton i wsp. 1994). Ze względu na to, że zawsze występuje przynajmniej podstawowe zużycie tlenu, żadne zadanie ruchowe wykonywane przez organizm nie jest całkowicie beztlenowe, jakkolwiek im krótsze jest ćwiczenie, tym mniejszy wkład tlenowy. Na podstawie analiz Newton i wsp. 1994, można stwierdzić, że w intensywnych wysiłkach trwających do 30 sekund około 30% udziału ATP pochodzi z oddychania mitochondrialnego, natomiast w przypadku 10-sekundowego sprintu na 100 metrów ten udział jest prawdopodobnie mniejszy niż 5%.

Dominującym systemem energii metabolicznej w biegach sprinterskich jest system fosfagenowy, który w znacznym stopniu opiera się na zapasach mięśniowych fosforanu kreatyny (PCr). W systemie fosfagenowym kinaza kreatynowa rozkłada fosforan kreatyny do cząsteczki kreatyny i przenosi nieorganiczny fosforan (Pi) z PCr do ADP, tworząc ATP (Hautier 1994 i wsp.) Zatem, gdy system fosfagenowy działa (tak długo, jak fosforan kreatyny pozostaje dostępny), ATP jest regenerowany w bardzo szybkim tempie, a ATP mięśni jest utrzymywane na umiarkowanie stałym poziomie. Co ciekawe, system fosfagenowy jest w stanie zaspokoić zapotrzebowanie energetyczne intensywnie kurczących się mięśni przez około 10 sekund, czyli czas obejmujący elitarny sprint na 100 metrów (Cheetham i wsp. 1986).

Podczas, gdy system fosfagenowy może skutecznie zaspokoić zapotrzebowanie na energię dla maksymalnie kurczących się mięśni w sposób natychmiastowy, jego wkład jest równoważony przez szybką stymulację glikolitycznego szlaku metabolicznego (Van Praagh i wsp. 2002). Metabolizm glikolityczny, który funkcjonuje zasadniczo na glukozie jako źródle paliwa, jest dodatkowym czynnikiem przyczyniającym się do obrotu ATP podczas eksplozywnej pracy mięśni, takiej jak bieg sprinterski. Hautier 1994 i wsp. W swoich badaniach stwierdzili, że metabolizm glikolityczny może stanowić ponad 55% produkcji energii podczas ćwiczeń sprinterskich trwających około 10 sekund. Podobnie jak system fosfagenowy, wydajność systemu glikolitycznego zależy od jego specyficznych rezerw paliwowych (głównie glikogenu mięśniowego z niewielkim zapasem glukozy we krwi) (Hautier 1994 i wsp.).

Według badań Hirvonen i wsp. (1987) maksymalna wydajność sprintu zależy od indywidualnej zdolności do katalizowania wysokoenergetycznych fosforanów, ponieważ elitarni sprinterzy mają zwiększoną zdolność do rozkładania CrP. W badaniu oceniającym

maksymalną wydajność sprintu na dystansach 40, 60, 80 i 100 m ustalono, że spadek prędkości biegu występuje, gdy organizm jest bliski wyczerpania PCr i musi polegać głównie na metabolizmie glikolitycznym w celu uzyskania energii.

Indywidualne różnice we właściwościach mięśni szkieletowych mogą wpływać na maksymalny potencjał prędkości. Costil i wsp. (1976) uważają, że skład włókien mięśniowych jest uwarunkowany genetycznie i trening ma na niego minimalny wpływ. Zwykle przyjmuje się, że wydajność biegu sprinterskiego wymaga zdolności do generowania dużej prędkości poprzez dynamiczne skurcze w mięśniach lokomocyjnych. Prędkość skracania mięśni jest określana przez cechy biochemiczne (aktywność miozyny ATPazy) (Barany 1967, Schulter i wsp. 1994) i architektoniczne (długość włókien; liczba sarkomerów w szeregu) (Spector i wsp. 1980 Bodine i wsp. 1982, Sack i wsp. 1982). Włókna mięśniowe typu I (oksydacyjne) są bogate w mitochondria, mają czerwoną barwę i charakteryzują się dużą wytrzymałością. Włókna mięśniowe typu II, znane również jako szybko kurczliwe włókna mięśniowe, posiadają niewiele mitochondriów, mają białą barwę i wysoką zdolność do silnego i szybkiego skurczu, ze względu na różne struktury kluczowych białek zaangażowanych w skurcz mięśni, które umożliwiają szybszy rozkład ATP i ruch białek kurczliwych podczas skurczu. Włókna szybko kurczliwe są powszechnie dodatkowo klasyfikowane jako szybko kurczliwe typu a (IIa) (umiarkowana odporność na zmęczenie) i szybko kurczliwe typu b (IIb) (niska odporność na zmęczenie) (Prampero i wsp. 2005).

Sprinterzy charakteryzują się wysokim odsetkiem włókien szybko kurczliwych (57-83%) i obszarem włókien typu II w mięśniach nóg (Gollnick i wsp. 1972, Komi i wsp. 1977, Costill i wsp. 1976, Inbar i wsp. 1981, Mero i wsp. 1981), co jest związane ze skutecznością sprintu, mocą maksymalną i wytwarzaniem maksymalnego momentu obrotowego (Inbar i wsp. 1981, Mero i wsp. 1981). Procent włókien szybko kurczliwych jest podobny u mężczyzn i kobiet, ale powierzchnia włókien jest znacznie mniejsza u kobiet (Costill i wsp. 1976). Maksymalna prędkość przemieszczania się poprzez szybkość wykonania pojedynczego kroku jest istotnie powiązana z odsetkiem typów włókien szybko kurczliwych. Z drugiej strony długość kroku jest istotnie ujemnie skorelowana z procentem włókien szybko kurczliwych, biorąc pod uwagę odwrotną zależność pomiędzy szybkością kroku a długością (Mero i wsp. 1981, Inbar i wsp. 1981, Mann 2007).

Efektywne interakcje między mięśniami agonistycznymi, antagonistycznymi i synergistycznymi w kinematyce stawów są kluczowymi cechami optymalnej skuteczności biegu sprinterskiego. Mięsień agonista, mięsień aktywny, musi mieć zdolność do skutecznego generowania dużej siły/mocy. Jednocześnie, aby uzyskać największą wydajność mięśnia agonisty, mięsień ten musi być odpowiednio rozluźniony. Podczas biegu, gdy jeden staw kolanowy się prostuje, drugi staw ulega zgięciu. Podczas wyprostu stawu kolanowego grupą mięśni agonistycznych jest mięsień czworogłowy, a grupą mięśni antagonistycznych są mięśnie ścięgna podkolanowego. Dodatkowo, w każdym ruchu na właściwy jego przebieg, istotny wpływ ma działanie układu nerwowego, dlatego ważne jest trenować ścieżki neuronowe w taki sposób, aby nastąpiła optymalizacja synchronizacji nerwowo-mięśniowej. Skutkuje to zachowywaniem pożądanego wzorca ruchu. Wraz ze wzrostem złożoności struktury ruchowej, zwiększa się liczba szlaków w mózgu i układzie nerwowo-mięśniowym. W treningu sprinterskim układ nerwowy musi być stymulowany do działania specyficznego dla szybkiego ruchu (Ross i wsp. 2001, Geyer i wsp. 2006, Majumdar i wsp. 2011).

I 5. Prędkość biegu jako funkcja długości i częstotliwości kroku

Na podstawie dotychczas przeprowadzonych badań naukowych z zakresu biegów sprinterskich (Ae i wsp. 1991, Gajer i wsp. 1999, Shen 2000, Maćkała 2007) wykazano, że krok biegowy zależy od dwóch fundamentalnych parametrów kinematycznych: długości i częstotliwości. Wyznaczają one wartość rozwijanej prędkości biegowej w momencie przyspieszenia startowego oraz w trakcie biegu na dystansie. Jednakże, nadal nie jest oczywiste jak wpływają one na poszczególne fazy biegów krótkich i jak bardzo determinują wynik końcowy (Gajer i wsp. 1999, Shen 2000, Maćkała 2007). Jednocześnie, ww. parametry kinematyczne są uwarunkowane zdolnościami motorycznymi, procesami energetycznymi, cechami somatycznymi oraz procesami regulacji ruchu i mają wpływ na rytm biegu sprinterskiego, który jest jedną ze składowych prawidłowej techniki sprintu (Gajer i wsp. 1999, Hunter i wsp. 2004, Mackala i wsp. 2010).

Jak wcześniej wspomniano prędkość biegu jest wypadkową długości oraz częstotliwości kroku biegowego, gdzie jeden krok stanowi połowę pełnego cyklu biegowego (Salo i wsp. 2011, Bezodis 2012, Mackala i wsp. 2015a). Można to również rozumieć jako

odstęp czasowy pomiędzy kontaktem jednej stopy z podłożem a momentem kontaktu z podłożem stopy przeciwnej (Hunter i wsp. 2004). Długość kroku zależy głównie od wysokości ciała lub długości kończyny dolnej. Z drugiej strony, szybkość wykonania pojedynczego kroku zależy przede wszystkim od funkcjonowania ośrodkowego układu nerwowego na poziomie korowym i podkorowym i jest silnie uwarunkowana genetycznie (Babic i wsp. 2011). Długość oraz częstotliwość kroku są od siebie wzajemnie zależne. W momencie, kiedy następuje wzrost długości kroku, następuje równocześnie spadek częstotliwości i odwrotnie (Coh i wsp. 1994, Bezodis i wsp. 2008, Babić i wsp. 2011, Chatzilazaridis i wsp. 2012, Mackala i wsp. 2013).

Związek pomiędzy długością i częstotliwością kroku jest unikalny dla każdego sprintera (Segers i wsp. 2006, Bezodis i wsp. 2008), aczkolwiek istnieje wiele dyskusji i badań poszukujących odpowiedzi na interakcję pomiędzy tymi dwoma czynnikami podczas sprintu, które nie do końca są jednoznaczne. Istnieje również wiele pytań w kontekście korzyści płynącej ze zwiększenia jednego z tych dwóch parametrów oraz czy poprawa któregoś z nich wpłynie w znacznym stopniu na osiągnięcie lepszego wyniku sportowego (Mackala 2007). Niemniej jednak, silna korelacja długości i częstotliwości kroku realizowanych na submaksymalnych i maksymalnych prędkościach udowadnia, że są to ważne elementy z punktu widzenia analizy różnorodności techniki sprintu (Wilson i wsp. 2008, Mackala i wsp. 2015a). Co więcej, niewiele wiadomo na temat tego, jak inne zmienne kinematyczne, takie jak: czas kontaktu z podłożem, czas fazy lotu i prędkość kroku, oddziałują na siebie i wpływają na maksymalną prędkość biegu (Mackala i wsp. 2019).

I 6. Kinematyczna struktura biegów sprinterskich

Mechanika biegów sprinterskich odnosi się do zmiennych kinematycznych i kinetycznych związanych z ruchami biegowymi człowieka (Morin i wsp. 2012), gdzie kinematyka jest opisem ruchu i nie uwzględnia sił powodujących ten ruch, natomiast kinetyka odpowiada na pytania „jak? i dlaczego?” ten ruch powstał (Novacheck 1998). Interakcja tych zmiennych ostatecznie określa prędkość biegu sprinterskiego, a tym samym skuteczność biegu sprinterskiego, co czyni je bardzo ważnymi przy identyfikacji różnic w osiągniętych wynikach/czasach. Determinanty kinetyczne są bardzo ważne dla wydajności sprintu, ponieważ wykazano, że miary takie jak maksymalna moc, średnia moc oraz poziome

i pionowe siły reakcji podłoża mają wysoką korelację z maksymalną prędkością (Hunter i wsp. 2004). Ze względu na tę korelację z prędkością maksymalną ważne jest, aby dostrzec relacje między determinantami kinetycznymi a zmiennymi kinematycznymi związanymi ze sprintem, ponieważ wiele z tych zmiennych kinematycznych ma wpływ na kinetykę sprintu, a zatem może również odgrywać ważną rolę w rozwijaniu prędkości maksymalnej (Hunter i wsp. 2004).

Jak wcześniej opisano, wynik w sprincie zależy od integracji czterech faz: fazy bloku startowego (czas reakcji, faza pchania na blokach), fazy przyspieszenia startowego, fazy stałej - maksymalnej prędkości i fazy zwalniania (Mero i wsp. 1992). Z biomechanicznego punktu widzenia częstotliwość, długość, czas kontaktu i czas lotu kroku biegowego zmieniają się w tych fazach (Bruggemann i wsp. 1990, Bellotti 1991, Delecluse 1997, Muller i wsp. 1997). Bieg sprinterski składa się z wyżej wymienionych składowych, które niosą za sobą zróżnicowane wymagania pod względem kinematyki (Delecluse i wsp. 1995). Sukces w tych fazach stawia różne wymagania dla biomechaniki sprintu. Badanie tych wymagań może zwiększyć wiedzę na temat specyficznych zdolności potrzebnych do realizacji różnych etapów sprintu. Może to mieć kluczowe znaczenie dla przekazywania wiedzy potrzebnej w planowaniu programów treningowych mających na celu poprawę wyników w biegach krótkich (Cronin i wsp. 1996).

Jedną z istotnych miar ocen skuteczności startu niskiego w sprincie jest prędkość środka masy (CM) przy wyjściu z bloku. Prędkość opuszczenia przez sprintera bloku jest określana przez impuls fazy odepchnięcia (odbicia) i dlatego może ona być zwiększona przez aplikację większej siły na podpórkę bloku lub dłuższy czas jej generowania (Bezodis i wsp. 2019). Zdolność do wytwarzania siły nie jest spójna przez cały czas trwania nacisku stopy na blok. Na podstawie tego założenia próba dalszego zwiększenia prędkości opuszczenia bloku wraz z wydłużeniem czasu nacisku na jego podpórki nie gwarantuje poprawy tej fazy biegu, a tym samym całościowej skuteczności biegu sprinterskiego (Bezodis i wsp. 2019). Start biegu sprinterskiego i przyspieszenie startowe z bloku to dwie pierwsze pochodne prędkości sprintu, w których zawodnik stara się osiągnąć maksymalną prędkość po wyjściu z bloku. Jedno z badań wykazało, że te dwie fazy odpowiadają za 64% całkowitego wyniku sprintu na 100 metrów (Tellez i wsp. 1984).

W fazie przyspieszenia parametry kinematyczne, takie jak częstotliwość kroku, długość kroku, czas trwania lotu i fazy hamowania (oporowej) ulegają istotnym zmianom (Mero i wsp. 1992). Pomijając opór powietrza, według Hunter i wsp. 2005, Kawamori i wsp. 2014, impuls poziomy netto, generowany w kierunku przemieszczania się, wpływa na zmianę prędkości biegu wraz z każdym kontaktem stopy z podłożem. Z kolei, w przeciwieństwie do fazy przyspieszenia, podczas fazy maksymalnej prędkości sprinterzy starają się utrzymać jak najwyższą wartość maksymalnej prędkości. Dlatego za Mero i wsp. (1992) można stwierdzić, że kinematyka i kinetyka sprintu w tej fazie biegu pozostają w prawidłowej interakcji.

Istnieje wiele badań dotyczących kinematycznych uwarunkowań skuteczności biegu sprinterskiego (Hunter i wsp. 2005, Lockie i wsp. 2013), w których obserwuje się wspólne trendy. Badanie Murphy i wsp. (2003) wykazuje, że zmienne kinematyczne, które mają istotny wpływ na wynik końcowy to krótszy czas kontaktu z podłożem, zwiększona częstotliwość kroku i znacznie wyższa pozioma prędkość przemieszczania się bioder. Wyniki te są zgodne z dalszymi badaniami Huntera i wsp. (2005), które potwierdziły, że wyższa prędkość pozioma przemieszczania się bioder, związana jest z czasem kontaktu stopy z podłożem, co może wiązać się z większą siłą napędową. Hunter i wsp. (2005) identyfikuje ją jako kluczowy, kinetyczny determinant sprintu. Kolejne badania jeszcze bardziej uwiarygodniły ustalenia, które wykazały, że krótsze czasy kontaktu stopy z podłożem były prezentowane przez osoby uzyskujące lepsze czasy biegu sprinterskiego (Lockie i wsp. 2013, Willwacher i wsp. 2016). Udowodniony został również fakt, że długość kroku miała umiarkowanie wysoką korelację z czasami sprintu na 10 m, 30 m i 100 m (Mackala i wsp. 2015b). Wiele innych zmiennych kinematycznych i kinetycznych, takich jak kąt w stawie kolanowym podczas startu (Petraikos i wsp. 2016), kąt w stawie biodrowym (Hunter i wsp. 2005), czas lotu (Hunter i wsp. 2004) oraz częstotliwość kroku (Weyand i wsp. 2000) zostało omówionych i/lub zmierzonych, jako możliwe determinanty wpływające na wynik w biegu sprinterskim. Jakkolwiek Standing i wsp. (2017) uważa, że literatura, nie do końca, w przekonujący sposób potwierdza wpływ ww. parametrów kinematycznych na skuteczność biegu.

I 7. Asymetria funkcjonalna

Według Wielkiego Słownika Języka Polskiego asymetria to różnica wielkości, kształtu albo ułożenia cechująca części albo jakieś elementy, które znajdują się po obu stronach środka całości lub układu i zwykle powinny być jednakowe. W naszych rozważaniach zajmujemy się asymetrią dotyczącą ciała człowieka, w szczególności odzwierciedlającą jego aktywność fizyczną w różnych uwarunkowaniach. W związku z tym, asymetrie ciała można podzielić na np. lokalne (siła na poziomie stawów) i np. globalne (określające skuteczność wykonania skoków). Dalej, lokalne asymetrie można podzielić na kontralateralne (często określane jako asymetrie między kończynami), porównując lewą i prawą stronę ciała oraz ipsilateralne, porównując przeciwne grupy mięśni po tej samej stronie ciała (Ličen i wsp. 2023). Te ostatnie uwarunkowania często są określane jako funkcjonalne, bezpośrednio wpływające na stan i jakość aktywności fizycznej/sportowej. Głównie dotyczy to tzw. asymetrii funkcjonalnej pracy kończyn dolnych jako zjawisko odnoszące się do różnic w czynności prawej i lewej kończyny. Dzięki nim każda z kończyn pomimo występujących różnic funkcjonalnych, razem tworzą spójność całość (Bishop i wsp. 2008). Co więcej, asymetrie między kończynami można rozróżnić w zależności od szeregu cech fizycznych, takich jak siła (Bailey i wsp. 2013, Hart i wsp. 2014), moc (Bell i wsp. 2014, Girard i wsp. 2017) i sztywność nóg (Maloney i wsp. 2017).

Wśród ludzkiej populacji występuje tendencja do używania jednej strony ciała podczas różnych czynności motorycznych. Tendencja ta wynika z faktu, że jedna półkula mózgu dominuje nad drugą, co nazywane jest dominacją mózgową. Ta preferencja u ludzi jest zwykle postrzegana jako preferencja dla ręki lub stopy po określonej stronie ciała podczas wykonywania umiejętności motorycznych (Kačoğlu i wsp. 2019). Wiadomym jest również, że obustronna asymetria jest powszechna u sportowców (Tomkinson i wsp. 2003, Yoshioka i wsp. 2011).

Funkcjonalne asymetryczne adaptacje mogą zatem odnosić się do asymetrycznych wymagań motorycznych (Bayliss i wsp. 2016), które charakteryzują poszczególne dyscypliny sportowe (Maloney i wsp. 2017). Lekkoatleci mogą mieć symetryczne lub asymetryczne wymagania sportowe (realizacja struktur ruchowych) w zależności od tego w jakich konkurencjach startują. Mogą rywalizować w biegach, które są z reguły uważane za symetryczne (Trivers i wsp. 2012) lub mogą rywalizować w rzutach i skokach, które

mogą być asymetryczne z natury (Luk i wsp. 2014). Zadania motoryczne w kontekście symetrii można pogrupować na cztery sposoby zgodnie z propozycjami (Guiarda i wsp. 1987): (Grupa 1) jednostronne (np. odbicie w skoku w dal), (Grupa 2) dwustronnie asymetryczne (np. zamach golfowy), (Grupa 3) dwustronnie symetryczne poza fazą (np. bieganie) i (Grupa 4) dwustronnie symetryczne w fazie (np. podnoszenie ciężarów). Rozsądne może być również rozważenie kategoryzacji sportów przy użyciu tego systemu. Na przykład piłka nożna może zostać sklasyfikowana jako sport z dominacją grupy 2, biorąc pod uwagę obecność zadań z grupy 2, takich jak kopanie, zmiana kierunku i skoki dosiężne. Chociaż istnienie lateralności może być wyraźne w zadaniach z grupy 1 lub grupy 2, może być mniej oczywiste w grupie 3 i grupie 4. Obszerne badania odnotowały znaczące asymetrie podczas biegania (Carpes i wsp. 2007).

Naukowcy i trenerzy zajmujący się biegami krótkimi od zawsze dążą do zrozumienia biomechanicznych czynników (kinematyka i kinetyka) bezpośrednio oddziałujących na wielkość rozwijanej prędkości. Szczególnie dotyczy to szczegółowej analizy pojedynczego kroku biegowego, wykonanego z maksymalną intensywnością. Zatem analiza kinematyczna najszybszych sprinterów na świecie stanowi wyjątkową okazję do zbadania motorycznych granic ludzkich możliwości (Taylor i wsp. 2012). Taka analiza byłaby uważana za niekompletną, gdyby ignorowała dwunożną naturę ludzkiej formy lokomocji. Według wielu autorów (Burkett 1970, Faul i wsp. 2007, Zifchock i wsp. 2008 Aliosmanoğlu i wsp. 2014) jest ona zwykle związana z asymetrią funkcjonalną, często określaną jako mechaniczną. Definiuje się ją jako różnicę wartości parametrów kinetycznych/kinematycznych między prawą i lewą kończyną dolną uzyskaną w aktywności ruchowej np. bieg/sprint. Jest ona częstym tematem badań w biegach krótkich, jakkolwiek dotyczy to sprinterów na poziomie sub-elity (Exell i wsp. 2017, Haugen i wsp. 2018). Asymetria funkcjonalna może wynikać z wielu aspektów uwarunkowanych antropometrycznie, neurologicznie czy motorycznie, np. poziom siły mięśni (Rocheford i wsp. 2006). Dlatego założenie, że wiele mechanizmów przyczynia się do asymetrii funkcjonalnej wydaje się zasadnym (Selim 2023).

Istnieje wiele badań wykazujących, jak istotne jest utrzymanie stosunku siły między mięśniami poszczególnych grup mięśni. Tzw. obustronna asymetria siły w ocenie funkcji nerwowo-mięśniowej kończyny dolnej ogólnie odnosi się do maksymalnej różnicy siły między dwiema kończynami w zależności od punktu odniesienia lub wskaźnika siły

w stosunku do mięśnia kontralateralnego (Hopkins 2000, Young i wsp. 2002, Bini i wsp. 2015). Problem ten szczególnie dotyczy mięśni agonistyczno-antagonistycznych (mięsień dwugłowy uda - mięsień czworogłowy uda) a mięśniami kontralateralnymi w kończynach dolnych (dominująca i niedominująca lub prawa/lewa strona dwugłowy-dwugłowy lub czworogłowy-czworogłowy). Jest to szczególnie istotne w aspekcie tzw. eliminacji strat, wynikających z różnic funkcjonalności kończyn dolnych, co znacząco może wpływać na końcowy wynik biegu, a przede wszystkim pod względem ochrony zawodnika przed urazami (Hopkins 2000, Brown i wsp. 2000b, Woolford i wsp. 2013 Meyers i wsp. 2017, Coratella i wsp. 2018).

Dotychczasowe analizy ww. dysertacji dotyczyły głównie asymetrii kinematycznej podczas biegu sprinterskiego z maksymalną i sub-maksymalną prędkością (Ciacci i wsp., 2010, Exell i wsp. 2017, Haugen i wsp. 2018). Z kolei obecność asymetrii w aspekcie parametrów kinetycznych nie jest czymś nowym, ponieważ były już dotychczas przeprowadzone badania w tym kierunku przez Exell i wsp., 2012a, Exell i wsp. 2012b. Pomimo dogłębnej analizy fazy przyspieszenia i maksymalnej prędkości biegu sprinterskiego, przeprowadzonej przez Johnson i wsp. (2001) i Bezodis i wsp. (2008), ma ona tylko wymiar jednostronny. Skupia się tylko na kinematyce. Podobny wymiar ma analiza rekordowego biegu Usain'a Bolta na 100 metrów (Mackala i Mero, 2013), gdzie asymetria funkcjonalna dotyczy różnic w długości kroku między lewą a prawą kończyną dolną. Z tym faktem związana jest również inna prawidłowość: do 80 m biegu każdy kolejny krok, niezależnie od tego, z której kończyny było odbicie, każdy krok wykazuje tendencję wzrostową, tj. jest dłuższy. Potwierdzają to obserwacje autorów badań m.in. Numella i wsp. 2007, którzy stwierdzili, że 90% prędkości biegacza przypisuje się długości kroku, dalszy wzrost prędkości uzależniany jest od poziomu częstotliwości kroku. Obserwacja ta dotyczy tylko dłuższych odcinków bieganych z maksymalną prędkością (Numella i wsp. 2007).

W badaniach przeprowadzonych przez Wdowskiego i wsp. (2021) stwierdzono, że wartości asymetrii kinematycznej są mniejsze niż 10%, charakterystyki kroku (prędkość kroku, długość kroku, częstotliwość kroku) są mniejsze niż 2%, a asymetrie kinetyczne wahają się od 0,1% do 93,2%. Jednakże przy małej liczebności próby wynoszącej 8 osób konieczne jest wyjaśnienie związku między asymetrią kończyn dolnych a wynikami sprintu. Wynikom tym zaprzeczają badania Exell i wsp. (2017), który stwierdził, że pomimo

występującej, zarówno asymetrii parametrów kinematycznych i kinetycznych nie stwierdzono istotnego związku z rozwijaną prędkością biegu.

Pomimo licznych rozbieżności w kwestii asymetrii funkcjonalnej w biegach sprinterskich, informacje na temat jej wpływu na wynik końcowy są bardzo istotne z praktycznego punktu widzenia. Przede wszystkim mogą zapewnić wgląd w indywidualną asymetrię stawów w obrębie kończyn (Vagenas i wsp. 1991), a także informować trenerów i sportowców o predyspozycjach do kontuzji, zwiększonej skuteczności jednej kończyny w stosunku do kończyny przeciwnej i możliwej nierównowadze w generowaniu sił. (Bissas i wsp. 2022). Dlatego z założenia, że asymetria jest w rzeczywistości niepożądana i należy ją zminimalizować, niektórzy eksperci zalecają nie tylko jej pomiar i identyfikację, ale także aktywne przeciwdziałanie za pomocą programów treningowych/kondycyjnych (Zahálka i wsp. 2013, Girard i wsp. 2017, Tatlıcioğlu i wsp. 2019, Pietraszewski i wsp. 2020).

II CEL PRACY I PYTANIA BADAWCZE

II 1. Cel pracy

Celem pracy jest określenie na podstawie uzyskanych parametrów kinematycznych w biegu na dystansie 50 m występowania symetrii lub asymetrii funkcjonalnej (kinematycznej) i zbadanie jej wpływu na poszczególne fazy biegu oraz na wynik końcowy u zawodników na różnym poziomie sportowym. Dodatkowym aspektem jest porównanie występowania asymetrii i oddziaływania jej w stosunku do osiągniętej prędkości maksymalnej.

II 2. Pytania badawcze

Interpretacja parametrów kinematycznych w oparciu o symetrię i asymetrię kończyn dolnych wymaga odpowiedzi na następujące pytania badawcze:

1. Czy symetria lub asymetria funkcjonalna (kinematyczna) kończyn dolnych występuje w biegu oraz jak wpływa na wyniki w sprincie?
2. Czy fazy biegu sprinterskiego na 50 m różnicują poszczególne parametry kinematyczne pod względem symetrii i asymetrii?
3. Czy poziom sportowy poza wynikiem wpływa na symetrie lub asymetrie parametrów kinematycznych kroku sprinterskiego?
4. Czy wraz ze wzrostem prędkości maksymalnej biegu zmienia się wartość symetrii lub asymetrii funkcjonalnej parametrów kinematycznych w biegach sprinterskich?

III MATERIAŁ I METODY BADAWCZE

III 1. Materiał badawczy

Badania przeprowadzono z udziałem wyselekcjonowanej 18-osobowej grupy najlepszych polskich lekkoatletów w wieku seniorskim i juniorskim, specjalizujących się w biegach sprinterskich, mających rekordy życiowe na dystansie 100 m na poziomie elity (seniorzy $\leq 10,40$) i sub-elity (juniorzy $\leq 11,10$ s). Badani zawodnicy to zawodnicy kadry Polski i medaliści imprez międzynarodowych oraz wielokrotni medaliści Mistrzostw Polski w biegach sprinterskich.

Tabela 1. Przydział do grup, dane antropometryczne badanych oraz ich rekordy życiowe na dystansie 60 m oraz 100 m

Grupa	Badany	Wiek (lata)	Wysokość (m)	Masa (kg)	PB 60 m (s)	PB 100 m (s)
Elita	AK	23	1,97	90	6,74	10,34
Elita	DK	28	1,79	81	6,53	10,05
Elita	PK	21	1,79	71	6,69	10,35
Elita	AŁ	22	1,81	73	6,64	10,40
Elita	PS	30	1,88	86	6,61	10,19
Elita	OW	21	1,77	70	6,60	10,33
Elita	PW	23	1,84	81,5	6,76	10,34
Elita	ŁŻ	22	1,74	70	6,70	10,25
Elita	MZ	18	1,75	68	6,75	10,39
Sub-elita	TB	17	1,82	66	6,86	10,62
Sub-elita	MG	18	1,80	72	6,86	10,55
Sub-elita	DG	19	1,85	78	6,79	10,47
Sub-elita	RL	17	1,84	75	7,10	10,83
Sub-elita	CŁ	19	1,81	70	7,11	10,74
Sub-elita	HR	19	1,70	58	7,25	11,01
Sub-elita	MS	19	1,72	61	7,18	10,92
Sub-elita	MSZ	19	1,75	60	7,42	11,09
Sub-elita	DT	19	1,76	68	6,89	10,55

Protokół badań został zatwierdzony przez Komisję Bioetyczną ds. Badań Naukowych (3/2021) przy Akademii Wychowania Fizycznego im. Jerzego Kukuczki w Katowicach i wykonany zgodnie ze standardami etycznymi Deklaracji Helsińskiej 2013. Dane wykorzystane w rozprawie są częścią projektu grantu naukowego” Optymalizacja wykonania po-aktywacyjnego wzrostu sprawności fizycznej (PAPE) w sprincie lekkoatletycznym oraz analiza kinematyczna biegu sprinterskiego w kolcach lekkoatletycznych wyposażonych w płytę karbonową (RPW/9110/2023), który otrzymał finansowanie z Ministerstwa Sportu i Turystyki.

III 2. Przebieg badań

Eksperyment został przeprowadzony w styczniu 2023 roku podczas zgrupowania kadry narodowej biegów sprinterskich w okresie przedstartowym, co pozwoliło na odzwierciedlenie optymalnych dyspozycji badanych w kontekście gotowości startowej do biegu na 60 m w hali. Umożliwiając zachowanie takich samych warunków środowiskowych (temperatura, wilgotność powietrza, siła wiatru) dla wszystkich badanych zawodników, pomiary zostały przeprowadzone w hali lekkoatletycznej Centralnego Ośrodka Przygotowań Olimpijskich w Spale, pod okiem trenerów kadry narodowej. Badania trwały dwa dni. W pierwszym dniu eksperymentu przeprowadzono badania na grupie juniorskiej (sub-elita), a w drugim dniu na grupie seniorskiej (elita). Podział został dokonany z uwzględnieniem wieku oraz rekordów życiowych w biegu na 100 m według ustaleń $\leq 10,40$ elita, $\leq 11,10$ s sub-elita. Jeden z juniorów został przypisany do grupy seniorskiej ze względu na swój rekord życiowy na poziomie elity i potencjał wskazujący na najbardziej perspektywicznego zawodnika z grupy badanych sprinterów.

Każdy z badanych zawodników przed przystąpieniem do eksperymentu został poddany podstawowym pomiarom antropometrycznym, takim jak wysokość ciała oraz masa ciała. Sprinterzy przed przystąpieniem do biegów wykonali indywidualną rozgrzewkę, tak aby każdy z nich był gotowy do biegu z maksymalną intensywnością. Zawodnicy mieli do wykonania cztery indywidualne biegi sprinterskie z maksymalną intensywnością na dystansie 50 metrów. Start odbywał się z pozycji wysokiej z zakroku. Po każdym zakończonym biegu zawodnicy mieli 5 minut przerwy przed rozpoczęciem kolejnego biegu.

Dla każdego badanego zostały wybrane dwa biegi, które zostały poddane analizie – najwolniejszy oraz najszybszy spośród czterech. Do pozyskania niezbędnych parametrów kinematycznych biegu wykorzystano rozłożone na 50 m urządzenie pomiarowe OptoJumpNEXT firmy Microgate. Pomiar czasu przebiegniętego dystansu został zmierzony przy wykorzystaniu fotokomórki WittyGate firmy Microgate, które dokonały pomiaru czasu na odcinkach 0-20 m oraz 0-50 m.

III 2.1. Pomiary budowy somatycznej

Pomiary antropometryczne zostały przeprowadzone zgodnie z powszechnie przyjętymi standardami, czyli bez wierzchniej odzieży i obuwia. Wysokość ciała została zmierzona od szczytu głowy (vertex) ustawionej w płaszczyźnie oczno-usznej do podstawy (basis), na której stał zawodnik. Pomiar został odczytany z dokładnością do jednego centymetra. Masę ciała zmierzono na wadze lekarskiej z dokładnością do pół kilograma. Na podstawie uzyskanych danych dotyczących masy i wysokości ciała dla każdego sprintera wyliczono wskaźnik masy ciała – body mass index (BMI).

III 2.2. Pomiar parametrów kinematycznych biegu na 50 m

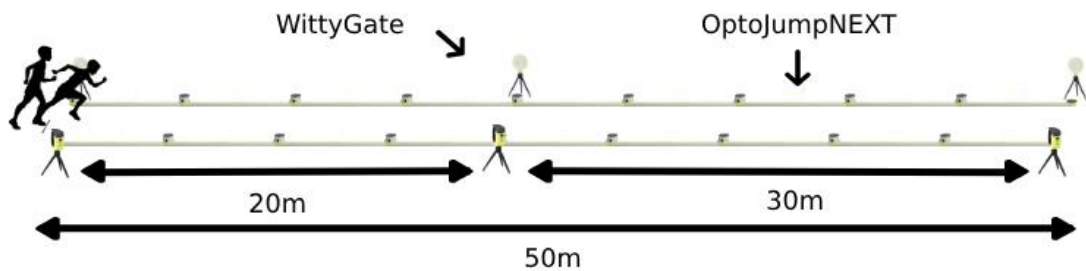
Do pomiaru podstawowych parametrów kinematycznych sprintu na 50 m takich jak: ilość kroków, długość kroków, częstotliwości kroków, czas trwania fazy podporowej, czas trwania fazy lotu, czas wykonania pojedynczego kroku oraz szybkość na danym kroku zostało wykorzystane urządzenie OptoJumpNEXT firmy Microgate.

Jest to urządzenie wykorzystywane do pomiaru różnych parametrów kinematycznych związanych z ruchem, głównie w kontekście treningu sportowego i analizy biomechanicznej. OptoJumpNEXT składa się z dwóch listew (rozmiary: 100cm x 3cm x 4cm), z których jedna odpowiada za przyjmowanie i kontrolę danych, druga za ich elektroniczną transmisję z dokładnością do 1/1000 sekundy. Diody na poprzeczce nadawczej komunikują się w sposób ciągły z tymi na poprzeczce odbiorczej. System wykrywa wszelkie przerwy w komunikacji i oblicza czas ich trwania. Kilka do kilkudziesięciu elementów może być połączonych razem, w celu wydłużenia ścieżki do uzyskania pomiarów. Poprzez

zebranie podstawowych danych dedykowane oprogramowanie umożliwia uzyskanie szeregu parametrów związanych z wydajnością sportowca przy zachowaniu maksymalnej dokładności w czasie rzeczywistym. OptoJumpNEXT jest często stosowany do oceny skoku, szybkości, mocy kończyn dolnych oraz innych parametrów kinematycznych. Dzięki temu urządzeniu można dokładnie monitorować postępy w treningu sportowym oraz identyfikować obszary do poprawy w technice ruchu.

Do pomiaru czasu wykorzystano odrębne urządzenie pomiarowe, system fotokomórek WittyGate, który jest kompatybilny z systemem OptoJumpNEXT. WittyGate od Microgate jest zaawansowanym systemem do pomiaru czasu i śledzenia ruchu w różnych dyscyplinach sportowych. Może być używany między innymi do pomiaru czasu w biegach, zawodach lekkoatletycznych czy innych wydarzeniach sportowych, gdzie precyzja i dokładność pomiaru czasu są kluczowe. WittyGate oferuje zaawansowane funkcje, takie jak bezprzewodowa komunikacja między urządzeniami, synchronizacja wielu punktów pomiarowych, czy możliwość integracji z systemami czasomierzy, co czyni go popularnym wyborem wśród profesjonalistów w dziedzinie pomiaru czasu w sporcie.

Cały system pomiarowy został rozłożony na bieżni lekkoatletycznej na dystansie 50 metrów w szerokości jednego toru lekkoatletycznego. Pełny dystans biegowy został podzielony, aby móc wyszczególnić fazy występujące w biegach krótkich. Pierwszy pomiar czasu oraz parametrów kinematycznych został ustawiony na odcinku od startu do 20 metra, co pozwoliło wyznaczyć tzw. fazę przyspieszenia startowego. Kolejna faza tzw. maksymalnej prędkości o długości 30 m, została wyznaczona między 20 a 50 m biegu. W pomiarach kinematycznych w poszczególnych fazach do analizy statystycznej brane były pod uwagę wyłącznie pełne kroki biegowe, bez kroków granicznych pomiędzy fazami.



Rycina 1. Schemat rozstawienia urządzeń pomiarowych w trakcie biegu na 50 metrów

III 3. Analiza statystyczna

W niniejszej pracy doktorskiej do przeprowadzenia analizy zebranego materiału zastosowano kilka metod statystycznych. Pozwoliły one na dokładne poznanie przebiegu wybranych zmiennych kinematycznych, niezbędnych do wyciągnięcia wniosków. Po przetestowaniu normalności rozkładu za pomocą testu Shapiro-Wilka brakowało podstaw do odrzucenia hipotezy o rozkładzie normalnym. W celu dokonania charakterystyki statystycznej obliczono średnią arytmetyczną, odchylenie standardowe, współczynnik zmienności oraz przedziały ufności. Wśród zastosowanych metod znalazły się: test t-Studenta dla prób niezależnych, jednowymiarowa analiza wariancji (ANOVA), testy post-hoc Bonferroniego, regresja krokowa wsteczna oraz analiza profilowa PAM.

W celu uzyskania wyników symetrii badanych parametrów kinematycznych został zastosowany następujący wzór na indeks symetrii: $IS = \frac{(L-P)}{0,5*(L+P)} 100\%$ gdzie: IS - indeks symetrii, L - wartość uzyskana dla kończyny lewej, P - wartość uzyskana dla kończyny prawej. Wszystkie zmienne obliczono jako procent asymetrii, stosując różnicę bezwzględną podzieloną przez średnią kończyn. Przed obliczeniem asymetrii dane uśredniono dla wszystkich pełnych kroków każdej kończyny na całkowitym dystansie 50 metrów jak i podczas dwóch faz biegu sprinterskiego odpowiednio - 20 metrów (faza przyspieszenia startowego) i 30 metrów (faza prędkości maksymalnej) (Vagenas i Hosizaki, 1992).

Test t-Studenta został zastosowany do porównania średnich z dwóch niezależnych grup. Ta metoda umożliwiła ocenę czy różnice między grupami są statystycznie istotne, co jest kluczowe w weryfikacji hipotez dotyczących wpływu różnych czynników na badane zmienne. Test ten jest szczególnie użyteczny, gdy mamy do czynienia z małymi próbkami i chcemy sprawdzić, czy różnice obserwowane między grupami mogą być przypisane przypadkowi, czy też mają istotne znaczenie. Dodatkowo obliczony został wskaźnik d Cohena (Cohen's d), który jest miarą wielkości efektu, która określa różnicę między dwiema średnimi w jednostkach odchylenia standardowego. Aby go obliczyć, zbiera się średnie i odchylenia standardowe dla obu grup, a następnie oblicza wspólne odchylenie standardowe. Wskaźnik d Cohena oblicza się, dzieląc różnicę między średnimi przez wspólne odchylenie standardowe. Jest to narzędzie pozwalające ocenić praktyczne znaczenie wyników badania.

Jednowymiarowa analiza wariancji (ANOVA) została zastosowana do porównania średnich z więcej niż dwóch grup. ANOVA pozwoliła na ustalenie, czy istnieją statystycznie istotne różnice między grupami w odniesieniu do badanej zmiennej. Metoda ta jest szczególnie efektywna, gdy chcemy zbadać wpływ więcej niż jednego czynnika lub różnych poziomów tego samego czynnika na zmienną zależną. Dzięki ANOVA możliwe było określenie, czy różnice między grupami są większe niż można by się spodziewać na podstawie wariancji wewnątrzgrupowej.

Po przeprowadzeniu analizy ANOVA, w celu zidentyfikowania konkretnych grup różniących się istotnie, zastosowano testy post-hoc. Użycie testu Bonferroniego pozwoliło na dokładne określenie, które pary grup różnią się od siebie. Testy post-hoc są niezbędnym narzędziem w analizie wyników ANOVA, ponieważ same wyniki ANOVA wskazują jedynie na istnienie różnic, ale nie identyfikują ich źródeł.

Regresja krokowa wsteczna została wykorzystana do budowy modelu regresyjnego, który najlepiej opisuje zależności między zmiennymi. Ta metoda selekcji zmiennych polega na rozpoczęciu od pełnego modelu, a następnie usuwaniu najmniej istotnych zmiennych. Proces ten jest powtarzany, aż pozostaną tylko zmienne istotne statystycznie. Dzięki temu możliwe było zidentyfikowanie najważniejszych predyktorów oraz wyeliminowanie zmiennych, które nie przyczyniają się znacząco do wyjaśnienia zmienności zmiennej zależnej.

Analiza profilowa PAM (Partitioning Around Medoids) została użyta do klasteryzacji danych, co pozwoliło na zidentyfikowanie naturalnych grup w zbiorze danych. PAM, w odróżnieniu od popularnych metod takich jak k-średnich, wykorzystuje medoidy, co czyni ją bardziej odporną na wpływ outlierów. Proces ten polegał na inicjalizacji medoidów, przypisaniu punktów do najbliższych medoidów oraz iteracyjnej aktualizacji medoidów, aż do osiągnięcia stabilności. Dzięki tej metodzie możliwe było wyodrębnienie homogenicznych grup i przeprowadzenie dalszej analizy wewnątrz tych grup.

Zastosowanie tych zaawansowanych metod statystycznych pozwoliło na przeprowadzenie kompleksowej analizy danych, co jest kluczowe dla wiarygodności i rzetelności uzyskanych wyników. Każda z metod wносиła unikalną wartość, umożliwiając dokładne zbadanie różnych aspektów badanych zmiennych oraz potwierdzenie postawionych hipotez badawczych zostały zaznaczone w tabelach pogrubionym drukiem. Przyjęto próg istotności na poziomie $p < 0,05$.

IV ANALIZA WYNIKÓW

IV 1. Charakterystyka badanych grup

Wyniki zawarte w tabeli (Tabela 2.) wskazują, że istnieją istotne różnice między grupami elita i sub-elita w zakresie wieku, masy ciała, BMI oraz wyników sportowych (rekordy życiowe na 60 m i 100 m). Brak istotnych różnic zaobserwowano w przypadku wysokości ciała. Grupa elita jest starsza, ma większą masę ciała i wyższy wskaźnik BMI, a także osiąga lepsze wyniki sportowe na 60 m i 100 m w porównaniu do grupy sub-elity.

Tabela 2. Charakterystyka parametrów somatycznych i rekordów życiowych sprinterów z podziałem na: elitę i sub-elitę, $p < 0.05$

Zmienne		n	\bar{x}	s	v	95% Przedział ufności		t	p
						Dolna granica	Górna granica		
Wiek [lata]	Elita	9	23,11	3,7	16	20,28	25,95	3,69	0,0020
	Sub-elita	9	18,44	0,9	4,78	17,77	19,12		
Wysokość ciała [m]	Elita	9	1,82	0,1	3,99	1,76	1,87	1,08	0,2981
	Sub-elita	9	1,78	0,1	2,98	1,74	1,82		
Masa ciała [kg]	Elita	9	76,72	8,0	10,5	70,55	82,9	2,59	0,0197
	Sub-elita	9	67,56	6,9	10,3	62,23	72,88		
BMI [body mass index]	Elita	9	23,22	1,1	4,82	22,36	24,08	3,77	0,0017
	Sub-elita	9	21,19	1,2	5,51	20,29	22,09		
Rekord życiowy 60 m [s]	Elita	9	6,67	0,1	1,18	6,61	6,73	-5,03	0,0001
	Sub-elita	9	7,05	0,2	3,03	6,89	7,22		
Rekord życiowy 100 m [s]	Elita	9	10,29	0,1	1,09	10,21	10,38	-5,55	0,0000
	Sub-elita	9	10,75	0,2	2,06	10,58	10,92		

IV 1.1. Parametry kinematyczne

Zawodnicy z grupy elita uzyskują znacząco lepsze rezultaty w większości analizowanych parametrów kinematycznych w porównaniu z grupą sub-elita na dystansie 50 metrów (Tabela 3). Najbardziej istotne różnice dotyczą czasu biegu, częstotliwości kroków, czasu kontaktu z podłożem, czasu pojedynczego kroku oraz prędkości kroku. W obydwu biegach, tj. wolnym i szybkim, korzystniejsze wyniki uzyskiwała grupa zawodników elity. Różnica w czasach osiągniętych w biegu na 50 metrów wynosząca 0,2 s w wolnym biegu oraz 0,193 s w szybkim biegu na korzyść grupy elita jest istotna statystycznie, co wskazuje na szybsze pokonanie dystansu przez tę grupę nawet w biegu wolnym. Częstotliwość kroków również wykazuje istotną statystycznie różnicę i ma zdecydowanie wyższą wartość u zawodników elity, w obydwu biegach odpowiednio 0,309 krok/s w wolnym i 0,3 krok/s w szybkim. Czasy kontaktu stopy z podłożem w trakcie biegu również są krótsze o 0,011 s i korzystniejsze u zawodników elity, aniżeli u zawodników sub-elity w obydwu biegach. Wynikiem tego, jest również czas pojedynczego kroku (czas lotu + czas kontaktu), który jest krótszy o 0,015 s u zawodników elity w obydwu biegach. W kontekście prędkości wykonania pojedynczego kroku, istotna statystycznie różnica zauważalna jest na korzyść grupy elity i wyniosła w biegu wolnym 0,376 m/s a w biegu szybkim 0,334 m/s. Pozostałe zmienne nie wykazały istotności statystycznej.

Tabela 3. Charakterystyka parametrów kinematycznych najwolniejszego oraz najszybszego biegu na dystansie 50 m z podziałem na: elitę i sub-elitę, $p < 0.05$

Zmienne		n	\bar{x}	s	v	95% Przedział ufności		t	p
						Dolna granica	Górna granica		
Czas biegu 50 m wolny [s]	Elita	9	5,427	0,10	1,84	5,35	5,50	-3,71	0,0019
	Sub-elita	9	5,627	0,13	2,31	5,53	5,73		
Czas biegu 50 m szybki [s]	Elita	9	5,351	0,11	2,06	5,27	5,44	-3,49	0,0030
	Sub-elita	9	5,544	0,12	2,16	5,45	5,64		
Liczba kroków wolny	Elita	9	25,556	0,88	3,44	24,88	26,23	1,05	0,3100
	Sub-elita	9	24,889	1,69	6,79	23,59	26,19		
Liczba kroków szybki	Elita	9	25,556	1,01	3,95	24,78	26,33	1,48	0,1572
	Sub-elita	9	24,778	1,20	4,84	23,85	25,70		
Długość kroków wolny [cm]	Elita	9	191,658	6,17	3,22	186,91	196,40	-1,30	0,2107
	Sub-elita	9	197,344	11,54	5,85	188,48	206,21		
Długość kroków szybki [cm]	Elita	9	192,243	7,16	3,72	186,74	197,75	-1,39	0,1831
	Sub-elita	9	198,144	10,51	5,30	190,06	206,23		
Częstotliwość kroku wolny [krok/s]	Elita	9	4,781	0,13	2,72	4,68	4,88	2,93	0,0097
	Sub-elita	9	4,472	0,29	6,48	4,25	4,69		
Częstotliwość kroku szybki [krok/s]	Elita	9	4,784	0,14	2,93	4,68	4,89	3,03	0,0080
	Sub-elita	9	4,484	0,26	5,80	4,28	4,69		
Czas kontaktu wolny [s]	Elita	9	0,105	0,01	9,52	0,10	0,11	-2,57	0,0204
	Sub-elita	9	0,116	0,01	8,62	0,11	0,12		
Czas kontaktu szybki [s]	Elita	9	0,104	0,01	9,62	0,10	0,11	-2,72	0,0151
	Sub-elita	9	0,115	0,01	8,70	0,11	0,12		
Faza lotu wolny [s]	Elita	9	0,105	0,01	9,52	0,10	0,11	-1,46	0,1642
	Sub-elita	9	0,109	0,01	9,17	0,10	0,12		
Faza lotu szybki [s]	Elita	9	0,105	0,01	9,52	0,10	0,11	-1,05	0,3079
	Sub-elita	9	0,109	0,01	9,17	0,10	0,11		
Czas pojedynczego kroku wolny [s]	Elita	9	0,210	0,01	4,76	0,21	0,21	-2,90	0,0105
	Sub-elita	9	0,225	0,01	4,44	0,21	0,24		
Czas pojedynczego kroku szybki [s]	Elita	9	0,209	0,01	4,78	0,20	0,21	-3,07	0,0073
	Sub-elita	9	0,224	0,01	4,46	0,21	0,23		
Prędkość kroku wolny [m/s]	Elita	9	9,183	0,14	1,84	9,08	9,29	4,66	0,0003
	Sub-elita	9	8,807	0,20	2,31	8,65	8,96		
Prędkość kroku szybki [m/s]	Elita	9	9,208	0,11	2,06	9,13	9,29	4,75	0,0002
	Sub-elita	9	8,874	0,18	2,16	8,73	9,01		

Biorąc pod uwagę podział 50 metrowego dystansu na mniejsze odcinki, w biegu na 20 m (faza przyspieszenia startowego) (Tabela 4.) zawodnicy z grupy elita uzyskują znacząco lepsze rezultaty w porównaniu z grupą sub-elita. Najbardziej istotne różnice dotyczą częstotliwości kroków, czasu pojedynczego kroku oraz prędkości kroku. W obydwu biegach, tj. wolnym i szybkim, korzystniejsze wyniki uzyskiwała grupa zawodników elity. Odnośnie do istotnej statystycznie różnicy w częstotliwości kroku (wyższa u elity) wynosiła ona 0,276 krok/s w przypadku biegu wolnego oraz 0,291 krok/s w biegu szybkim. W kontekście analizy czasu pojedynczego kroku, który był krótszy u elity, różnica wyniosła 0,013 s w biegu wolnym i wyższą wartość 0,015 s w biegu szybkim. Prędkość kroku była zdecydowanie większa u elity o 0,264 m/s w biegu wolnym oraz o 0,224 m/s w biegu szybkim. Pozostałe zmienne nie wykazały istotności statystycznej.

Tabela 4. Charakterystyka parametrów kinematycznych najwolniejszego oraz najszybszego biegu na dystansie 20 m (faza przyspieszenia startowego) z podziałem na: elitę i sub-elitę, $p < 0.05$

Zmienne		n	\bar{x}	s	v	95% Przedział ufności		t	p
						Dolna granica	Górna granica		
Czas biegu 20 m wolny [s]	Elita	9	2,495	0,05	2,00	2,45	2,54	-2,09	0,0525
	Sub-elita	9	2,552	0,06	2,35	2,50	2,60		
Czas biegu 20 m szybki [s]	Elita	9	2,420	0,09	3,72	2,35	2,49	-1,95	0,0689
	Sub-elita	9	2,496	0,07	2,80	2,44	2,55		
Liczba kroków wolny	Elita	9	11,556	0,53	4,59	11,15	11,96	1,18	0,2565
	Sub-elita	9	11,222	0,67	5,97	10,71	11,73		
Liczba kroków szybki	Elita	9	11,444	0,53	4,63	11,04	11,85	1,25	0,2289
	Sub-elita	9	11,111	0,60	5,40	10,65	11,57		
Długość kroków wolny [cm]	Elita	9	165,987	5,33	3,21	161,89	170,08	-1,12	0,2779
	Sub-elita	9	170,796	11,69	6,84	161,81	179,78		
Długość kroków szybki [cm]	Elita	9	165,803	6,81	4,11	160,57	171,04	-1,52	0,1489
	Sub-elita	9	172,255	10,80	6,27	163,96	180,55		
Częstotliwość kroku wolny [krok/s]	Elita	9	4,716	0,13	2,76	4,62	4,81	2,60	0,0195
	Sub-elita	9	4,440	0,29	6,53	4,22	4,67		
Częstotliwość kroku szybki [krok/s]	Elita	9	4,731	0,14	2,96	4,62	4,84	2,76	0,0139
	Sub-elita	9	4,440	0,28	6,31	4,22	4,66		
Czas kontaktu wolny [s]	Elita	9	0,120	0,01	8,33	0,12	0,12	-1,68	0,1130
	Sub-elita	9	0,128	0,01	7,81	0,12	0,14		
Czas kontaktu szybki [s]	Elita	9	0,119	0,01	8,40	0,11	0,12	-1,92	0,0723
	Sub-elita	9	0,129	0,01	7,75	0,12	0,14		
Faza lotu wolny [s]	Elita	9	0,093	0,01	10,75	0,09	0,10	-1,55	0,1403
	Sub-elita	9	0,098	0,01	10,20	0,09	0,10		
Faza lotu szybki [s]	Elita	9	0,093	0,01	10,75	0,09	0,10	-1,26	0,2267
	Sub-elita	9	0,098	0,01	10,20	0,09	0,10		
Czas pojedynczego kroku wolny [s]	Elita	9	0,213	0,01	4,69	0,21	0,22	-2,37	0,0310
	Sub-elita	9	0,226	0,02	8,85	0,21	0,24		
Czas pojedynczego kroku szybki [s]	Elita	9	0,212	0,01	4,72	0,21	0,22	-2,76	0,0141
	Sub-elita	9	0,227	0,01	4,41	0,22	0,24		
Prędkość kroku wolny [m/s]	Elita	9	7,858	0,14	2,00	7,75	7,97	3,99	0,0011
	Sub-elita	9	7,594	0,14	2,35	7,49	7,70		
Prędkość kroku szybki [m/s]	Elita	9	7,869	0,15	3,72	7,76	7,98	3,09	0,0071
	Sub-elita	9	7,645	0,16	2,80	7,52	7,77		

Z kolei w fazie maksymalnej prędkości, tj. między 20 a 50 m biegu (Tabela 5.), daje się zauważyć, że zawodnicy z grupy elita również uzyskują wyższe wartości poszczególnych parametrów kinematycznych znacząco odbiegające od wartości grupy sub-elita. Najbardziej istotne różnice dotyczą czasu biegu, częstotliwości kroków, czasu kontaktu, czasu pojedynczego kroku oraz prędkości kroku. W obydwu biegach, tj. wolnym i szybkim, korzystniejsze wyniki uzyskiwała grupa zawodników elity. Różnica w czasach osiągniętych w biegu na 30 metrów wynosząca 0,143 s w wolnym biegu oraz 0,116 s w szybkim biegu na korzyść grupy elita jest istotna statystycznie, co wskazuje na szybsze pokonanie dystansu przez tę grupę nawet w biegu wolnym. Częstotliwość kroków była większa u zawodników elity, odpowiednio 0,348 krok/s w wolnym i 0,305 krok/s w szybkim biegu. Czas kontaktu stopy z podłożem podczas kroku był zdecydowanie krótszy w biegu wolnym, jak i szybkim o 0,012 s. Miało to wpływ na czas wykonania pojedynczego kroku, który był również krótszy w przypadku elity o 0,017 s w biegu wolnym i o 0,014 s w biegu szybkim. Prędkość kroku była istotna statystycznie, ponieważ różnice pomiędzy elitą i sub-elitą wyniosły 0,465 m/s w biegu wolnym oraz 0,42 m/s w biegu szybkim na korzyść elity.

Tabela 5. Charakterystyka parametrów kinematycznych najwolniejszego oraz najszybszego biegu na dystansie 30 m (faza prędkości maksymalnej) z podziałem na: elitę i sub-elitę, $p < 0.05$

Zmienne		n	\bar{x}	s	v	95% Przedział ufności		t	p
						Dolna granica	Górna granica		
Czas biegu 30 m wolny [s]	Elita	9	2,932	0,06	1,88	2,89	2,97	-4,33	0,0005
	Sub-elita	9	3,075	0,08	2,67	3,01	3,14		
Czas biegu 30 m szybki [s]	Elita	9	2,931	0,03	1,00	2,91	2,95	-4,57	0,0003
	Sub-elita	9	3,047	0,07	2,31	2,99	3,10		
Liczba kroków wolny	Elita	9	13,000	0,50	3,85	12,62	13,38	0,82	0,4262
	Sub-elita	9	12,667	1,12	8,83	11,81	13,53		
Liczba kroków szybki	Elita	9	13,111	0,60	4,58	12,65	13,57	1,44	0,1700
	Sub-elita	9	12,667	0,71	5,58	12,12	13,21		
Długość kroków wolny [cm]	Elita	9	213,754	6,96	3,26	208,40	219,11	-1,36	0,1913
	Sub-elita	9	220,450	12,97	5,88	210,48	230,42		
Długość kroków szybki [cm]	Elita	9	214,706	8,28	3,85	208,34	221,07	-1,17	0,2587
	Sub-elita	9	220,265	11,59	5,26	211,36	229,17		
Częstotliwość kroku wolny [krok/s]	Elita	9	4,838	0,14	2,90	4,73	4,95	3,29	0,0046
	Sub-elita	9	4,490	0,28	6,32	4,27	4,71		
Częstotliwość kroku szybki [krok/s]	Elita	9	4,825	0,16	3,31	4,70	4,95	3,00	0,0086
	Sub-elita	9	4,520	0,26	5,76	4,32	4,72		
Czas kontaktu wolny [s]	Elita	9	0,093	0,01	6,53	0,09	0,10	-3,38	0,0038
	Sub-elita	9	0,105	0,01	8,39	0,10	0,11		
Czas kontaktu szybki [s]	Elita	9	0,092	0,01	5,82	0,09	0,10	-3,71	0,0019
	Sub-elita	9	0,104	0,01	7,63	0,10	0,11		
Faza lotu wolny [s]	Elita	9	0,114	0,01	5,61	0,11	0,12	-1,32	0,2052
	Sub-elita	9	0,119	0,01	7,39	0,11	0,13		
Faza lotu szybki [s]	Elita	9	0,116	0,01	6,64	0,11	0,12	-0,51	0,6149
	Sub-elita	9	0,118	0,01	6,86	0,11	0,12		
Czas pojedynczego kroku wolny [s]	Elita	9	0,207	0,01	3,04	0,20	0,21	-3,30	0,0045
	Sub-elita	9	0,224	0,01	6,18	0,21	0,23		
Czas pojedynczego kroku szybki [s]	Elita	9	0,208	0,01	3,76	0,20	0,21	-2,80	0,0128
	Sub-elita	9	0,222	0,01	5,60	0,21	0,23		
Prędkość kroku wolny [m/s]	Elita	9	10,324	0,16	1,52	10,20	10,44	4,61	0,0003
	Sub-elita	9	9,859	0,26	2,63	9,66	10,06		
Prędkość kroku szybki [m/s]	Elita	9	10,341	0,12	1,12	10,25	10,43	5,16	0,0001
	Sub-elita	9	9,921	0,21	2,16	9,76	10,09		

IV 2. Analiza asymetrii

IV 2.1. Charakterystyka asymetrii między zawodnikami i między biegami

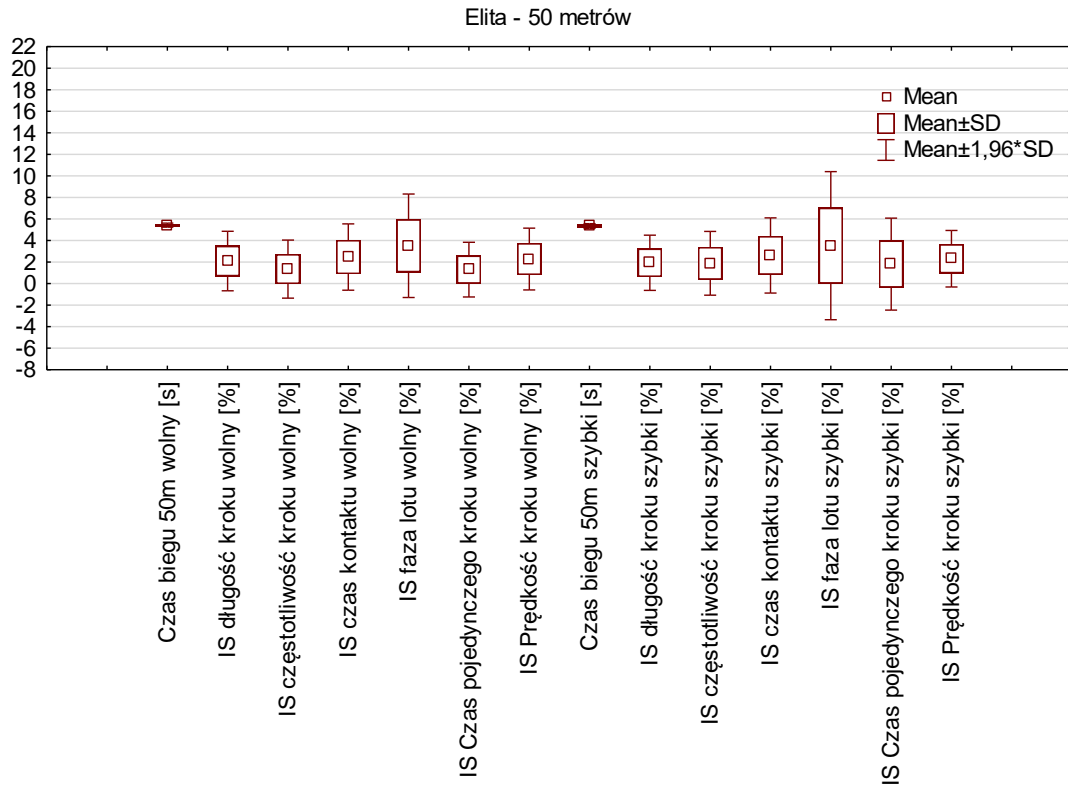
Analizując wyniki zawarte w tabeli (Tabela 6.), można zauważyć zmienne, które wykazują istotność statystyczną oraz mają umiarkowany lub silny efekt. Pierwszą z nich jest czas biegu na 50 metrów w biegu wolnym. Ta zmienna wskazuje na wysoką istotność statystyczną różnicy pomiędzy czasami biegu w grupie elity i sub-elity z p na poziomie 0,0019. Wartość d Cohena wynosząca -1.77 sugeruje silny efekt, co oznacza, że różnica jest nie tylko statystycznie istotna, ale również duża pod względem praktycznym. Podobnie jak w przypadku wolnego biegu, w biegu szybkim występują różnice istotne statystycznie z $p = 0.0030$, a d Cohena = -1.65 wskazuje na silny efekt, co potwierdza znaczącą różnicę między wynikami elity i sub-elity. Wszystkie zmienne są na korzyść elity.

Indeksy symetrii poszczególnych parametrów kinematycznych nie wykazały istotności statystycznej, ale pod względem praktycznym, biorąc pod uwagę siłę efektu, możemy wyróżnić kilka. Pierwszym z nich będzie indeks symetrii długości kroków. W biegu wolnym wykazał on silny efekt na poziomie -0,87, natomiast w biegu szybkim był umiarkowany i wyniósł -0,66. Również IS częstotliwości kroku wykazał umiarkowany efekt w biegu wolnym (-0,74) oraz w biegu szybkim (-0,62). Podobna sytuacja ma miejsce w przypadku IS fazy lotu, w biegu wolnym umiarkowany efekt na poziomie -0,52, a podczas biegu szybkiego -0,71. Ostatnią zmienną, która wykazała przynajmniej umiarkowany efekt jest IS czas pojedynczego kroku o wartości -0,52 wyłącznie dla biegu wolnego. Pozostałe zmienne wykazały efekt słaby lub bardzo słaby. Różnice statystyczne pomiędzy grupami i biegami możemy zaobserwować również na wykresach (Wykres 1. i Wykres 2.).

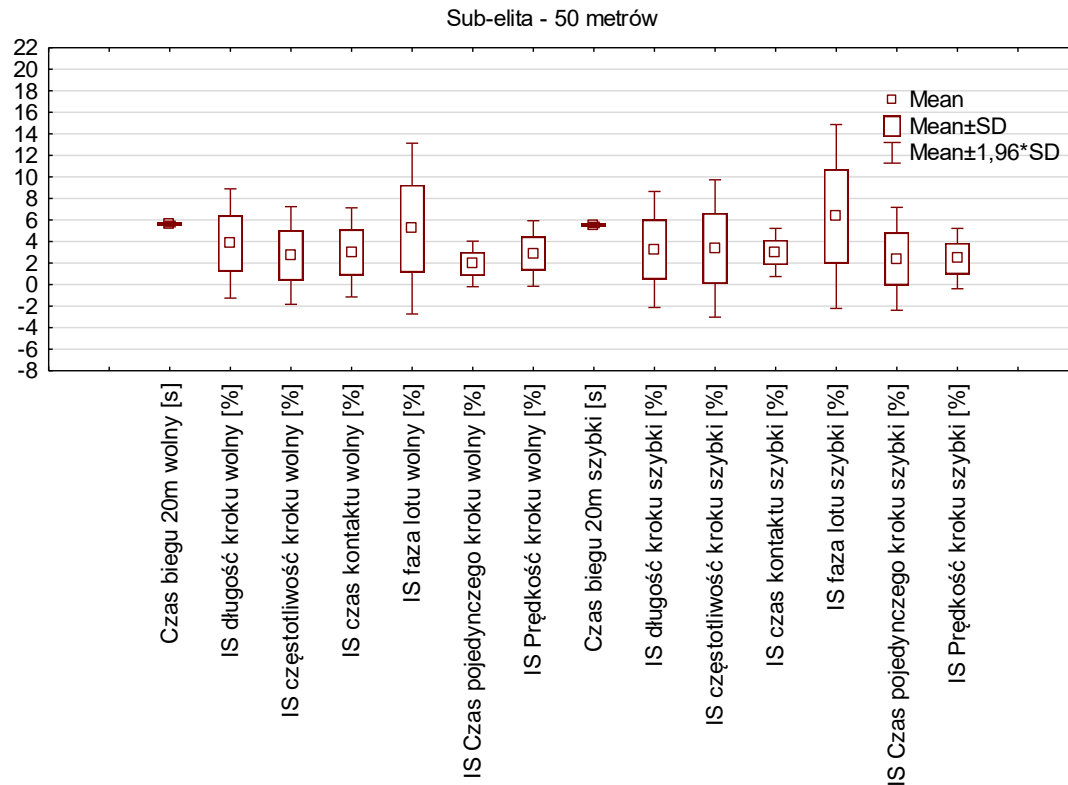
Tabela 6. Charakterystyka indeksu symetrii parametrów kinematycznych najwolniejszego oraz najszybszego biegu na dystansie 50 metrów z podziałem na: elitę i sub-elitę, $p < 0.05$

Zmienne		n	\bar{x}	s	v	95% Przedział ufności		t	p	d
						Dolna granica	Górna granica			
Czas biegu 50 m wolny [s]	Elita	9	5,427	0,10	1,84	5,35	5,50	-3,71	0,0019	-1,77
	Sub-elita	9	5,627	0,13	2,31	5,53	5,73			
Czas biegu 50 m szybki [s]	Elita	9	5,351	0,11	2,06	5,27	5,44	-3,49	0,0030	-1,65
	Sub-elita	9	5,544	0,12	2,16	5,45	5,64			
IS długość kroku wolny [%]	Elita	9	2,091	1,41	67,43	1,01	3,17	-1,76	0,1029	-0,87
	Sub-elita	9	3,821	2,59	67,78	1,83	5,81			
IS długość kroku szybki [%]	Elita	9	1,930	1,31	67,88	0,92	2,94	-1,31	0,2144	-0,66
	Sub-elita	9	3,264	2,75	84,25	1,15	5,38			
IS częstotliwość kroku wolny [%]	Elita	9	1,347	1,38	102,45	0,29	2,40	-1,52	0,1525	-0,74
	Sub-elita	9	2,710	2,31	85,24	0,93	4,49			
IS częstotliwość kroku szybki [%]	Elita	9	1,880	1,51	80,32	0,72	3,04	-1,24	0,2413	-0,62
	Sub-elita	9	3,359	3,25	96,75	0,86	5,86			
IS czas kontaktu wolny [%]	Elita	9	2,464	1,57	63,72	1,26	3,67	-0,60	0,5552	-0,29
	Sub-elita	9	2,993	2,11	70,50	1,37	4,62			
IS czas kontaktu szybki [%]	Elita	9	2,613	1,78	68,12	1,24	3,98	-0,53	0,6064	-0,25
	Sub-elita	9	2,985	1,14	38,19	2,11	3,86			
IS faza lotu wolny [%]	Elita	9	3,514	2,45	69,72	1,63	5,40	-1,07	0,3044	-0,52
	Sub-elita	9	5,199	4,05	77,90	2,09	8,31			
IS faza lotu szybki [%]	Elita	9	3,518	3,51	99,77	0,82	6,21	-1,51	0,1522	-0,71
	Sub-elita	9	6,328	4,36	68,90	2,98	9,68			
IS Czas pojedynczego kroku wolny [%]	Elita	9	1,295	1,30	100,39	0,30	2,29	-1,12	0,2816	-0,53
	Sub-elita	9	1,922	1,08	56,19	1,09	2,75			
IS Czas pojedynczego kroku szybki [%]	Elita	9	1,811	2,18	120,38	0,14	3,49	-0,53	0,6010	-0,25
	Sub-elita	9	2,393	2,44	101,96	0,52	4,27			
IS Prędkość kroku wolny [%]	Elita	9	2,279	1,47	64,50	1,15	3,41	-0,86	0,4021	-0,41
	Sub-elita	9	2,892	1,55	53,60	1,70	4,08			
IS Prędkość kroku szybki [%]	Elita	9	2,305	1,34	58,13	1,28	3,33	-0,18	0,8622	-0,08
	Sub-elita	9	2,420	1,43	59,09	1,32	3,52			

Wykres 1. Charakterystyka indeksu symetrii parametrów kinematycznych najwolniejszego oraz najszybszego biegu na dystansie 50 metrów dla elity



Wykres 2. Charakterystyka indeksu symetrii parametrów kinematycznych najwolniejszego oraz najszybszego biegu na dystansie 50 metrów dla sub-elity



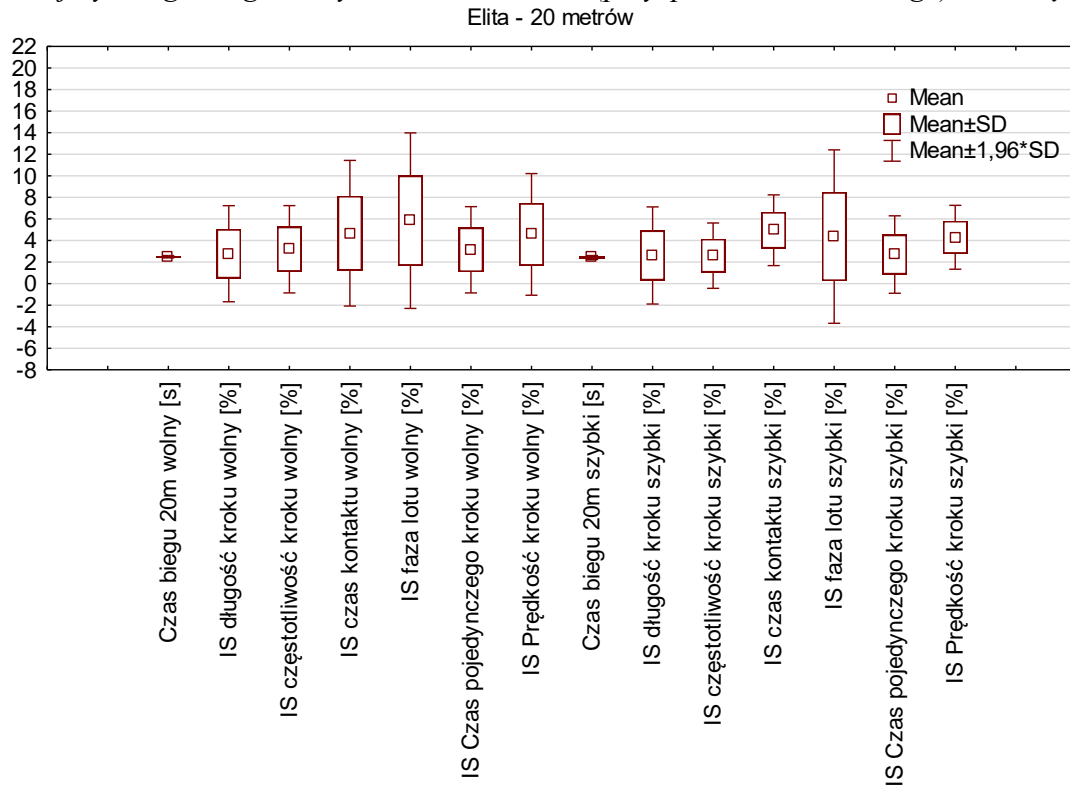
Dokonując analizy indeksu symetrii parametrów kinematycznych najwolniejszego oraz najszybszego biegu na dystansie 20 metrów (Tabela 7.) można zauważyć, że dla większości zmiennych różnice między grupami elita i sub-elita są widoczne, jednak nie wszystkie są statystycznie istotne. Czas dla wolnego biegu w fazie przyspieszenia startowego (20 m – wolny bieg) w Test t-Studenta wykazał $t = -2.09$, co przy $p = 0.0525$ jest bliskie progu istotności statystycznej. Wartość d Cohena wynosi -0.90 , co sugeruje silny efekt. Podobnie jest w przypadku czasu biegu szybkiego Test t-Studenta wykazał $t = -1.95$, przy $p = 0.0689$, co również jest bliskie progu istotności statystycznej. Wartość d Cohena wynosi -0.85 , co wskazuje na silny efekt i przewagę elity nad sub-elitą.

Biorąc pod uwagę indeksy symetrii kolejnych parametrów kinematycznych można zauważyć, że żadna z nich nie jest istotna statystycznie, aczkolwiek niektóre z nich wykazują silny lub umiarkowany efekt Cohena. Pierwszą zmienną, która wykazuje efekt na poziomie silnym $-0,80$ jest IS długości kroku w biegu wolnym. Mniejsza wartość $-0,61$ (umiarkowana) miała miejsce w biegu szybkim. Umiarkowany efekt na poziomie $0,60$ wykazał IS częstotliwości kroków wyłącznie w biegu wolnym na korzyść sub-elity. Odwrotna sytuacja miała miejsce w IS fazy lotu, ponieważ osiągnęła wartość $-0,78$ (blisko silnego efektu) na korzyść elity wyłącznie w biegu szybkim. Ostatnim parametrem wykazującym umiarkowaną siłę efektu jest IS pojedynczego kroku w biegu wolnym, który osiągnął wartość $0,56$ na korzyść sub-elity. Pozostałe zmienne wykazały efekt słaby lub bardzo słaby. Różnice statystyczne pomiędzy grupami i biegami możemy zaobserwować również na wykresach (Wykres 3. i Wykres 4.).

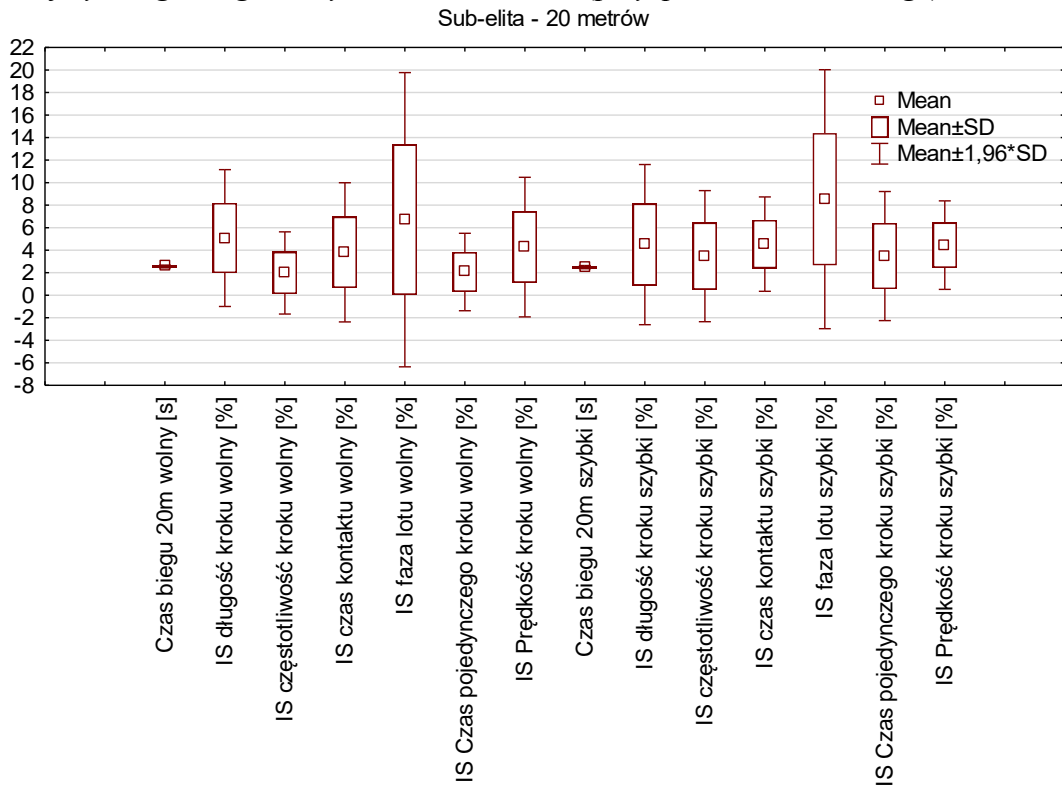
Tabela 7. Charakterystyka indeksu symetrii parametrów kinematycznych najwolniejszego oraz najszybszego biegu na dystansie 20 metrów (przyspieszenia startowego) z podziałem na: elitę i sub-elitę, $p < 0.05$

Zmienne		n	\bar{x}	s	v	95% Przedział ufności		t	p	d
						Dolna granica	Górna granica			
Czas biegu 20 m wolny [s]	Elita	9	2,495	0,05	2,00	2,45	2,54	-2,09	0,0525	-0,90
	Sub-elita	9	2,552	0,06	2,35	2,50	2,60			
Czas biegu 20 m szybki [s]	Elita	9	2,420	0,09	3,72	2,35	2,49	-1,95	0,0689	-0,85
	Sub-elita	9	2,496	0,07	2,80	2,44	2,55			
IS długość kroku wolny [%]	Elita	9	2,771	2,27	81,92	1,29	4,26	-1,80	0,0906	-0,80
	Sub-elita	9	5,078	3,10	61,05	3,05	7,10			
IS długość kroku szybki [%]	Elita	9	2,613	2,30	88,02	1,11	4,11	-1,32	0,2058	-0,61
	Sub-elita	9	4,500	3,63	80,67	2,13	6,87			
IS częstotliwość kroku wolny [%]	Elita	9	3,187	2,06	64,64	1,84	4,54	1,30	0,2109	0,60
	Sub-elita	9	1,980	1,86	93,94	0,77	3,20			
IS częstotliwość kroku szybki [%]	Elita	9	2,595	1,55	59,73	1,59	3,60	-0,79	0,4433	-0,37
	Sub-elita	9	3,472	2,97	85,54	1,53	5,41			
IS czas kontaktu wolny [%]	Elita	9	4,671	3,45	73,86	2,42	6,92	0,55	0,5888	0,27
	Sub-elita	9	3,813	3,15	82,61	1,75	5,87			
IS czas kontaktu szybki [%]	Elita	9	4,949	1,67	33,74	3,86	6,04	0,45	0,6568	0,22
	Sub-elita	9	4,539	2,14	47,15	3,14	5,94			
IS faza lotu wolny [%]	Elita	9	5,840	4,16	71,23	3,13	8,56	-0,33	0,7444	-0,16
	Sub-elita	9	6,709	6,67	99,42	2,35	11,06			
IS faza lotu szybki [%]	Elita	9	4,364	4,10	93,95	1,68	7,04	-1,75	0,1000	-0,78
	Sub-elita	9	8,529	5,87	68,82	4,70	12,36			
IS Czas pojedynczego kroku wolny [%]	Elita	9	3,139	2,04	64,99	1,80	4,47	1,19	0,2500	0,56
	Sub-elita	9	2,067	1,76	85,15	0,92	3,21			
IS Czas pojedynczego kroku szybki [%]	Elita	9	2,696	1,83	67,88	1,50	3,89	-0,68	0,5043	-0,33
	Sub-elita	9	3,482	2,93	84,15	1,57	5,39			
IS Prędkość kroku wolny [%]	Elita	9	4,563	2,88	63,12	2,68	6,45	0,20	0,8439	0,10
	Sub-elita	9	4,277	3,16	73,88	2,21	6,34			
IS Prędkość kroku szybki [%]	Elita	9	4,297	1,51	35,14	3,31	5,28	-0,18	0,8592	-0,09
	Sub-elita	9	4,448	2,01	45,19	3,14	5,76			

Wykres 3. Charakterystyka indeksu symetrii parametrów kinematycznych najwolniejszego oraz najszybszego biegu na dystansie 20 metrów (przyspieszenia startowego) dla elity



Wykres 4. Charakterystyka indeksu symetrii parametrów kinematycznych najwolniejszego oraz najszybszego biegu na dystansie 20 metrów (przyspieszenia startowego) dla sub-elity



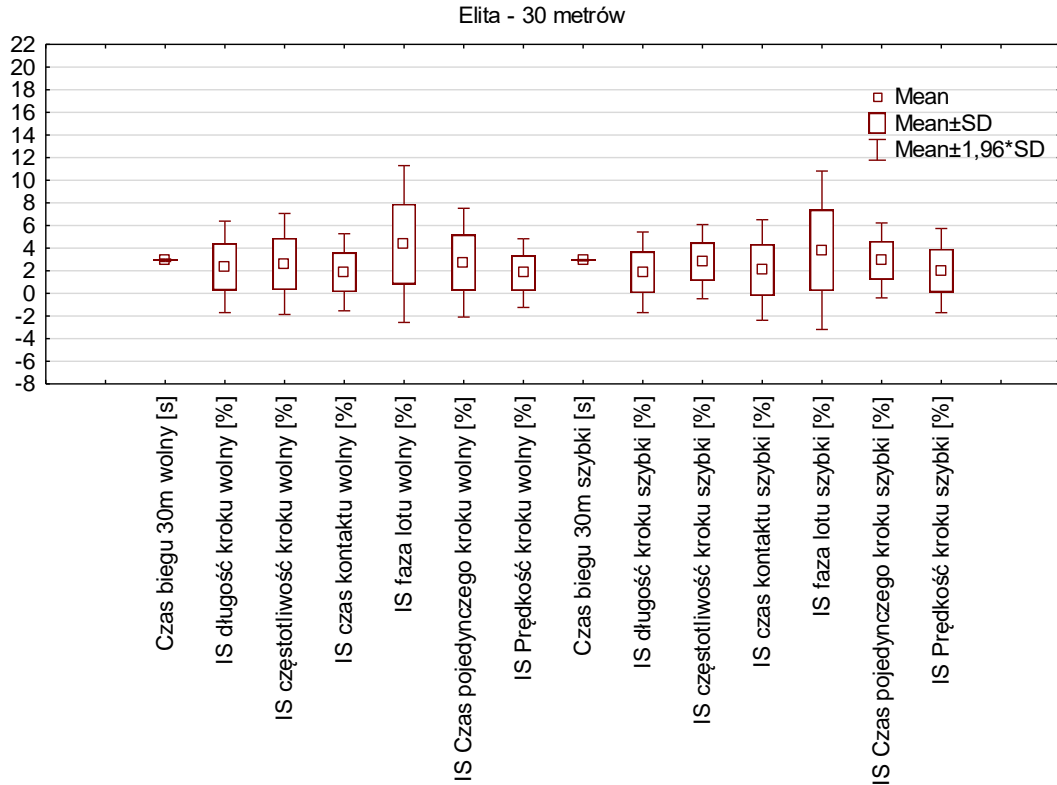
Rozpatrując przebieg zmienności parametrów w fazie maksymalnej prędkości (30m) (Tabela 8.) nie zaobserwowano istotnych różnic statystycznych między grupami elity i sub-elity, co wskazuje wysokie wartości p i słabe efekty d Cohena. Najistotniejszą różnicę wykazują czasy biegu na 30 metrów (faza przyspieszenia startowego). Wyniki wskazują na istotną różnicę między grupami z bardzo niskim $p = 0.00005$, co oznacza wysoką istotność statystyczną. Wartość d Cohena -1.43 wskazuje na silny efekt, co oznacza, że różnica między grupami jest duża. Podobnie jak w przypadku wolnego biegu, różnica jest istotna statystycznie z bardzo niskim $p = 0.00003$ i silnym efektem d Cohena $-1,46$, co oznacza dużą różnicę między elitą a sub-elitą na zdecydowaną korzyść elity.

Biorąc pod uwagę tylko IS parametrów kinematycznych, większość z nich wskazuje na przewagę elity nad sub-elitą, ale tylko niektóre z nich wykazują co najmniej umiarkowany efekt. IS częstotliwości kroków w biegu wolnym wykazuje umiarkowany efekt na poziomie -0.54 . Również w biegu wolnym IS czasu kontaktu wskazuje na umiarkowaną siłę efektu o wartości $-0,60$. Taką samą wartość osiąga d w przypadku IS pojedynczego kroku również w biegu wolnym. Pozostałe zmienne wykazały efekt słaby lub bardzo słaby. Różnice statystyczne pomiędzy grupami i biegami możemy zaobserwować również na wykresach (Wykres 5. i Wykres 6.).

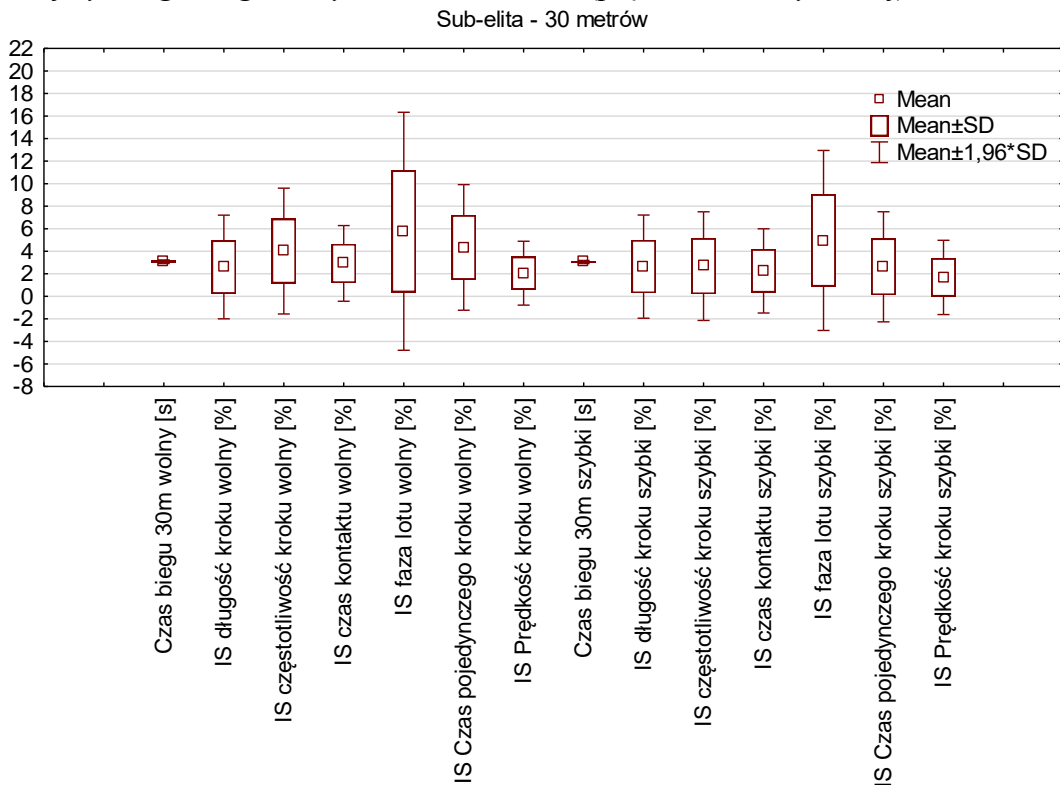
Tabela 8. Charakterystyka indeksu symetrii parametrów kinematycznych najwolniejszego oraz najszybszego biegu na dystansie 30 metrów (prędkości maksymalnej) z podziałem na: elitę i sub-elitę, $p < 0.05$

Zmienne		n	\bar{x}	s	v	95% Przedział ufności		t	p	d																																																																																																																																																																																																																																						
						Dolna granica	Górna granica																																																																																																																																																																																																																																									
Czas biegu 30 m wolny [s]	Elita	9	2,932	0,06	2,05	2,89	2,97	-4,33	0,0005	-1,43																																																																																																																																																																																																																																						
	Sub-elita	9	3,075	0,08	2,60	3,01	3,14				Czas biegu 30 m szybki [s]	Elita	9	2,931	0,03	1,02	2,91	2,95	-4,57	0,0003	-1,46	Sub-elita	9	3,047	0,07	2,30	2,99	3,10	IS długość kroku wolny [%]	Elita	9	2,345	2,06	87,85	1,00	3,69	-0,25	0,8079	-0,12	Sub-elita	9	2,603	2,35	90,28	1,07	4,14	IS długość kroku szybki [%]	Elita	9	1,864	1,82	97,64	0,68	3,05	-0,78	0,4443	-0,37	Sub-elita	9	2,638	2,34	88,70	1,11	4,16	IS częstotliwość kroku wolny [%]	Elita	9	2,601	2,28	87,66	1,11	4,09	-1,17	0,2605	-0,54	Sub-elita	9	4,019	2,85	70,91	2,16	5,88	IS częstotliwość kroku szybki [%]	Elita	9	2,809	1,67	59,45	1,72	3,90	0,13	0,8981	0,06	Sub-elita	9	2,680	2,46	91,79	1,07	4,29	IS czas kontaktu wolny [%]	Elita	9	1,871	1,74	93,00	0,73	3,01	-1,29	0,2140	-0,60	Sub-elita	9	2,923	1,71	58,50	1,80	4,04	IS czas kontaktu szybki [%]	Elita	9	2,067	2,27	109,82	0,59	3,55	-0,20	0,8476	-0,09	Sub-elita	9	2,259	1,91	84,55	1,01	3,50	IS faza lotu wolny [%]	Elita	9	4,364	3,53	80,89	2,06	6,67	-0,66	0,5210	-0,31	Sub-elita	9	5,774	5,39	93,35	2,25	9,29	IS faza lotu szybki [%]	Elita	9	3,810	3,57	93,70	1,48	6,14	-0,64	0,5333	-0,31	Sub-elita	9	4,960	4,08	82,26	2,30	7,62	IS Czas pojedynczego kroku wolny [%]	Elita	9	2,715	2,45	90,24	1,11	4,32	-1,30	0,2124	-0,60	Sub-elita	9	4,340	2,84	65,44	2,48	6,20	IS Czas pojedynczego kroku szybki [%]	Elita	9	2,916	1,69	57,96	1,81	4,02	0,29	0,7747	0,14	Sub-elita	9	2,623	2,49	94,93	0,99	4,25	IS Prędkość kroku wolny [%]	Elita	9	1,795	1,55	86,35	0,78	2,81	-0,37	0,7168	-0,18	Sub-elita	9	2,056	1,44	70,04	1,11	3,00	IS Prędkość kroku szybki [%]	Elita	9	2,015	1,90	94,29	0,77	3,25	0,40	0,6956	0,19	Sub-elita	9	1,678
Czas biegu 30 m szybki [s]	Elita	9	2,931	0,03	1,02	2,91	2,95	-4,57	0,0003	-1,46																																																																																																																																																																																																																																						
	Sub-elita	9	3,047	0,07	2,30	2,99	3,10				IS długość kroku wolny [%]	Elita	9	2,345	2,06	87,85	1,00	3,69	-0,25	0,8079	-0,12	Sub-elita	9	2,603	2,35	90,28	1,07	4,14	IS długość kroku szybki [%]	Elita	9	1,864	1,82	97,64	0,68	3,05	-0,78	0,4443	-0,37	Sub-elita	9	2,638	2,34	88,70	1,11	4,16	IS częstotliwość kroku wolny [%]	Elita	9	2,601	2,28	87,66	1,11	4,09	-1,17	0,2605	-0,54	Sub-elita	9	4,019	2,85	70,91	2,16	5,88	IS częstotliwość kroku szybki [%]	Elita	9	2,809	1,67	59,45	1,72	3,90	0,13	0,8981	0,06	Sub-elita	9	2,680	2,46	91,79	1,07	4,29	IS czas kontaktu wolny [%]	Elita	9	1,871	1,74	93,00	0,73	3,01	-1,29	0,2140	-0,60	Sub-elita	9	2,923	1,71	58,50	1,80	4,04	IS czas kontaktu szybki [%]	Elita	9	2,067	2,27	109,82	0,59	3,55	-0,20	0,8476	-0,09	Sub-elita	9	2,259	1,91	84,55	1,01	3,50	IS faza lotu wolny [%]	Elita	9	4,364	3,53	80,89	2,06	6,67	-0,66	0,5210	-0,31	Sub-elita	9	5,774	5,39	93,35	2,25	9,29	IS faza lotu szybki [%]	Elita	9	3,810	3,57	93,70	1,48	6,14	-0,64	0,5333	-0,31	Sub-elita	9	4,960	4,08	82,26	2,30	7,62	IS Czas pojedynczego kroku wolny [%]	Elita	9	2,715	2,45	90,24	1,11	4,32	-1,30	0,2124	-0,60	Sub-elita	9	4,340	2,84	65,44	2,48	6,20	IS Czas pojedynczego kroku szybki [%]	Elita	9	2,916	1,69	57,96	1,81	4,02	0,29	0,7747	0,14	Sub-elita	9	2,623	2,49	94,93	0,99	4,25	IS Prędkość kroku wolny [%]	Elita	9	1,795	1,55	86,35	0,78	2,81	-0,37	0,7168	-0,18	Sub-elita	9	2,056	1,44	70,04	1,11	3,00	IS Prędkość kroku szybki [%]	Elita	9	2,015	1,90	94,29	0,77	3,25	0,40	0,6956	0,19	Sub-elita	9	1,678	1,68	100,12	0,58	2,78														
IS długość kroku wolny [%]	Elita	9	2,345	2,06	87,85	1,00	3,69	-0,25	0,8079	-0,12																																																																																																																																																																																																																																						
	Sub-elita	9	2,603	2,35	90,28	1,07	4,14				IS długość kroku szybki [%]	Elita	9	1,864	1,82	97,64	0,68	3,05	-0,78	0,4443	-0,37	Sub-elita	9	2,638	2,34	88,70	1,11	4,16	IS częstotliwość kroku wolny [%]	Elita	9	2,601	2,28	87,66	1,11	4,09	-1,17	0,2605	-0,54	Sub-elita	9	4,019	2,85	70,91	2,16	5,88	IS częstotliwość kroku szybki [%]	Elita	9	2,809	1,67	59,45	1,72	3,90	0,13	0,8981	0,06	Sub-elita	9	2,680	2,46	91,79	1,07	4,29	IS czas kontaktu wolny [%]	Elita	9	1,871	1,74	93,00	0,73	3,01	-1,29	0,2140	-0,60	Sub-elita	9	2,923	1,71	58,50	1,80	4,04	IS czas kontaktu szybki [%]	Elita	9	2,067	2,27	109,82	0,59	3,55	-0,20	0,8476	-0,09	Sub-elita	9	2,259	1,91	84,55	1,01	3,50	IS faza lotu wolny [%]	Elita	9	4,364	3,53	80,89	2,06	6,67	-0,66	0,5210	-0,31	Sub-elita	9	5,774	5,39	93,35	2,25	9,29	IS faza lotu szybki [%]	Elita	9	3,810	3,57	93,70	1,48	6,14	-0,64	0,5333	-0,31	Sub-elita	9	4,960	4,08	82,26	2,30	7,62	IS Czas pojedynczego kroku wolny [%]	Elita	9	2,715	2,45	90,24	1,11	4,32	-1,30	0,2124	-0,60	Sub-elita	9	4,340	2,84	65,44	2,48	6,20	IS Czas pojedynczego kroku szybki [%]	Elita	9	2,916	1,69	57,96	1,81	4,02	0,29	0,7747	0,14	Sub-elita	9	2,623	2,49	94,93	0,99	4,25	IS Prędkość kroku wolny [%]	Elita	9	1,795	1,55	86,35	0,78	2,81	-0,37	0,7168	-0,18	Sub-elita	9	2,056	1,44	70,04	1,11	3,00	IS Prędkość kroku szybki [%]	Elita	9	2,015	1,90	94,29	0,77	3,25	0,40	0,6956	0,19	Sub-elita	9	1,678	1,68	100,12	0,58	2,78																																
IS długość kroku szybki [%]	Elita	9	1,864	1,82	97,64	0,68	3,05	-0,78	0,4443	-0,37																																																																																																																																																																																																																																						
	Sub-elita	9	2,638	2,34	88,70	1,11	4,16				IS częstotliwość kroku wolny [%]	Elita	9	2,601	2,28	87,66	1,11	4,09	-1,17	0,2605	-0,54	Sub-elita	9	4,019	2,85	70,91	2,16	5,88	IS częstotliwość kroku szybki [%]	Elita	9	2,809	1,67	59,45	1,72	3,90	0,13	0,8981	0,06	Sub-elita	9	2,680	2,46	91,79	1,07	4,29	IS czas kontaktu wolny [%]	Elita	9	1,871	1,74	93,00	0,73	3,01	-1,29	0,2140	-0,60	Sub-elita	9	2,923	1,71	58,50	1,80	4,04	IS czas kontaktu szybki [%]	Elita	9	2,067	2,27	109,82	0,59	3,55	-0,20	0,8476	-0,09	Sub-elita	9	2,259	1,91	84,55	1,01	3,50	IS faza lotu wolny [%]	Elita	9	4,364	3,53	80,89	2,06	6,67	-0,66	0,5210	-0,31	Sub-elita	9	5,774	5,39	93,35	2,25	9,29	IS faza lotu szybki [%]	Elita	9	3,810	3,57	93,70	1,48	6,14	-0,64	0,5333	-0,31	Sub-elita	9	4,960	4,08	82,26	2,30	7,62	IS Czas pojedynczego kroku wolny [%]	Elita	9	2,715	2,45	90,24	1,11	4,32	-1,30	0,2124	-0,60	Sub-elita	9	4,340	2,84	65,44	2,48	6,20	IS Czas pojedynczego kroku szybki [%]	Elita	9	2,916	1,69	57,96	1,81	4,02	0,29	0,7747	0,14	Sub-elita	9	2,623	2,49	94,93	0,99	4,25	IS Prędkość kroku wolny [%]	Elita	9	1,795	1,55	86,35	0,78	2,81	-0,37	0,7168	-0,18	Sub-elita	9	2,056	1,44	70,04	1,11	3,00	IS Prędkość kroku szybki [%]	Elita	9	2,015	1,90	94,29	0,77	3,25	0,40	0,6956	0,19	Sub-elita	9	1,678	1,68	100,12	0,58	2,78																																																		
IS częstotliwość kroku wolny [%]	Elita	9	2,601	2,28	87,66	1,11	4,09	-1,17	0,2605	-0,54																																																																																																																																																																																																																																						
	Sub-elita	9	4,019	2,85	70,91	2,16	5,88				IS częstotliwość kroku szybki [%]	Elita	9	2,809	1,67	59,45	1,72	3,90	0,13	0,8981	0,06	Sub-elita	9	2,680	2,46	91,79	1,07	4,29	IS czas kontaktu wolny [%]	Elita	9	1,871	1,74	93,00	0,73	3,01	-1,29	0,2140	-0,60	Sub-elita	9	2,923	1,71	58,50	1,80	4,04	IS czas kontaktu szybki [%]	Elita	9	2,067	2,27	109,82	0,59	3,55	-0,20	0,8476	-0,09	Sub-elita	9	2,259	1,91	84,55	1,01	3,50	IS faza lotu wolny [%]	Elita	9	4,364	3,53	80,89	2,06	6,67	-0,66	0,5210	-0,31	Sub-elita	9	5,774	5,39	93,35	2,25	9,29	IS faza lotu szybki [%]	Elita	9	3,810	3,57	93,70	1,48	6,14	-0,64	0,5333	-0,31	Sub-elita	9	4,960	4,08	82,26	2,30	7,62	IS Czas pojedynczego kroku wolny [%]	Elita	9	2,715	2,45	90,24	1,11	4,32	-1,30	0,2124	-0,60	Sub-elita	9	4,340	2,84	65,44	2,48	6,20	IS Czas pojedynczego kroku szybki [%]	Elita	9	2,916	1,69	57,96	1,81	4,02	0,29	0,7747	0,14	Sub-elita	9	2,623	2,49	94,93	0,99	4,25	IS Prędkość kroku wolny [%]	Elita	9	1,795	1,55	86,35	0,78	2,81	-0,37	0,7168	-0,18	Sub-elita	9	2,056	1,44	70,04	1,11	3,00	IS Prędkość kroku szybki [%]	Elita	9	2,015	1,90	94,29	0,77	3,25	0,40	0,6956	0,19	Sub-elita	9	1,678	1,68	100,12	0,58	2,78																																																																				
IS częstotliwość kroku szybki [%]	Elita	9	2,809	1,67	59,45	1,72	3,90	0,13	0,8981	0,06																																																																																																																																																																																																																																						
	Sub-elita	9	2,680	2,46	91,79	1,07	4,29				IS czas kontaktu wolny [%]	Elita	9	1,871	1,74	93,00	0,73	3,01	-1,29	0,2140	-0,60	Sub-elita	9	2,923	1,71	58,50	1,80	4,04	IS czas kontaktu szybki [%]	Elita	9	2,067	2,27	109,82	0,59	3,55	-0,20	0,8476	-0,09	Sub-elita	9	2,259	1,91	84,55	1,01	3,50	IS faza lotu wolny [%]	Elita	9	4,364	3,53	80,89	2,06	6,67	-0,66	0,5210	-0,31	Sub-elita	9	5,774	5,39	93,35	2,25	9,29	IS faza lotu szybki [%]	Elita	9	3,810	3,57	93,70	1,48	6,14	-0,64	0,5333	-0,31	Sub-elita	9	4,960	4,08	82,26	2,30	7,62	IS Czas pojedynczego kroku wolny [%]	Elita	9	2,715	2,45	90,24	1,11	4,32	-1,30	0,2124	-0,60	Sub-elita	9	4,340	2,84	65,44	2,48	6,20	IS Czas pojedynczego kroku szybki [%]	Elita	9	2,916	1,69	57,96	1,81	4,02	0,29	0,7747	0,14	Sub-elita	9	2,623	2,49	94,93	0,99	4,25	IS Prędkość kroku wolny [%]	Elita	9	1,795	1,55	86,35	0,78	2,81	-0,37	0,7168	-0,18	Sub-elita	9	2,056	1,44	70,04	1,11	3,00	IS Prędkość kroku szybki [%]	Elita	9	2,015	1,90	94,29	0,77	3,25	0,40	0,6956	0,19	Sub-elita	9	1,678	1,68	100,12	0,58	2,78																																																																																						
IS czas kontaktu wolny [%]	Elita	9	1,871	1,74	93,00	0,73	3,01	-1,29	0,2140	-0,60																																																																																																																																																																																																																																						
	Sub-elita	9	2,923	1,71	58,50	1,80	4,04				IS czas kontaktu szybki [%]	Elita	9	2,067	2,27	109,82	0,59	3,55	-0,20	0,8476	-0,09	Sub-elita	9	2,259	1,91	84,55	1,01	3,50	IS faza lotu wolny [%]	Elita	9	4,364	3,53	80,89	2,06	6,67	-0,66	0,5210	-0,31	Sub-elita	9	5,774	5,39	93,35	2,25	9,29	IS faza lotu szybki [%]	Elita	9	3,810	3,57	93,70	1,48	6,14	-0,64	0,5333	-0,31	Sub-elita	9	4,960	4,08	82,26	2,30	7,62	IS Czas pojedynczego kroku wolny [%]	Elita	9	2,715	2,45	90,24	1,11	4,32	-1,30	0,2124	-0,60	Sub-elita	9	4,340	2,84	65,44	2,48	6,20	IS Czas pojedynczego kroku szybki [%]	Elita	9	2,916	1,69	57,96	1,81	4,02	0,29	0,7747	0,14	Sub-elita	9	2,623	2,49	94,93	0,99	4,25	IS Prędkość kroku wolny [%]	Elita	9	1,795	1,55	86,35	0,78	2,81	-0,37	0,7168	-0,18	Sub-elita	9	2,056	1,44	70,04	1,11	3,00	IS Prędkość kroku szybki [%]	Elita	9	2,015	1,90	94,29	0,77	3,25	0,40	0,6956	0,19	Sub-elita	9	1,678	1,68	100,12	0,58	2,78																																																																																																								
IS czas kontaktu szybki [%]	Elita	9	2,067	2,27	109,82	0,59	3,55	-0,20	0,8476	-0,09																																																																																																																																																																																																																																						
	Sub-elita	9	2,259	1,91	84,55	1,01	3,50				IS faza lotu wolny [%]	Elita	9	4,364	3,53	80,89	2,06	6,67	-0,66	0,5210	-0,31	Sub-elita	9	5,774	5,39	93,35	2,25	9,29	IS faza lotu szybki [%]	Elita	9	3,810	3,57	93,70	1,48	6,14	-0,64	0,5333	-0,31	Sub-elita	9	4,960	4,08	82,26	2,30	7,62	IS Czas pojedynczego kroku wolny [%]	Elita	9	2,715	2,45	90,24	1,11	4,32	-1,30	0,2124	-0,60	Sub-elita	9	4,340	2,84	65,44	2,48	6,20	IS Czas pojedynczego kroku szybki [%]	Elita	9	2,916	1,69	57,96	1,81	4,02	0,29	0,7747	0,14	Sub-elita	9	2,623	2,49	94,93	0,99	4,25	IS Prędkość kroku wolny [%]	Elita	9	1,795	1,55	86,35	0,78	2,81	-0,37	0,7168	-0,18	Sub-elita	9	2,056	1,44	70,04	1,11	3,00	IS Prędkość kroku szybki [%]	Elita	9	2,015	1,90	94,29	0,77	3,25	0,40	0,6956	0,19	Sub-elita	9	1,678	1,68	100,12	0,58	2,78																																																																																																																										
IS faza lotu wolny [%]	Elita	9	4,364	3,53	80,89	2,06	6,67	-0,66	0,5210	-0,31																																																																																																																																																																																																																																						
	Sub-elita	9	5,774	5,39	93,35	2,25	9,29				IS faza lotu szybki [%]	Elita	9	3,810	3,57	93,70	1,48	6,14	-0,64	0,5333	-0,31	Sub-elita	9	4,960	4,08	82,26	2,30	7,62	IS Czas pojedynczego kroku wolny [%]	Elita	9	2,715	2,45	90,24	1,11	4,32	-1,30	0,2124	-0,60	Sub-elita	9	4,340	2,84	65,44	2,48	6,20	IS Czas pojedynczego kroku szybki [%]	Elita	9	2,916	1,69	57,96	1,81	4,02	0,29	0,7747	0,14	Sub-elita	9	2,623	2,49	94,93	0,99	4,25	IS Prędkość kroku wolny [%]	Elita	9	1,795	1,55	86,35	0,78	2,81	-0,37	0,7168	-0,18	Sub-elita	9	2,056	1,44	70,04	1,11	3,00	IS Prędkość kroku szybki [%]	Elita	9	2,015	1,90	94,29	0,77	3,25	0,40	0,6956	0,19	Sub-elita	9	1,678	1,68	100,12	0,58	2,78																																																																																																																																												
IS faza lotu szybki [%]	Elita	9	3,810	3,57	93,70	1,48	6,14	-0,64	0,5333	-0,31																																																																																																																																																																																																																																						
	Sub-elita	9	4,960	4,08	82,26	2,30	7,62				IS Czas pojedynczego kroku wolny [%]	Elita	9	2,715	2,45	90,24	1,11	4,32	-1,30	0,2124	-0,60	Sub-elita	9	4,340	2,84	65,44	2,48	6,20	IS Czas pojedynczego kroku szybki [%]	Elita	9	2,916	1,69	57,96	1,81	4,02	0,29	0,7747	0,14	Sub-elita	9	2,623	2,49	94,93	0,99	4,25	IS Prędkość kroku wolny [%]	Elita	9	1,795	1,55	86,35	0,78	2,81	-0,37	0,7168	-0,18	Sub-elita	9	2,056	1,44	70,04	1,11	3,00	IS Prędkość kroku szybki [%]	Elita	9	2,015	1,90	94,29	0,77	3,25	0,40	0,6956	0,19	Sub-elita	9	1,678	1,68	100,12	0,58	2,78																																																																																																																																																														
IS Czas pojedynczego kroku wolny [%]	Elita	9	2,715	2,45	90,24	1,11	4,32	-1,30	0,2124	-0,60																																																																																																																																																																																																																																						
	Sub-elita	9	4,340	2,84	65,44	2,48	6,20				IS Czas pojedynczego kroku szybki [%]	Elita	9	2,916	1,69	57,96	1,81	4,02	0,29	0,7747	0,14	Sub-elita	9	2,623	2,49	94,93	0,99	4,25	IS Prędkość kroku wolny [%]	Elita	9	1,795	1,55	86,35	0,78	2,81	-0,37	0,7168	-0,18	Sub-elita	9	2,056	1,44	70,04	1,11	3,00	IS Prędkość kroku szybki [%]	Elita	9	2,015	1,90	94,29	0,77	3,25	0,40	0,6956	0,19	Sub-elita	9	1,678	1,68	100,12	0,58	2,78																																																																																																																																																																																
IS Czas pojedynczego kroku szybki [%]	Elita	9	2,916	1,69	57,96	1,81	4,02	0,29	0,7747	0,14																																																																																																																																																																																																																																						
	Sub-elita	9	2,623	2,49	94,93	0,99	4,25				IS Prędkość kroku wolny [%]	Elita	9	1,795	1,55	86,35	0,78	2,81	-0,37	0,7168	-0,18	Sub-elita	9	2,056	1,44	70,04	1,11	3,00	IS Prędkość kroku szybki [%]	Elita	9	2,015	1,90	94,29	0,77	3,25	0,40	0,6956	0,19	Sub-elita	9	1,678	1,68	100,12	0,58	2,78																																																																																																																																																																																																		
IS Prędkość kroku wolny [%]	Elita	9	1,795	1,55	86,35	0,78	2,81	-0,37	0,7168	-0,18																																																																																																																																																																																																																																						
	Sub-elita	9	2,056	1,44	70,04	1,11	3,00				IS Prędkość kroku szybki [%]	Elita	9	2,015	1,90	94,29	0,77	3,25	0,40	0,6956	0,19	Sub-elita	9	1,678	1,68	100,12	0,58	2,78																																																																																																																																																																																																																				
IS Prędkość kroku szybki [%]	Elita	9	2,015	1,90	94,29	0,77	3,25	0,40	0,6956	0,19																																																																																																																																																																																																																																						
	Sub-elita	9	1,678	1,68	100,12	0,58	2,78																																																																																																																																																																																																																																									

Wykres 5. Charakterystyka indeksu symetrii parametrów kinematycznych najwolniejszego oraz najszybszego biegu na dystansie 30 metrów (prędkości maksymalnej) dla elity



Wykres 6. Charakterystyka indeksu symetrii parametrów kinematycznych najwolniejszego oraz najszybszego biegu na dystansie 30 metrów (prędkości maksymalnej) dla sub-elity



Wyniki analizy wariancji jednowymiarowej (ANOVA) dla indeksów symetrii parametrów kinematycznych w zależności od grupy i biegu (Tabela 9.) czas biegu na 20 m jest istotnie zależny od grupy i biegu, jednak nie ma istotnej interakcji między grupą a biegiem. Indeks symetrii długości kroku zależy od grupy, natomiast biegi oraz interakcja grupy z biegiem nie mają na nią istotnego wpływu. Pozostałe zmienne (częstotliwość kroku, czas kontaktu, faza lotu, czas pojedynczego kroku, prędkość kroku) nie wykazują statystycznie istotnych różnic ani w zależności od grupy, ani od biegu, ani od ich interakcji.

Tabela 9. Wyniki analizy wariancji (ANOVA) dla indeksów symetrii parametrów kinematycznych w zależności od grupy i biegu oraz interakcji grupa x bieg w biegu na 20 metrów (przyspieszenia startowego), $p < 0.05$

Zmienna \ Efekt	Grupa		Bieg		Grupa x bieg	
	F	p	F	p	F	p
Czas biegu 20 m [s]	7,83	0,0086	7,52	0,0099	0,16	0,6930
IS długość kroku [%]	4,77	0,0364	0,15	0,7040	0,05	0,8283
IS częstotliwość kroku [%]	0,05	0,8214	0,38	0,5395	2,07	0,1604
IS czas kontaktu [%]	0,50	0,4862	0,31	0,5810	0,06	0,8047
IS faza lotu [%]	2,02	0,1650	0,01	0,9235	0,87	0,3590
IS Czas pojedynczego kroku [%]	0,04	0,8460	0,44	0,5098	1,62	0,2122
IS Prędkość kroku [%]	0,01	0,9357	0,00	0,9551	0,07	0,7936

Analizując testy post-hoc (Tabela 10.) wykazano, że nie ma znaczących różnic między grupami "Elita szybki", "Elita wolny", "Sub-elita szybki" i "Sub-elita wolny" w odniesieniu do analizowanych zmiennych, takich jak czas biegu, długość kroku, częstotliwość kroku, czas kontaktu, faza lotu, czas pojedynczego kroku i prędkość kroku. Najbliżej istotności statystycznej był czas kontaktu dla porównania "Elita wolny x Sub-elita wolny", jednak wynik ten również nie przekroczył progu 0.05.

Tabela 10. Wyniki testów post-hoc według Bonferroniego dla porównań parami indeksów symetrii parametrów kinematycznych w grupach elity i sub-elity w biegu na 20 metrów (przyspieszenia startowego), $p < 0.05$

Zmienna \ Efekt	Elita szybki x Elita wolny	Sub-elita szybki x Sub-elita wolny	Elita szybki x Sub-elita szybki	Elita wolny x Sub-elita wolny
	p	p	p	p
Czas biegu 20 m [s]	0,3100	0,5829	0,4137	0,3148
IS długość kroku [%]	1,0000	1,0000	0,3190	0,3807
IS częstotliwość kroku [%]	1,0000	1,0000	1,0000	1,0000
IS czas kontaktu [%]	1,0000	1,0000	0,2764	0,0823
IS faza lotu [%]	1,0000	1,0000	0,5313	1,0000
IS Czas pojedynczego kroku [%]	1,0000	1,0000	1,0000	1,0000
IS Prędkość kroku [%]	1,0000	1,0000	0,6947	0,2294

Dane zawarte w tabeli 11 wskazują na znaczące różnice między grupami w przypadku czasu biegu na 30 m oraz indeksów symetrii: długości kroku, częstotliwości kroku, fazy lotu i czasu pojedynczego kroku. Brak istotnych efektów dla zmiennej "Bieg" sugeruje, że różnicowanie biegu wolniejszego i szybszego nie wprowadza znaczących różnic w analizowanych zmiennych. Ponadto, brak istotnych efektów interakcji (Grupa x Bieg) wskazuje, że interakcje między grupami a biegiem nie są znaczące (Tabela 11.)

Tabela 11. Wyniki analizy wariancji (ANOVA) dla indeksów symetrii parametrów kinematycznych w zależności od grupy i biegu oraz interakcji grupa x bieg w biegu na 30 metrów (prędkości maksymalnej), $p < 0.05$

Zmienna \ Efekt	Grupa		Bieg		Grupa x bieg	
	F	p	F	p	F	p
Czas biegu 30 m [s]	38,65	0,0000	0,44	0,5129	0,42	0,5230
IS długość kroku [%]	20,77	0,0001	0,20	0,6567	0,50	0,4828
IS częstotliwość kroku [%]	24,16	0,0000	0,00	0,9956	0,24	0,6288
IS czas kontaktu [%]	1,79	0,1902	0,01	0,9231	0,07	0,7917
IS faza lotu [%]	19,67	0,0001	0,18	0,6738	0,01	0,9094
IS Czas pojedynczego kroku [%]	17,19	0,0002	0,12	0,7271	0,05	0,8227
IS Prędkość kroku [%]	0,76	0,3894	0,32	0,5732	1,16	0,2889

Wyniki analizy post-hoc zawarte w tabeli Tabela 12.) wskazują na znaczące różnice między niektórymi grupami w zakresie czasu biegu na 30 m, długości kroku, częstotliwości kroku, fazy lotu oraz czasu pojedynczego kroku. Najbardziej znaczące różnice dotyczą: czasu biegu 30 m między grupami "Elita szybki" i "Sub-elita szybki" oraz "Elita wolny" i "Sub-elita wolny"; długości kroku między "Elita wolny" a "Sub-elita wolny"; częstotliwości kroku między "Elita szybki" i "Sub-elita szybki" oraz "Elita wolny" i "Sub-elita wolny"; fazy lotu między "Elita szybki" a "Sub-elita szybki"; czasu pojedynczego kroku między "Elita szybki" i "Sub-elita szybki". Brak istotnych różnic w prędkości kroku i czasie kontaktu.

Tabela 12. Wyniki testów post-hoc według Bonferroniego dla porównań parami indeksów symetrii parametrów kinematycznych w grupach elity i sub-elity w biegu na 30 metrów (prędkości maksymalnej), $p < 0.05$

Zmienna \ Efekt	Elita szybki x Elita wolny	Sub-elita szybki x Sub-elita wolny	Elita szybki x Sub-elita szybki	Elita wolny x Sub-elita wolny
	p	p	p	p
Czas biegu 30 m [s]	1,0000	1,0000	0,0019	0,0031
IS długość kroku [%]	1,0000	1,0000	0,1163	0,0074
IS częstotliwość kroku [%]	1,0000	1,0000	0,0166	0,0191
IS czas kontaktu [%]	1,0000	1,0000	1,0000	1,0000
IS faza lotu [%]	1,0000	1,0000	0,0171	0,0651
IS Czas pojedynczego kroku [%]	1,0000	1,0000	0,0225	0,0987
IS Prędkość kroku [%]	1,0000	1,0000	1,0000	1,0000

IV 2.2. Regresja krokowa wsteczna

W Tabeli 13. przedstawiono wyniki regresji krokowej wstecznej dla zmiennych kinematycznych, gdzie IS oznacza indeks symetrii (Analizę przeprowadzono dla różnych warunków: bieg wolny i szybki z podziałem na 20 metrów (przyspieszenie startowe) i 30 metrów (prędkość maksymalna). Wyniki uwzględniają wartość współczynnika regresji (b), wartość p, oraz współczynnik determinacji (R^2). Wartości asymetrii dla danych grup i parametrów mają negatywny lub pozytywny wpływ na uzyskany czas w trakcie wybranej fazy biegu.

Skupiając uwagę na biegu wolnym na 20 metrów w grupie elity można stwierdzić, że wymienione indeksy symetrii: długości kroku, częstotliwości kroku, czasu kontaktu, prędkość kroku są istotne statystycznie ($p < 0.05$) i wpływają na czas biegu wolnego na 20 metrów. Długość kroku, częstotliwość kroku oraz czas kontaktu mają pozytywny wpływ na czas, natomiast prędkość kroku wpływa negatywnie na czas. Natomiast w grupie sub-elity indeksy symetrii długości kroku oraz czas kontaktu są istotne statystycznie i mają wpływ na czas biegu wolnego na 20 metrów. Długość kroku wpływa pozytywnie, natomiast czas kontaktu oraz faza lotu mają negatywny wpływ na czas biegu. W trakcie biegu szybkiego na odcinku 20 metrów w przypadku elity tylko czas kontaktu jest istotny statystycznie i ma wpływ na czas biegu szybkiego na 20 metrów. Jego wpływ jest pozytywny. W przypadku sub-elity regresja nie wykazała żadnego istotnie statystycznego parametru w szybkim biegu na 20 m.

Analizując odcinek 30 metrów w biegu wolnym dla elity nie wykazano istotności dla żadnego z indeksów symetrii parametrów kinematycznych. Natomiast dla grupy sub-elity również w biegu wolnym na 30 metrów indeksy symetrii: długości kroku, częstotliwości kroku, czasu kontaktu, fazy lotu oraz prędkości kroku są istotne statystycznie. Długość kroku, częstotliwość kroku oraz prędkość kroku wpływają negatywnie na czas, natomiast czas kontaktu oraz faza lotu mają pozytywny wpływ. Biorąc pod uwagę odcinek 30 metrów dla biegów szybkich, w grupie elity dwa indeksy symetrii był istotnie statystycznie. Był to indeks symetrii długości kroku oraz częstotliwości krok. Pierwszy z nich wpłynął negatywnie, a drugi pozytywnie na wynik. W grupie sub-elity w biegu szybkim na 30 metrów jedynym istotnym parametrem był indeks symetrii czasu kontaktu, który miał pozytywny wpływ na wynik.

Tabela 13. Wyniki regresji krokowej dotyczącej indeksów symetrii parametrów kinematycznych na dystansach 20 (przyspieszenia startowego) i 30 metrów (prędkości maksymalnej) dla elity i sub-elity, $p < 0.05$

	Zmienne	Elita				Zmienne	Sub-elita			
		20 metrów					20 metrów			
		b	p	R ²	p		b	p	R ²	p
Bieg wolny	Wyraz wolny	2,3423	0,0000	0,9544	0,0015	Wyraz wolny	2,5858	0,0000	0,8155	0,0088
	IS Długość kroku	0,0321	0,0007			IS Długość kroku	0,0173	0,0278		
	IS Częstotliwość kroku	0,1079	0,0003			IS Czas kontaktu	-0,0196	0,0113		
	IS Czas kontaktu	0,0191	0,0004			IS Faza lotu	-0,0070	0,0126		
	IS Prędkość kroku	-0,0810	0,0003							
Bieg szybki	Wyraz wolny	2,2049	0,0000	0,5686	0,0115	brak istotności				
	IS Czas kontaktu	0,0435	0,0115							
	Zmienne	Elita				Zmienne	Sub-elita			
		30 metrów					30 metrów			
		b	p	R ²	p		b	p	R ²	p
Bieg wolny	brak istotności					Wyraz wolny	3,0029	0,0000	0,9393	0,0114
						IS Długość kroku	-0,0430	0,0136		
						IS Częstotliwość kroku	-0,0370	0,0331		
						IS Czas kontaktu	0,0628	0,0025		
						IS Faza lotu	0,0389	0,0053		
						IS Prędkość kroku	-0,0370	0,0299		
Bieg szybki	Wyraz wolny	2,9151	0,0000	0,5485	0,0388	Wyraz wolny	2,9914	0,0000	0,3718	0,0478
	IS Długość kroku	-0,0164	0,0183			IS Czas kontaktu	0,0247	0,0478		
	IS Częstotliwość kroku	0,0167	0,0238							

IV 2.3. Profile asymetrii

Tabela 14. przedstawia wyniki testów statystycznych oceniających równoległość (Parallelism), poziom (Level) i płaskość (Flat) profili dla wybranych faz biegu, czyli dla 20 metrów (przyspieszenie startowe) oraz 30 metrów (prędkość maksymalna) z podziałem na bieg wolny i szybki oraz na grupę elity i sub-elity.

Biorąc pod uwagę analizę profilową PAM możemy stwierdzić, że w przypadku biegu wolnego na 20 metrów i interpretacji wyników wartość Wilksa (0.5345) oraz test F (2.09) wskazują na brak istotności ($p=0.1371$), co sugeruje, że nie ma istotnych różnic w profilach czasowych dla tego dystansu przy niskiej prędkości. Jednak interakcje między grupami są istotne ($F=4.80$, $p=0.0121$), co oznacza, że różnice mogą pojawiać się w interakcjach między zmiennymi. Profile nie są równoległe, ale różnice nie są istotne statystycznie. Wskazuje to na zmienność w odpowiedziach, ale różnice nie są znaczące. W przypadku poziomym brak istotnych różnic, sugeruje podobne ogólne wyniki między grupami. Analizując płaskość, istotne różnice wskazują na zmienność w wydajności grup w różnych warunkach w ramach tej zmiennej.

W przypadku biegu szybkiego na 20 metrów wartość Wilksa (0.7060) oraz test F (1.00) również wskazują na brak istotności ($p=0.4584$). Jednakże, wartości interakcji między grupami ($F=7.10$, $p=0.0026$) są znaczące, co sugeruje, że przy wyższych prędkościach występują istotne różnice w profilach czasowych między badanymi grupami. Profile są równoległe, brak istotnych różnic. Sugeruje to spójne wzorce wśród grup. Brak istotnych różnic w poziomach, wskazujące na podobne ogólne wyniki. Istotne różnice w płaskości, wskazują na zmienność w wydajności grup w warunkach szybkiego biegu.

Dla biegu wolnego na 30 metrów Wilks' Lambda wynosi 0.7440, co sugeruje, że znacząca część wariacji nie jest wyjaśniona przez model równoległości. Wartość F (0.83) oraz ($p=0.5550$) wskazują, że różnice w równoległości profili między grupami nie są statystycznie istotne. Wyniki wskazują, że istnieje istotna różnica w poziomie średnich wartości zmiennych kinematycznych między grupami. Wysoka wartość F (12.00) oraz niska p (0.02930) sugerują, że ogólna wysokość profilu (średnie wartości zmiennych) różni się znacząco między grupami. Wartość F (4.54) oraz p (0.0148) wskazują, że różnice w płaskości profili są statystycznie istotne. Oznacza to, że zmienne kinematyczne w ramach każdej grupy nie są do siebie podobne. Istnieją znaczące różnice między zmiennymi w jednej

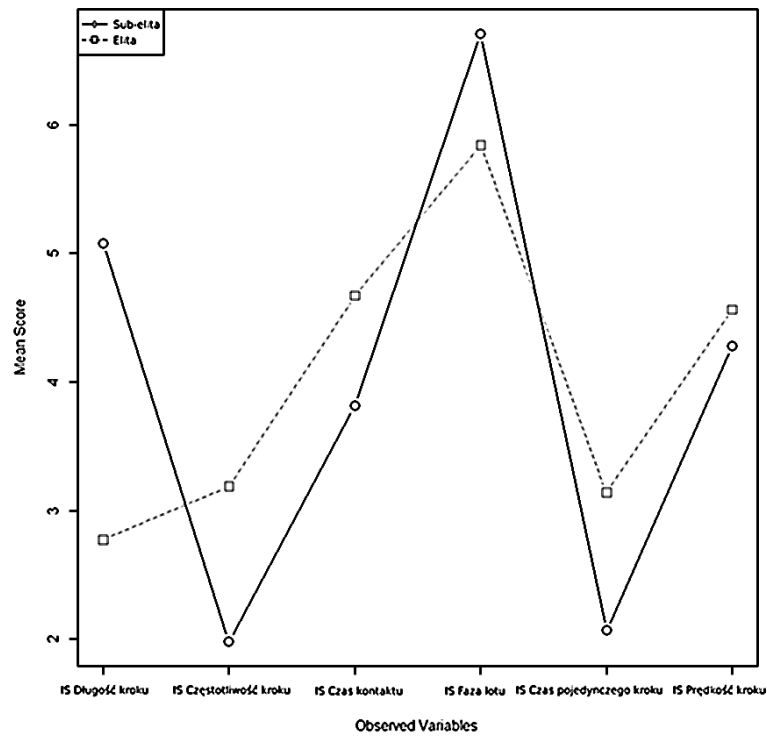
lub obu grupach. Profil nie jest płaski, co sugeruje, że poszczególne parametry kinematyczne wykazują różne wartości.

Dla szybkiego biegu na 30 m, wartość Wilksa (0.6536) oraz test F (1.27) wskazują na brak istotnych różnic ($p=0.3375$). Interakcje między grupami ($F=2.78$, $p=0.0678$) są bliskie istotności, co może sugerować pewne różnice, które warto by było bliżej zbadać. Profile są równoległe, brak istotnych różnic. Sugeruje to spójne wzorce wśród grup. Brak istotnych różnic w poziomach wskazuje na podobne wyniki. Różnice w płaskości są bliskie istotności, co sugeruje pewną zmienność w wydajności.

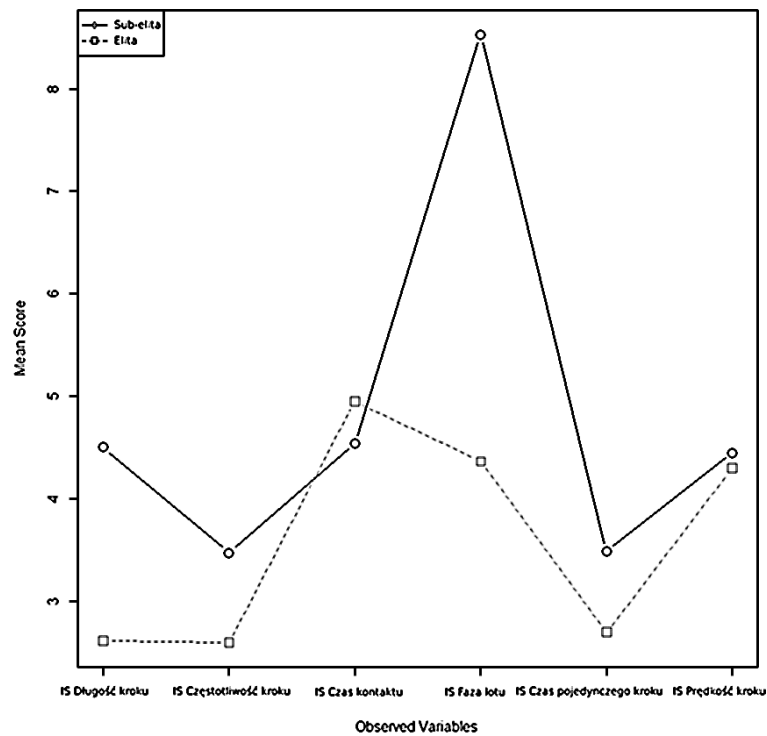
Tabela 14. Analiza profilowa PAM indeksów symetrii parametrów kinematycznych dystansach 20 (przyspieszenia startowego) i 30 metrów (prędkości maksymalnej) dla Elity i Sub-elity, $p < 0.05$

Bieg	Równoległość						Poziom				Płaskość			
	Test	Statistic	F	n.df1	d.df1	p	SS	MS	F	p	F	df1	df2	p
20 m wolny	Wilks	0,5345	2,09	5	12	0,1371	0,01	0,01	0,0	0,9670	4,80	5	12	0,0121
20 m szybki	Wilks	0,7060	1,00	5	12	0,4584	6,95	6,95	2,0	0,1800	7,10	5	12	0,0026
30 m wolny	Wilks	0,7440	0,83	5	12	0,5550	4,53	4,53	1,2	0,2930	4,54	5	12	0,0148
30 m szybki	Wilks	0,6536	1,27	5	12	0,3375	0,23	0,23	0,1	0,7650	2,78	5	12	0,0678

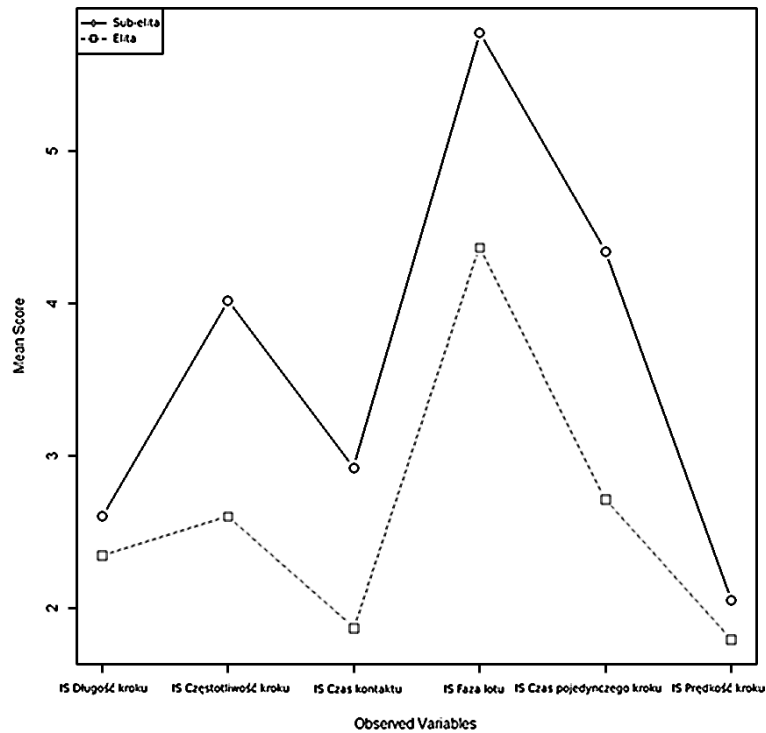
Wykres 7. Analiza profilowa PAM indeksów symetrii parametrów kinematycznych dla biegu wolnego 20 metrów (przyspieszenie startowe) dla elity i sub-elity



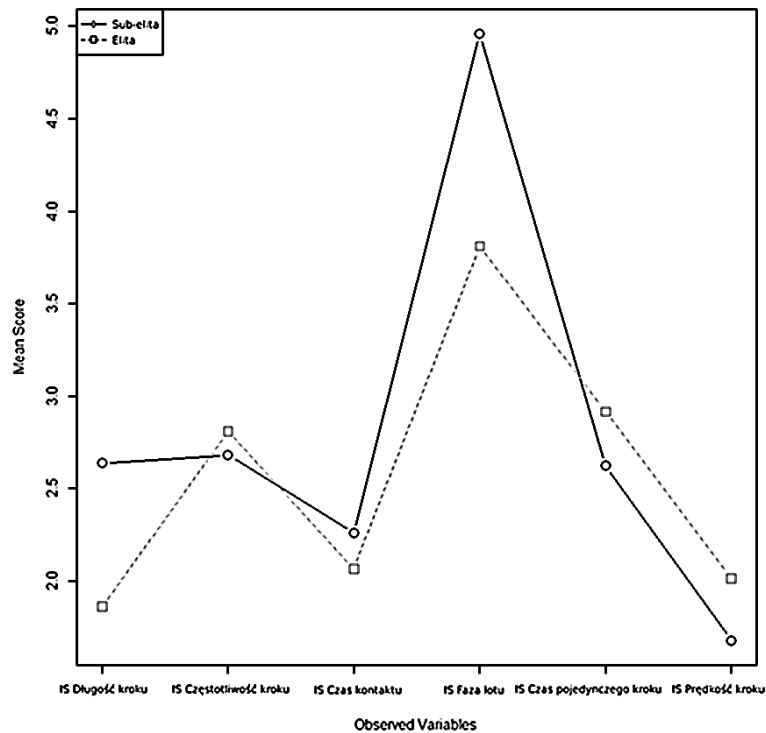
Wykres 8. Analiza profilowa PAM indeksów symetrii parametrów kinematycznych dla biegu szybkiego 20 metrów (przyspieszenie startowe) dla elity i sub-elity



Wykres 9. Analiza profilowa PAM indeksów symetrii parametrów kinematycznych dla biegu wolnego 30 metrów (prędkość maksymalna) dla elity i sub-elity



Wykres 10. Analiza profilowa PAM indeksów symetrii parametrów kinematycznych dla biegu szybkiego 30 metrów (prędkość maksymalna) dla elity i sub-elity



V Dyskusja

Celem pracy jest określenie na podstawie uzyskanych parametrów kinematycznych w biegu na dystansie 50 m występowania symetrii lub asymetrii funkcjonalnej (kinematycznej) i zbadanie jej wpływu na poszczególne fazy biegu oraz na wynik końcowy u zawodników na różnym poziomie sportowym. Dodatkowym aspektem jest porównanie występowania asymetrii i oddziaływania jej w stosunku do osiągniętej prędkości maksymalnej.

Przeprowadzone analizy ww. eksperymentu dostarczają wiele ciekawych informacji dotyczących występowania asymetrii funkcjonalnej (parametry kinematyczne) w biegu sprinterski z podziałem na zawodników zaliczanych do elity i sub-elity. Na podstawie tak przeprowadzonej analizy można zauważyć kilka kluczowych trendów i zależności, które mają istotne znaczenie w procesie treningowym i osiągnięciu jak najlepszych wyników sportowych, nie tylko badanych zawodników, ale szerszej populacji uprawiającej biegi krótkie.

V 1. Analiza kinematyki oraz indeksów symetrii biegu na 50 metrów z podziałem na poszczególne fazy

Szczegółowa analiza kinematyki oraz indeksów symetrii biegu sprinterskiego pozwala na lepsze zrozumienie różnic w technice sprintu pomiędzy zawodnikami reprezentującymi różny poziom zaawansowania (Ciacci i wsp. 2010, Morin i wsp. 2012). W analizie skupiono się na porównaniu przebiegu zmian podstawowych parametrów kinematycznych biegu, takich jak czas biegu, długość kroku, częstotliwość kroku, czas kontaktu, faza lotu, czas pojedynczego kroku oraz prędkość kroku sprinterów zaliczanych do grupy elita i sub-elita. Eksperyment dotyczył powtarzanych biegów sprinterskich na dystansie 50 metrów, z podziałem na mniejsze fazy biegu: faza przyspieszenia (20 m) oraz faza prędkości maksymalnej (30 m), określona jako tzw. bieg na 30 m z 20 m nabiegu. Według Cronin i wsp. (1996) w taki sposób pozyskane wyniki mogą dostarczyć istotnych informacji, które mogą być wykorzystane do optymalizacji treningu sprinterskiego. Zawodnicy z grupy elita osiągają znacząco lepsze wyniki we wszystkich analizowanych

parametrach kinematycznych opartych na wartościach bezwzględnych oraz w przeliczeniu na ich wskaźnik indeksów symetrii w porównaniu do grupy sub-elita. Dla parametrów kinematycznych różnice te są szczególnie widoczne w zakresie czasu biegu, częstotliwości kroków, czasu kontaktu z podłożem, czasu pojedynczego kroku oraz prędkości kroku, co potwierdzają badania przeprowadzone przez Bruggemann i wsp. (1990), Bellotti (1991), Delecluse (1997), Muller i wsp. (1997). Natomiast dla indeksów symetrii parametrów kinematycznych na korzyść elity wskazują długości kroku, częstotliwości kroku, czas kontaktu, fazy lotu oraz prędkość kroku. Taki trend potwierdzają wcześniejsze badania Mero i wsp. (1992), Meyers i wsp. (2017), Bezodis i wsp. (2019), Miyashiro i wsp. (2019), Bissas i wsp. (2022), D'Hondt i wsp. (2024).

V 1.1. Całkowity dystans 50 metrów

Największe różnice pomiędzy grupami zaobserwowano w czasie pokonywania dystansu 50 metrów. Sprinterzy z grupy elita byli w stanie ukończyć ten dystans szybciej zarówno w biegu wolnym, jak i szybkim. Różnica ta wynosiła 0,20 s w biegu wolnym i 0,193 s w biegu szybkim, co jest istotne statystycznie ($p < 0,05$). Częstotliwość kroków okazała się być wyższa u zawodników elity zarówno w biegu wolnym, jak i szybkim, z różnicą wynoszącą odpowiednio 0,309 kroków/s i 0,30 kroków/s ($p < 0,05$). Długość kroków nie wykazała jednak istotnych różnic statystycznych pomiędzy grupami, co może sugerować, że częstotliwość kroków odgrywa większą rolę w osiągnięciu lepszych wyników przez sprinterów elity, co wykazał Sunaryadi (2022). Natomiast w kontekście indeksów symetrii dla długości kroków wykazany został silny efekt na poziomie -0,87, a w biegu szybkim był umiarkowany i wyniósł -0,66, co świadczy o symetryczności kroku biegowego na całym dystansie na korzyść elity. Podobnie indeks symetrii częstotliwości kroku wykazał umiarkowany efekt w biegu wolnym (-0,74) oraz w biegu szybkim (-0,62). Dotychczas nie zostało udowodnione, że korzyść płynąca ze zwiększenia jednego z tych dwóch parametrów oraz czy poprawa któregoś z nich wpłynie w znacznym stopniu na osiągnięcie lepszego wyniku sportowego. Niemniej jednak, silna korelacja długości i częstotliwości kroku pomiędzy wynikiem końcowym wykazuje, że są to ważne zmienne wpływające na czas biegu (Wilson i wsp. 2008, Mackala i wsp. 2015a). Czas kontaktu stopy z podłożem był krótszy u sprinterów z grupy elita, co było widoczne zarówno w biegu wolnym (różnica

0,011 s), jak i szybkim (różnica 0,011 s). Krótszy czas kontaktu pozwala na szybsze przejście do fazy lotu, co z kolei skraca czas pojedynczego kroku i zwiększa prędkość kroku (Mero i wsp. 1992, Hunter i wsp. 2003). Faza lotu, mimo że nie wykazała istotnych różnic statystycznych w wartościach parametrów kinematycznych, była również nieco krótsza u zawodników elity oraz jej indeksy symetrii wskazywały efekt umiarkowany. Prędkość wykonania pojedynczego kroku, która jest kombinacją długości i częstotliwości kroków, była znacząco większa u zawodników elity zarówno w biegu wolnym (różnica 0,376 m/s) jak i szybkim (różnica 0,334 m/s). Należy przypuszczać, że elita sprinterów ma wyższą zdolność do generowania wyższych prędkości dzięki optymalnemu połączeniu częstotliwości kroków i efektywności w kontakcie z podłożem, co potwierdzają wyniki wykazane w badaniach (Murphy i wsp. 2003, Hunter i wsp. 2005, Lockie i wsp. 2013, Willwacher i wsp. 2016).

V 1.2. Dystans 20 metrów (faza przyspieszenia startowego)

Faza przyspieszenia startowego jest kluczowa dla uzyskania wysokiej prędkości końcowej (Mero i wsp. 1992). W tej fazie sprinterzy z grupy elita osiągnęli lepsze czasy zarówno w biegu wolnym, jak i szybkim. Różnica w czasie biegu na 20 metrów wynosiła 0,057 s w biegu wolnym i 0,076 s w biegu szybkim, co jest istotne statystycznie ($p < 0,05$). Lepsze czasy elity wskazują na efektywniejszy start i szybsze osiągnięcie prędkości maksymalnej, co potwierdzają badania Bezodis i wsp. (2019). Udowadniają one również, że elita sprinterów ma znacznie większe umiejętności przyspieszania na dystansie poprzez wykorzystanie skuteczniejszego odbicia w każdym kroku.

Z kolei w analizie indeksu symetrii, długości kroku były wyraźnie lepsze u zawodników elity. Efekty d Cohena w biegu wolnym wynosiły -0.87, a w biegu szybkim -0.66, co sugeruje, że elita ma bardziej symetryczny i efektywny krok w początkowej fazie biegu, podobnie jak wykazał D'Hondt J i wsp. (2024). Analiza wariancji (ANOVA) IS długości kroków wykazuje zależność od grupy, co sugeruje, że elita i sub-elita różnią się pod względem tej cechy, jednak zmienne biegu i ich interakcje nie mają na nią istotnego wpływu, co potwierdzają badania Paradisis i wsp. (2019). Twierdził on, że różnice w asymetrii długości kroku były zauważalne między różnymi poziomami sportowymi, przy czym szybsi sprinterzy wykazywali mniejszą asymetrię. Ponadto, dodatkowa analiza metodą

regresji krokowej wstecznej również wykazała, że indeksy symetrii długości kroku mają pozytywny wpływ na czas biegu u elity, jak i sub-elity. Jednakże, Haugen (2019a) twierdzi, że pomimo obecności asymetrii, ich dokładny wpływ na poziom rozwijanej prędkości maksymalnej sprintera nie jest jednoznacznie określony.

Częstotliwość kroków osiągnęła wyższe wartości u zawodników elity, zarówno w biegu wolnym (różnica 0,276 kroków/s), jak i szybkim (różnica 0,291 kroków/s). Parametr ten odgrywa kluczową rolę w fazie przyspieszenia, co potwierdził również w swoich badaniach Mackala i wsp. (2015b). Indeks symetrii tego parametru w początkowych 20 metrach był również bardziej symetryczny u zawodników elity. W biegu wolnym efekt wynosił -0.74, a w biegu szybkim -0.62. Analiza statystyczna metodą regresji krokowej również potwierdziła tę zależność, że indeks symetrii częstotliwości kroku ma pozytywny wpływ na czas biegu w przypadku elity. Wyższa symetria częstotliwości kroku może przyczyniać się do bardziej efektywnego startu i lepszych wyników, albowiem często związana jest ze skuteczniejszym biegiem sprinterskim. Sugeruje to zrównoważone i skoordynowane ruchy kończyn, które są kluczowe dla utrzymania maksymalnej prędkości biegu (Exell i wsp. 2010). Jednakże badania na grupie chłopców w wieku od 11 do 16 lat przeprowadzone przez Meyersa i wsp. (2017) nie wykazały wpływu symetrii częstotliwości kroku na wynik końcowy, co może świadczyć o tym, że symetria częstotliwości kroku może mieć znaczenie dopiero na wyższym poziomie sportowym.

W pokonaniu 20 metrowego odcinka w fazie przyspieszenia startowego czas kontaktu stopy z podłożem oraz faza lotu była krótsza u sprinterów elity, co jest zgodne z wynikami uzyskanymi na pełnym dystansie 50 metrów. Należy przypuszczać, że krótszy czas kontaktu umożliwi szybsze przejście do fazy lotu, co skraca czas pojedynczego kroku. Takie spostrzeżenia wskazują w swoich badaniach Mero i wsp. (1992), Bezodis i wsp. (2019). Indeks symetrii czasu kontaktu z podłożem w fazie przyspieszenia wykazał umiarkowane różnice, z lepszą symetrią u elity. W biegu wolnym różnica wynosiła -0.52, co wskazuje na bardziej równomierny kontakt z podłożem, umożliwiający efektywniejsze przyspieszenie (Haugen i wsp. 2019a). Testy post-hoc Bonferroni wykazały, że najbliższej istotności statystycznej był czas kontaktu w porównaniu "Elita wolny x Sub-elita wolny". Natomiast regresja krokowa wsteczna wykazała, że w biegu szybkim w fazie przyspieszenia startowego, jedynym istotnym parametrem dla grupy elity jest IS czas kontaktu, który ma

pozytywny wpływ na czas biegu, co potwierdza Bezodis i wsp. (2019). W swoich badaniach opisał, że asymetrie w czasie kontaktu stopy z podłożem mogą wpływać na wyniki sportowe, co podkreśla złożoność startu sprinterskiego i zaznacza, że optymalne wyniki mogą zależeć od minimalizowania tych asymetrii, aby zapewnić bardziej zrównoważone i silne odepchnięcie (odbicie), co pozytywnie przyczynia się do wzrostu prędkości przyspieszenia i ogólnie wyższej prędkości maksymalnej biegu. W przeciwieństwie do tych stwierdzeń, Bissas i wsp. (2022) w swoich badaniach zaobserwował, że symetria czasu kontaktu stopy z podłożem nie miała istotnego pozytywnego wpływu na wyniki sportowe. Badania Bissas i wsp. (2022) również wykazały, że asymetria mechaniczna (parametrów kinematycznych biegu), w tym asymetria czasu kontaktu, była ogólnie niska wśród elitarnych sprinterów i różniła się między poszczególnymi osobami. Pomimo tych asymetrii, nie stwierdzono istotnej korelacji między stopniem asymetrii a wynikami w sprincie. Świadczyć to może o wysokim zindywidualizowaniu wyżej wymienionych parametrów.

Wysoki wskaźnik asymetrii fazy lotu ma negatywny wpływ na wynik końcowy w biegu wolnym w przypadku sub-elity, co wykazano w analizie regresji krokowej wstecznej. Badania Haugen i wsp. (2019a) podkreślają, że symetria w fazie lotu podczas sprintu może pozytywnie wpłynąć na wyniki, co przekłada się na bardziej efektywne i silniejsze ruchy kończyn dolnych. Konkretnie, jego analiza wskazuje, że utrzymanie zrównoważonej i zsynchronizowanej pracy kończyn dolnych w fazie lotu (między lewą a prawą nogą) pomaga sprinterom osiągnąć bardziej skuteczne i skoordynowane odepchnięcie, co jest kluczowe dla przyspieszenia i ogólnej prędkości biegu.

Prędkość kroku wykonania pojedynczego kroku była znacząco większa u zawodników elity, z różnicą wynoszącą 0,264 m/s w biegu wolnym i 0,224 m/s w biegu szybkim. Wysoka prędkość kroku w fazie przyspieszenia jest kluczowa dla podwyższenia prędkości biegu w dalszej części dystansu (Hunter i wsp. 2005, Kawamori i wsp. 2014). Jakkolwiek indeksy symetrii prędkości kroku nie wykazały statystycznie istotnych różnic, umiarkowane efekty sugerują, że zawodnicy elity mają bardziej symetryczną prędkość wykonania kroku, co przekłada się na ich skuteczniejsze wykonanie w fazie prędkości maksymalnej. Z kolei regresja krokowa wsteczna wykazała negatywny wpływ wysokiej asymetrii prędkości kroku w biegu wolnym dla sub-elity. Potwierdzają to badania Miyashiro i wsp. (2019), w których analizując kinematykę sprintu z maksymalną prędkością wykazano,

że asymetria prędkości kroku może wpływać na lepsze wyniki. W tym eksperymencie zaobserwowano, że utrzymywanie symetrycznej prędkości kroku podczas sprintu prowadzi do bardziej efektywnych i skoordynowanych ruchów, zwiększając ogólne możliwości organizmu na rozwinięcie jak najwyższej wartości prędkości biegu.

Dotychczasowe trendy i wnioski wynikające z analizy przebiegu zmian wybranych parametrów kinematycznych dla biegu na 20 metrów wyraźnie potwierdza analiza profilowa PAM. W przypadku biegu wolnego na 20 metrów (przyspieszenie startowe), wskazuje, że ogólne wzorce asymetrii parametrów kinematycznych są podobne między grupami elity i sub-elity. Istotność interakcji między grupami oraz różnice w płaskości profili sugerują, że mimo ogólnego podobieństwa, istnieją subtelne różnice w sposobie, w jaki poszczególne zmienne wpływają na skuteczność biegu. Sprinterzy zaliczani do grupy elita wykazują bardziej spójne i zoptymalizowane wzorce asymetrii, co jest kluczowe dla ich sukcesu w biegach krótkich (Alcaraz i wsp. 2018). Natomiast w przypadku biegu szybkiego na 20 metrów (przyspieszenie startowe), wykazane istotne różnice w interakcjach między grupami wskazują na znaczące różnice w profilach asymetrii parametrów kinematycznych przy wyższych prędkościach. Może to wynikać ze znacznie dłuższego stażu treningowego elitarniej grupy, co bezpośrednio wpływa na wyższe wartości prędkości w tej fazie, umożliwiając im na bardziej efektywne wykorzystanie siły/mocy i techniki w warunkach początkowego przyspieszenia. Według Brughelli i wsp. (2011) ta zmienność parametrów kinematycznych może odzwierciedlać asymetrię we wzorcu biegu przy różnych prędkościach. Może ona wpływać na ogólnie pojętą skuteczność biegu sprinterskiego, potencjalnie prowadząc do różnic mechanicznej pracy (koordynacji) między lewą i prawą stroną ciała. Wysokiej klasy sprinterzy są w stanie utrzymać bardziej symetryczne wzorce ruchu nawet przy wyższych prędkościach, co jest korzystne w fazie początkowego przyspieszenia dla efektywności biegu i redukcji ryzyka kontuzji.

V 1.2. Dystans 30 metrów (faza prędkości maksymalnej)

Dalsza a jednocześnie głębsza analiza zrozumienia przebiegu zmian parametrów kinematycznych w biegu sprinterskim na dystansie 50 metrów, wymaga szczegółowej analizy pokonania ostatnich 30 metrów tego biegu. Jak wcześniej wspomniano, odcinek ostatnich 30 metrów jest definiowany jako tzw. faza biegu z maksymalną prędkością.

Według Coha i wsp. (2023) w tej fazie bez względu na poziom uzyskanych wyników zawodnicy uzyskują maksymalne wartości prędkości biegowej. Ze względu na to, że bieg na 30 metrów z 20 metrowego nabiegu klasyfikowany jest jako wysięk o maksymalnej intensywności, należy go szczegółowo przeanalizować. Uzupełni on w znaczący sposób wcześniej przeprowadzoną analizę na 20 metrach, co z praktycznego punktu widzenia przekaże istotne informacje dla trenerów i zawodników. Dotyczyć one będą zmian przebiegu parametrów kinematycznych w kontekście asymetrii na pełnym dystansie 50 metrów.

Analizując fazę biegu z tzw. maksymalną prędkością (30 m) daje się zauważyć, że sprinterzy z grupy elita uzyskiwali lepsze czasy, co jest zauważalne zarówno w biegu wolnym (różnica 0,143 s), jak i szybkim (różnica 0,116 s). Analizy biegów sprinterskich Mero i wsp. (1992) potwierdzają przedstawione wyniki dysertacji, że im wyższy poziom szybkościowy zawodnika, tym lepsze możliwości utrzymania maksymalnej prędkości biegu na dłuższym odcinku. Wraz z możliwością utrzymania prędkości w dłuższym czasie, częstotliwość kroków również osiąga swoje maksymalne wartości, co potwierdziła elita sprinterów. W swoich badaniach Ae (2017) potwierdził informację, że utrzymanie maksymalnej prędkości na dłuższych dystansach również powiązana jest z osiągnięciem maksymalnej częstotliwości kroków. Zależność ta jest poparta analizą elitarnych sprinterów, która pokazuje, że zarówno częstotliwość kroków, jak i prędkość biegu osiągają swoje maksymalne wartości razem. Dlatego też związek między utrzymaniem wysokiej prędkości i osiągnięciem wysokiej częstotliwości kroków jest kluczowym czynnikiem wpływającym na wyniki wysokiej klasy sprinterów i nie tylko. Częstotliwość kroków, zarówno w swoim wolnym i szybkim biegu była wyższa odpowiednio u elitarnych zawodników o 0,348 i 0,305 kroków/s. Analiza wariancji (ANOVA) dla indeksów symetrii częstotliwości kroków wskazuje na istotne różnice między grupami, co potwierdzają testy post-hoc Bonferroniego pomiędzy IS częstotliwości kroku między biegami "Elita szybki" a "Sub-elita szybki" oraz "Elita wolny" a "Sub-elita wolny". Regresja krokowa wsteczna wykazała również istotność częstotliwości kroku w biegu wolnym dla sub-elity oraz w biegu szybkim dla elity. Salo i wsp. (2011) w swoich badaniach stwierdził, że u sprinterów można zaobserwować asymetrie w częstotliwości kroków na różnym poziomie sportowym, ale te asymetrie niekoniecznie utrudniają osiąganie wyników. Zamiast tego mogą odzwierciedlać indywidualne adaptacje i strategie, których zawodnicy używają w treningu, aby

zmaksymalizować potencjał szybkościowy, co potwierdza wykorzystanie w biegu sprinterskim lepszej (optymalnej) techniki biegu, np. wśród elity.

Z kolei długość kroków potwierdzała trend z fazy przyspieszenia i nie wykazała znaczących różnic statystycznych. Jednakże, indeks symetrii długości kroku w fazie prędkości maksymalnej był mniej znaczący niż w fazie przyspieszenia, ale nadal wskazywał na przewagę elity. Efekty wynosiły -0.66 w biegu szybkim, co sugeruje, że symetria długości kroku pomaga utrzymać stabilną prędkość. Podobny punkt widzenia wykazał w swoich badaniach i Babic i wsp. (2011). Analizę wariancji (ANOVA) oraz testy post-hoc w kontekście symetrii długości kroku wykazały istotność, szczególnie pomiędzy biegiem "Elita wolny" a "Sub-elita wolny". Regresja krokowa wsteczna również wykazuje negatywny wpływ wysokiej asymetrii długości kroków w biegu wolnym dla sub-elity oraz wskazuje na istotność symetrii w biegu szybkim dla elity. Ten trend jest potwierdzeniem analiz D'Hondt i wsp. (2024) zastosowanych do przyspieszenia startowego co potwierdza, że asymetria długości kroków ma istotne znaczenie dla skuteczności biegu również w fazie maksymalnej prędkości. Zauważa on, że asymetria długości kroku i innych funkcji kończyn dolnych jest ogólnie postrzegana jako niepożądana dla poprawy wyników w biegach krótkich. Jego analizy wskazują, że negatywny związek lub brak istotnego związku między asymetrią długości kroku a podniesieniem potencjału szybkościowego, powinien zainicjować szerszej zakrojone, wysokiej jakości badania, aby w pełni zrozumieć te relacje. Pozwoli to na lepsze i pełne zrozumienie relacji występujących między analizowanymi parametrami.

Czas kontaktu stopy z podłożem oraz faza lotu były krótsze u sprinterów elity, co sugeruje ich lepszą efektywność w generowaniu mocy szczytowej w trakcie wykonania każdego kroku. Fakt ten potwierdzają w swoich badaniach Lockie i wsp. (2013) oraz Willwacher i wsp. (2016). Zasadnym wydaje się stwierdzić, że krótszy czas kontaktu z podłożem w fazie prędkości maksymalnej może być kluczowym czynnikiem do uzyskania i utrzymania jak najwyższych wartości, nie tylko w tej fazie, ale w biegu na całym dystansie. Analiza indeksów symetrii czasu kontaktu stopy z podłożem wykazała jedynie w regresji krokowej wstecznej pozytywny wpływ symetrii czasu kontaktu podczas biegu wolnego w przypadku sub-elity. Blauberger i wsp. (2021) w swoich badaniach przedstawił, że w biegach krótkich występuje ujemna korelacja między symetrią czasu kontaktu stopy

z podłożem, a skutecznością biegu sprinterskiego. Badania dotyczyły elity francuskich sprinterów w biegu na 100 metrów. Te dwa przeciwstawne twierdzenia wynikają z długości przebiegniętego odcinka. Należy przypuszczać, że im dłuższy dystans sprinterski – do 100 metrów, tym bardziej dynamiczne i trudne do zdefiniowania zmiany ww. asymetrii parametrów kinematycznych. Istotnym elementem w tym założeniu jest to, że pomimo wydłużonego dystansu biegowego, wysokiej klasy sprinterzy mają lepsze umiejętności synchronizowania długości i częstotliwości kroku (uzyskanie optymalnego czasu kontaktu stopy z podłożem). Należy przypuszczać, że właściwa interakcja między tymi parametrami automatycznie wpływa na możliwości uzyskania wyższej prędkości wykonania kroku. Założenia te potwierdził również w swoich badaniach Delecluse i wsp. (1995) i Murphy i wsp. (2003).

Kolejna analiza statystyczna w postaci aplikacji indeksów symetrii dla fazy lotu wykazała istotne różnice w symetrii na korzyść elity, z umiarkowanymi efektami (-0.71) w biegu szybkim. Zawodnicy elity mają bardziej symetryczną fazę lotu, co może wpływać na stabilność i efektywność biegu. Podobny do tej zależności trend potwierdzony badaniami Bezodis i wsp. (2019), mogliśmy zauważyć u elity w poprzedniej fazie przyspieszenia startowego. Analiza wariancji dla fazy prędkości maksymalnej (30 metrów) wskazuje na istotne różnice między grupami w zakresie symetrii trwania fazy lotu, co potwierdzają testy post-hoc między biegami "Elita szybki" a "Sub-elita szybki". Regresja krokowa wsteczna wykazała, że asymetria fazy lotu ma pozytywny wpływ na wynik biegu wolnego grupie sub-elity. Haugen i wsp. (2019b) w swoich badaniach zauważa, że rozbieżności w czasie spędzonym przez sprintera w powietrzu (bierna faza lotu) mogą prowadzić do nieefektywności w mechanice biegu, potencjalnie powodując brak równowagi, który wpływa na ogólną prędkość i ryzyko kontuzji. Taka zależność skutkuje uzyskaniem wysokiej szybkości wykonania pojedynczego kroku, która w badaniach była znacząco wyższa u zawodników elity. Potwierdzają to również dotychczasowe badanie parametrów kinematycznych przeprowadzone przez Van den Tillaar i wsp. (2021).

Z kolei indeks symetrii czasu pojedynczego kroku w analizie wariancji (ANOVA) wykazuje istotność w różnicach między grupami oraz w różnicach biegu między "Elita szybki" a "Sub-elita szybki". Podobny trend w swoich badaniach potwierdził Beck i wsp. (2018). Uważał on jednak, że zminimalizowanie asymetrii czasu pojedynczego kroku, a tym

samym poprawy efektywności biegu (zwiększenie prędkości) związane jest ze zmniejszeniem kosztów metabolicznych realizowanego wysiłku. Może to obejmować ukierunkowane interwencje treningowe mające na celu zrównoważenie siły mięśni i poprawę kontroli nerwowo-mięśniowej w celu uzyskania bardziej symetrycznych wzorców kroku sprinterskiego, ściślej mówiąc, optymalizacji techniki biegu sprinterskiego.

Indeksy symetrii prędkości kroku nie wykazała statystycznie istotnych różnic, umiarkowane efekty sugerują, że zawodnicy elity mają bardziej symetryczną prędkość kroku, co przekłada się na ich lepszą wydolność w fazie prędkości maksymalnej (Miyashiro i wsp. 2019). Zastosowana analiza regresji krokowej wstecznej wykazała, że asymetria prędkości kroku ma negatywny wpływ na czas w przypadku sub-elity w biegu wolnym. Podobnie jak większość poprzednio cytowanych autorów, tak również ten trend w swoich badaniach wykazał Exell i wsp. (2015). Twierdzi on, że asymetria prędkości wykonania kroku poprzez zmniejszenie swojej wartości, zdecydowanie może poprawić skuteczność biegu. Poprawa skuteczności biegu w tym wypadku musi przebiegać w symetrycznej zależności wykorzystania potencjału motorycznego do umiejętności technicznych.

Podobnie jak w poprzednim podrozdziale, dla lepszego zrozumienia analizowanego problemu przeprowadzono analizę profilową PAM. Dotyczy ona wybranych indeksów symetrii parametrów kinematycznych dla obu badanych grup sprinterów. W przypadku biegu wolnego na 30 metrów (prędkość maksymalna), wskazuje brak istotnych różnic w równoległości profili oraz istotne różnice w poziomie i płaskości wskazują na znaczącą zmienność w wartościach asymetrii parametrów kinematycznych między grupami. Wysokiej klasy sprinterzy mogą wykazywać wyższe umiejętności biegu na maksymalnych intensywnościach (wysokie wartości prędkości maksymalnej), co wykazują różnice w poziomie profili. Zgodnie z twierdzeniem Morina i wsp. (2012) zdolność do utrzymania symetrii ruchu na dystansie uzależniona jest od poziomu techniki sprintu. Jest to twierdzenie zbieżne do wyników uzyskanych ww. pracy. W przypadku biegu szybkiego na 30 metrów wyniki sugerują, że ogólne wzorce asymetrii parametrów kinematycznych są podobne między grupami. Różnice w płaskości profili mogą wskazywać na zmienność symetrii kinematycznej struktury pojedynczego kroku w różnych fazach biegu, w tym fazy prędkości maksymalnej. Wiadomym jest, że faza ta jest kluczowa w uzyskaniu jak najlepszych wyników w sprincie, jakkolwiek obwarowana ona jest długością bieganego odcinka. Wyniki

w. analizy, jak również przeglądu cytowanych badań innych autorów wskazują, że przebieg zmian parametrów kinematycznych zmienia się w zależności od długości sprintu np. na 50 metrów, 60 metrów czy 100 metrów. Bliskość istotności interakcji między grupami sugeruje, że różnice te mogą być bardziej wyraźne przy dalszej analizie. Thomson (2017) w swoich badaniach wykazał, że elitarni sprinterzy mogą utrzymać symetryczne i zoptymalizowane wzorce ruchowe przy maksymalnych prędkościach, co ma kluczowe znaczenie dla ich wyników w biegach na krótkich dystansach. Ta zdolność do utrzymania spójności w biomechanice jest kluczowym czynnikiem w osiągnięciu wyników na najwyższym poziomie w sprincie.

V 2. Podsumowanie

Skupiając się tylko na analizie tych dwóch faz, można być niemal pewnym, że trend w ocenie kinematycznego potencjału oraz asymetrii funkcjonalnej obu grup sprinterów (elita i sub-elita) zostanie zachowany, gdy analizie podda się cały 50 m odcinek. Sprinterzy z grupy elita w porównaniu do grupy sub-elita, osiągają znacznie wyższe wartości w podstawowych parametrach kinematycznych i również mniejsze wartości asymetrii. Parametry te decydują o uzyskaniu najwyższego na danym etapie treningowym potencjału szybkościowego. Odnosi się to do częstotliwości kroków, czasu kontaktu z podłożem oraz większej prędkości pozwalającej na wykonanie pojedynczego kroku. Nie wydaje się to być zaskoczeniem, ponieważ dotychczasowe badania Tellez i wsp. (1984), Cronin i wsp. (1996), Mackala i wsp. 2015b, Standing i wsp. (2017) wskazują na taki trend. Sugerują wręcz, że poprawa i optymalizacja treningu sprinterskiego powinna koncentrować się na poprawie właśnie tych parametrów oraz poprawy asymetrii funkcjonalnej. Kluczowym elementem w tej poprawie będzie niewątpliwie rozwój siły/mocy i optymalne połączenie ich za pośrednictwem kompleksowej biomechaniki (kinetyka, kinematyka, EMG) w realizacji skutecznej techniki biegu/sprintu. Ponadto, zrozumienie różnic w technice biegowej pomiędzy elitą a sub-elitą może pomóc trenerom w opracowywaniu bardziej ukierunkowanych programów treningowych, które wspierają rozwój młodych sprinterów w kierunku osiągnięcia poziomu elity.

V 3. Ograniczenia

W badaniu użyto startu z pozycji wysokiej, która bardziej odpowiada zadaniom treningowym w kształtowaniu szybkości, zamiast tradycyjnego startu z bloków. Start z bloków angażuje inne grupy mięśniowe oraz dynamikę ruchu w porównaniu do startu z pozycji wysokiej. Te różnice mogą wpłynąć na pomiar asymetrii funkcjonalnej, ponieważ sprinterzy mogą wykazywać inne wzorce ruchowe i asymetrie w obu sytuacjach. Wyniki uzyskane w badaniu mogą więc nie odzwierciedlać rzeczywistej asymetrii funkcjonalnej podczas zawodów, gdzie start z bloków jest standardem.

Zawodnicy rozpoczynali bieg w dowolnym momencie, co eliminowało pomiar czasu reakcji na bodziec startowy. W sprincie czas reakcji na bodziec startowy jest kluczowy i może wpływać na dynamikę całego biegu. Brak uwzględnienia tego czynnika może prowadzić do zniekształcenia wyników pomiarów asymetrii, gdyż zawodnicy mogą startować w bardziej komfortowym dla siebie momencie, co nie odzwierciedla warunków zawodów.

Sprzęt pomiarowy wystarczył jedynie na dystans 50 metrów. Sprinty zazwyczaj odbywają się na dystansie 60 metrów lub więcej, co oznacza, że pełne rozwinięcie szybkości i asymetrii funkcjonalnej może nie być w pełni obserwowane na krótszym odcinku. Na dystansie 50 metrów sprinterzy mogą jeszcze nie osiągnąć maksymalnej prędkości, a ich wzorce ruchowe mogą różnić się od tych na dłuższych dystansach. To ograniczenie może prowadzić do niepełnych lub nieadekwatnych danych dotyczących asymetrii, aczkolwiek bieg na 50 metrów z pozycji wysokiej jest bardzo często stosowany na treningach jako środek kształtowania szybkości. Zawodnicy startujący z pozycji wysokiej dzięki temu mogą osiągnąć prędkość maksymalną zdecydowanie wcześniej aniżeli ze startu z bloków.

W badaniu zmierzono jedynie masę, wysokość ciała i BMI, bez pomiarów siły kończyn dolnych, które mogłyby wytłumaczyć asymetrię. Pomiar siły kończyn dolnych jest kluczowy dla zrozumienia asymetrii funkcjonalnej, ponieważ różnice w sile mogą wpływać na efektywność i technikę biegu. Brak tych danych ogranicza możliwości interpretacji wyników i identyfikacji potencjalnych przyczyn asymetrii. Dodatkowo, obszerniejsze pomiary antropometryczne, takie jak długość kończyn czy obwody mięśniowe mogłyby dostarczyć bardziej kompleksowego obrazu fizycznych uwarunkowań asymetrii.

VI WNIOSKI – PRAKTYCZNA APLIKACJA

Przeprowadzone badania oraz obszerna analiza wyników, poprzez zaawansowane metody statystyczne, pozwoliły wyciągnąć z eksperymentu następujące wnioski:

1. Asymetria funkcjonalna (kinematyczna) kończyn dolnych występuje w biegu i ma istotny wpływ na wyniki w sprincie. Badania pokazują, że zawodnicy z grupy elity, którzy osiągają lepsze czasy, wykazują mniejszą asymetrię w kluczowych parametrach kinematycznych. Szczególnie dotyczy to długości kroku, częstotliwość kroku oraz czas kontaktu z podłożem. Większa symetria tych parametrów sprzyja lepszym wynikom w biegu na 50 metrów.
2. Podział biegu sprinterskiego na 50 metrów z podziałem na poszczególne fazy różnicują poszczególne parametry kinematyczne pod względem symetrii i asymetrii. W fazie przyspieszenia (pierwsze 20 metrów) mniejsza asymetria długości kroku i częstotliwości kroku koreluje z lepszymi wynikami. W fazie prędkości maksymalnej (ostatnie 30 metrów) kluczowa jest symetria częstotliwości kroku.
3. Poziom sportowy, poza wynikiem wpływa na współczynnik symetrii i asymetrii parametrów kinematycznych kroku sprinterskiego wykonanego z maksymalną intensywnością. Zawodnicy elity wykazują mniejszą asymetrię w porównaniu do zawodników sub-elity. Różnice te są widoczne w takich parametrach jak długość kroku, częstotliwość kroku i czas kontaktu, co wskazuje, że wyższy poziom sportowy jest związany z bardziej zoptymalizowaną techniką biegu.
4. Wraz ze wzrostem prędkości biegu zmienia się wartość symetrii i asymetrii funkcjonalnej parametrów kinematycznych w biegach sprinterskich. Analiza wykazała, że w fazie przyspieszenia symetria długości kroku i czasu kontaktu jest kluczowa, natomiast w fazie prędkości maksymalnej szczególną rolę odgrywa symetria częstotliwości kroku. Zawodnicy, którzy są w stanie utrzymać większą symetrię przy wyższych prędkościach, osiągają lepsze wyniki.

Istotnym elementem oceny skuteczności programu treningowego w biegach krótkich powinna być całoroczna kompleksowa analiza parametrów kinematycznych biegu z uwzględnieniem indeksów symetrii lub asymetrii. W związku z tym, praktyczna aplikacja w procesie treningowym, której celem będzie zmniejszenie asymetrii funkcjonalnej (kinematycznej) w biegach krótkich powinna zakładać:

1. Trening ukierunkowany na symetrię: trenerzy powinni koncentrować się na ćwiczeniach mających na celu poprawę symetrii parametrów kinematycznych, szczególnie długości kroku, częstotliwości kroku i czasu kontaktu z podłożem. Programy treningowe mogą obejmować ćwiczenia wzmacniające stabilność mięśniową oraz techniki biomechaniczne, które promują bardziej symetryczne wzorce ruchowe.
2. Specyficzne fazy treningu: trening sprinterów powinien być dostosowany do specyficznych wymagań różnych faz biegu. W fazie przyspieszenia należy skupić się na symetrii długości kroku i czasu kontaktu, podczas gdy w fazie prędkości maksymalnej ważna jest symetria częstotliwości kroku.
3. Monitorowanie i analiza kinematyczna: regularne monitorowanie i analiza kinematyczna mogą pomóc w identyfikacji asymetrii i dostosowaniu programów treningowych w celu jej minimalizacji. Użycie zaawansowanych narzędzi do analizy ruchu może dostarczyć dokładnych danych, które wspierają optymalizację techniki biegu.
4. Indywidualizacja treningu: trening powinien być zindywidualizowany w zależności od poziomu zaawansowania zawodnika. Zawodnicy sub-elity mogą skorzystać z bardziej intensywnych ćwiczeń korygujących asymetrię, podczas gdy zawodnicy elity mogą wymagać bardziej zaawansowanych technik biomechanicznych, aby doskonalić już osiągniętą symetrię.

VII LITERATURA

1. Ae M., Ito A., Suzuki M. The men's 100 meters. Scientific Research Project at the III World Championship in Athletics, Tokyo 1991, „New Studies in Athletics”, 7, 47–52, 1992.
2. Ae, M. (2017). Sprint Running: Running at Maximum Speed. In: Müller, B., et al. Handbook of Human Motion. Springer, Cham.
3. Alcaraz, P.E., Carlos-Vivas, J., Oponjuru, B.O. et al. The Effectiveness of Resisted Sled Training (RST) for Sprint Performance: A Systematic Review and Meta-analysis. *Sports Med* 48, 2143–2165 (2018).
4. Aliosmanoğlu B, Köçkar Ç. Üniversite Öğrencilerinde El Tercihinin ve Dominant Gözün Bazı Hastalıklar ile İlişkisi (The Relationship of Hand Dominance and Dominant Eye to Some Diseases of University Students). *Eur J Basic Med Sci*, 2014;4(3), 53-57.
5. Amusa, L. O., & Toriola, A. L (2003) Leg power and physical performance measures of top national track athletes. *Journal of Exercise Science and Fitness*, 1(1), 61-67.
6. Ariani, L. P. T., "The effect of repetition sprint training method combined with the level of physical fitness toward the speed of 100-meter run." *International Journal of Engineering, Science and Information Technology* 1.3 (2021): 59-63.
7. Asllani, I (2016). Atletika (Athletics. In Albanian). Tetovë
8. Babić V., Coh M., Dizdar D. Differences in kinematics parameters of athletes of different running quality. *Biol. Sport*. 2011; 28:15–121.
9. Bafirman, “Pembentukan Kondisi Fisik,” Padang; Wineka Media. 2008, pp, 83-95
10. Bailey C, Sato K, Alexander R, Chiang C.-Y, and Stone M. Isometric force production symmetry and jumping performance in collegiate athletes. *J Train* 2: 1-5, 2013.
11. Barany, M. ATPase activity of myosin correlated with speed of muscle shortening. *J. Gen. Physiol.* 50: 197–218, 1967.
12. Bayliss A.J., Weatherholt A.M., Crandall T.T., Farmer D.L., McConnell J.C., Crossley K.M., Warden S.J. Achilles Tendon Material Properties are Greater in the

- Jump Leg of Jumping Athletes. *J. Musculoskelet. Neuronal. Interact.* 2016; 16:105–112.
13. Beck, O.N., Azua, E.N. & Grabowski, A.M. Step time asymmetry increases metabolic energy expenditure during running. *Eur J Appl Physiol* 118, 2147–2154 (2018).
 14. Bell D, Sanfilippo J, Bikley N, and Heiderscheit B. Lean mass asymmetry influences force and power asymmetry during jumping in collegiate level athletes. *J Strength Cond Res* 28: 884–891, 2014.
 15. Bezodis I.N., Salo A.I.T., Kerwin D.G. A longitudinal case study of step characteristics in a world class sprint athlete. In: Kwon Y.H., J. Shim J., Shim J.K., Shin I.S., editors. *Proceedings of the XXVI International Conference on Biomechanics in Sports*. Rainbow Books; Seoul, Korea: 2008. pp. 537–540.
 16. Bezodis I. Investigations of the step length-step frequency relationship in sprinting: Applied implications for performance; *Proceedings of the XXX International Conference on Biomechanics in Sports*; Melbourne, Australia. 2–6 July 2012; pp. 43–49.
 17. Bezodis, N.E., Willwacher, S. & Salo, A.I.T. The Biomechanics of the Track and Field Sprint Start: A Narrative Review. *Sports Med* 49, 1345–1364 (2019)
 18. Bellotti, P., *New Studies in Athletics*, 2 (1991)
 19. Bini RR, Hume PA. Relationship between pedal force asymmetry and performance in cycling time trial. *J Sports Med Phys Fitness*. 2015; 55(9), 892-898.
 20. Bishop C, Read P, Lake J, Chavda S, and Turner A. Interlimb asymmetries: Understanding how to calculate differences from bilateral and unilateral tests. *Strength Cond J* 40: 1-6, 2018.
 21. Bissas, A., i wsp. "Asymmetry in sprinting: an insight into sub-10 and sub-11 s men and women sprinters." *Scandinavian Journal of Medicine & Science in Sports* 32.1 (2022): 69-82.
 22. Blauburger P, Horsch A, Lames M. Detection of Ground Contact Times with Inertial Sensors in Elite 100-m Sprints under Competitive Field Conditions. *Sensors*. 2021; 21(21):7331.

23. Bodine, S. C., R. R. Roy, D. A. Meadows, R. F. Zernicke, R. D. Sacks, M. Fournier, and V. R. Edgerton. Architectural, histochemical, and contractile characteristics of a unique biarticular muscle: the cat semitendinosus. *J. Neurophysiol.* 48: 192–201, 1982.
24. Brown LE, Whitehurst M. Load range. In: *Isokinetics in Human Performance*. Brown, LE, ed. Human Kinetics. 2000:114.
25. Brown L., Ferrigno V., Sanatana C (2000). *Training for speed, agility and quickness*. Champaign IL: Human Kinetics.
26. Bruggemann, G. P., B. Glad, *New Studies in Athletics, Suppl* (1990).
27. Brughelli M, Cronin J, Chaouachi A. Effects of running velocity on running kinetics and kinematics. *J Strength Cond Res.* 2011 Apr;25(4):933-9.
28. Burkett LN. Causative factors in hamstring strains. *Med Sci Sports Exerc.* 1970; 2(1), 39-42.
29. Carpes, FP, Rossato, M, Faria, IE, and Bolli Mota, C. Bilateral pedaling asymmetry during a simulated 40-km cycling time trial. *J Sports Med Phys Fitness* 47: 51–57, 2007
30. Chatzilazaridis I., Panoutsakopoulos V., Papaiakevou G.I. Stride characteristics progress in a 40-M sprinting test executed by male preadolescent, adolescent and adult athletes. *Biol. Exerc.* 2012; 8:59–77.
31. Cheatham, M.E., Boobis, L.H., Brooks, S. and Williams, C., *Human Muscle Metabolism During Sprint Running*, *Journal of Applied Physiology*, 1986, 61(1), 54-60.
32. Ciacci S, Di Michele R, Merni F. Kinematic Analysis of the Braking and Propulsion Phases during the Support Time in Sprint Running. *Gait Posture* 2010; 31: 209–12
33. Cissik, J. M (2002). *Technique and speed development for running*. NSCA's Performance Training Journal, 1(8), 18-21.
34. Coh M., Skof B., Kugovnik O., Dolenc A. Kinematic-Dynamic Model of Maximal Speed of Young Sprinters; *Proceedings of the XII International Symposium on Biomechanics in Sports; Budapest, Hungary. 2–6 July 1994.*
35. Coh, M.; Bačić, V.; Mackala, K. Biomechanical, neuromuscular and methodical aspects of running speed development. *J. Hum. Kinet.* 2010, 26, 73–81.

36. Coh, M., Bosnjak, G (2010). Neuro-misicne karakteristike maksimalne sprinterske brzine. [Neuro-muscular characteristics of maximal sprinting speed. In Slovenian]. *Sport Logia*, 6 (1), 28-35
37. Čoh M, Peharec S, Bačić P, Mackala K. Biomechanical Differences in the Sprint Start Between Faster and Slower High-Level Sprinters. *J Hum Kinet*. 2017 Mar 12; 56:29-38.
38. Coratella G, Beato M, Schena F. Correlation between quadriceps and hamstrings inter-limb strength asymmetry with change of direction and sprint in U21 elite soccerplayers. *Hum Mov Sci*. 2018; 59, 81-87.
39. Costill, D.L., Daniels, J., Evans, W., Fink, W., Krahenbuhl, G. and Saltin, B., Skeletal Muscle Enzymes and Fiber Composition in Male and Female Track Athletes, *Journal of Applied Physiology*, 1976, 40, 149-54.
40. Cronin, J.B, Hansen, K.T (2005). Strength and Power Predictors of Sports Speed. *Journal of Strength and Conditioning Research*, 19(2), 349-357.
41. Cronin, J, Hansen, KT. Resisted sprint training for the acceleration phase of sprinting. *J Strength Cond Res* 28: 42–51, 2006.
42. Delecluse, CH, Van Coppennolle, H, Willems, E, Diels, R, Goris, M, Van Leemputte, M, i Vuylsteke, M. Analysis of 100 meter sprint performance as a multi-dimensional skill. *Hum Mov Sci* 28: 87–101, 1995.
43. Delecluse, C., *Sport Medicine*, 24 (1997) 147
44. D'Hondt J., Chapelle L., Bishop C. et al. Association between inter-limb asymmetry and endurance running performance in healthy populations: A systematic review, 10 January 2024, PREPRINT (Version 1) available at Research Square
45. Exell, T. (2010). Lower-limb biomechanical asymmetry in maximal velocity sprint running (Doctoral dissertation, Cardiff Metropolitan University).
46. Exell TA, Irwin G, Gittoes MJR, Kerwin DG. Implications of Intra-Limb Variability on Asymmetry Analyses. *J Sports Sci* 2012: 30: 403–9.
47. Exell TA, Gittoes MJR, Irwin G, Kerwin DG. Considerations of Force Plate Transitions on Centre of Pressure Calculation for Maximal Velocity Sprint Running. *Sport Biomech* 540 2012: 11: 532–41.

48. Exell T, Gittoes M, Irwin G, Kerwin D. Asymmetry in sprint running: strength and performance interactions 33rd International Conference on Biomechanics in Sports, Poitiers, France, June 29 - July 3, 2015 Floren Colloud, Mathieu Domalain & Tony Monnet (Editors) Muscle-Skeleton-Mechanics
49. Exell T, Irwin G, Gittoes M, Kerwin D. Strength and performance asymmetry during maximal velocity sprint running. *Scand J Med Sci Sports*. 2017;27:1273–1282.
50. Faul F, Erdfelder E, Lang AG, Buchner A. G*Power 3: A flexible statistical power analysis program for the social, behavioral, and biomedical sciences. *Behav Res Methods*.2007; 39, 175-191.
51. Gajer B., Thepaut-Mathieu C., Lehenaff D. Evolution of stride and amplitude during course of the 100 m event in athletics. „New Studies in Athletics”, 3, 43–50, 1999.
52. Geyer, H., Seyfarth, A. and Blickhan, R., Compliant Leg Behavior Explains Basic Dynamics of Walking and Running, *Proceedings of the Royal Society B*, 2006, 273, 2861-2867.
53. Girard, O., Brocherie, F., Morin, J. B., & Millet, G. P (2017). Lower limb mechanical asymmetry during repeated treadmill sprints. *Human movement science*, 52, 203-214.
54. Guiard, Y. Asymmetric division of labor in human skilled bimanual action: The kinematic chain as a model. *J Mot Behav* 19: 486–517, 1987.
55. Gollnick, P. D., Armstrong, R. B., Saubert IV, C. W., Piehl, K., & Saltin, B (1972). Enzyme activity and fiber composition in skeletal muscle of intrained and trained men. *Journal of Applied Physiology*, 33, 312-319.
56. Gürses, V. V., Kamis, O (2018). The Relationship between Reaction Time and 60 m Performance in Elite Athletes. *Journal of Education and Training Studies*, 6(n12a), 64-69.
57. Hart N, Nimphius S, Spiteri T, and Newton R. Leg strength and lean mass symmetry influences kicking performance in Australian football. *J Sports Sci Med* 13: 157-165, 2014.
58. Haugen T, Danielsen J, McGhie D, Sandbakk Ø, Ettema G. Kinematic stride cycle asymmetry is not associated with sprint performance and injury prevalence in athletic sprinters. *Scand J Med Sci Sports*. 2018; 28:1001–1008

59. Haugen, T., McGhie, D., & Ettema, G. 2019. Sprint running: From fundamental mechanics to practice—A review. *European journal of applied physiology*, 119(6), 1273-1287
60. Haugen, T., Seiler, S., Sandbakk, Ø., & Tønnessen, E. 2019. The training and development of elite sprint performance: an integration of scientific and best practice literature. *Sports medicine-open*, 5(1), 44.
61. Hautier, C.A., Wouassi, D., Arsac, L.M., Relationships Between Postcompetition Blood Lactate Concentration and Average Running Velocity Over 100 m and 200 m Races, *European Journal of Applied Physiology*, 1994, 68, 508-513.
62. Hirvonen, J., Rehunen, S., Rusko, H., Breakdown of High-Energy Phosphate Compounds and Lactate Accumulation During Short Supramaximal Exercise, *European Journal of Applied Physiology*, 1987, 56, 253-259.
63. Homenkov L.S (1997), *Atletika (Athletics)*. In Serbian). Beograd: fakultet za fizicka kultura
64. Hopkins WG. Measures of reliability in sports medicine and science. *Sports Med.* 2000; 30, 1-15.
65. Hunter J.P., Marshall R.N., McNair P.J. Interaction of step length and step rate during sprint running. *Med. Sci. Sports Exerc.* 2004;36:261–271.
66. Hunter, JP, Marshall, RN, and McNair, P. Relationships between ground reaction force impulse and kinematics of sprint-running acceleration. *J Appl Biomech* 21: 31–43, 2005.
67. Ihsan Y. "Relationship of Explosive Muscle Limbs and Long Legs to 100-Meter Running Ability." 1st International Conference of Physical Education (ICPE 2019). Atlantis Press, 2020.
68. Inbar, O., Kaiser, P., & Tesch, P (1981). Relationships between leg muscle fiber type distribution and leg exercise performance. *International Journal of Sports Medicine*, 2, 154-159
69. Iseni A., Radic Z., Simeonov A. "Impact of specific-motor variables on the 100 meters sprint with students from 14 years." *Research in Physical Education, Sport & Health* 4.2 (2015).
70. Jamal, Busli, "Atletik Dasar," Padang; FIK. Universitas Negeri Padang. 2012.

71. Johnson MD, Buckley JG. Muscle Power Patterns in the Mid-Acceleration Phase of 566 Sprinting. *J Sports Sci* 2001; 19: 263–72
72. Jouste, P., Mero, A. 2016. 100 m juoksun lajiansalyysi ja valmennuksen ohjelmointi. In the book of Mero, A., Nummela, A., Kalaja, S., Häkkinen, K. 2016. *Huippuurtuvalmennus*. First edition. Lahti. VK Kustannus Oy, 389-411
73. Kaçoğlu, Celil. "Relationship between lower extremity strength asymmetry and jump and sprint performance." *Turkish Journal of Sport and Exercise* 21.2 (2019): 204-210.
74. Kawamori, N, Nosaka, K, and Newton, RU. Relationships between ground reaction impulse and sprint acceleration performance in team sport athletes. *J Strength Cond Res* 27: 568–573, 2013.
75. Komi, P. V., Viitasalo, J. T., Havu, M., Thorstensson, A., Sjödin, B., Karlsson, J (1977). Skeletal muscle fibers and muscle enzyme activities in monozygous and dizygous twins of both sexes. *Acta Physiological Scandinavica*, 100, 385-392
76. Ličen, Urška, and Žiga Kozinc. "The influence of inter-limb asymmetries in muscle strength and power on athletic performance: a review." *Montenegrin Journal of Sports Science & Medicine* 12.1 (2023).
77. Lockie R., Murphy A., Schultz A., Jeffriess M., Callaghan S (2013) Influence of sprint acceleration stance kinetics on velocity and step kinematics in field sport athletes. *Journal of Strength and Conditioning Research* 27(9), 2494-2503.
78. Loturco, I., et al. "Transference of traditional versus complex strength and power training to sprint performance." *Journal of human kinetics* 41 (2014): 265.
79. Luk HY, Winter C, O'Neill E, Thompson BA. Comparison of muscle strength imbalance in powerlifters and jumpers. *J Strength Cond Res* 28(1): 23-27, 2014.
80. Mackała K., Fostiak M. Acute effects of plyometric intervention—Performance improvement and related changes in sprinting gait variability. *J. Strength Cond. Res.* 2015; 29:1956–1965
81. Maćkała K., Fostiak M., Kowalski K (2015) Selected determinants of acceleration in the 100 m sprint. *Journal of Human Kinetics* 45(1), 135-148.
82. Maćkała K., Kowalski P. *Trening biegów krótkich: założenia teoretyczne i implikacje praktyczne*. Wydawnictwo AWF Wrocław, 2007.

83. Mackala K., Mero A.A. Kinematic analysis of three best 100 m performance ever. *J. Hum. Kinet.* 2013; 36:149–160.
84. Maćkała K., Michalski R., Čoh M., Asymmetry of step length in relationship to leg strength in 200 meters sprint of different performance levels. *Journal of Human Kinetics* volume 25 2010, 101-108
85. Mackala K, Fostiak M, Schweyen B, Osik T, Coch M. Acute Effects of a Speed Training Program on Sprinting Step Kinematics and Performance. *International Journal of Environmental Research and Public Health.* 2019; 16(17):3138.
86. Majumdar, Aditi S., Robert A. Robergs. "The science of speed: Determinants of performance in the 100 m sprint." *International Journal of Sports Science & Coaching* 6.3 (2011): 479-493.
87. Maloney S, Richards J, Nixon D, Harvey L, and Fletcher I. Do stiffness and asymmetries predict change of direction performance? *J Sports Sci* 35: 547-556, 2017.
88. Mann, R (2007). *The Mechanics of Sprinting and Hurdling*. Las Vegas, NV
89. Markovic G. i wsp. "Effects of sprint and plyometric training on muscle function and athletic performance." *The Journal of Strength & Conditioning Research* 21.2 (2007): 543-549.
90. Mero, A., Luhtanen, P., Viitasalo, T., & Komi, P. V (1981). Relationships between maximal running velocity, muscle fiber characteristics, force production and force relaxation of sprinters. *Scandinavian Journal of Sport Science*, 3, 16-22
91. Mero, A., Komi, P.V., Gregor, R. 1992. Biomechanics of sprint running. *Sports Medicine*, 13(6); 376–392
92. Meyers RW, Oliver JL, Hughes MG, Lloyd RS, Cronin JB. Asymmetry during maximal sprint performance in 11- to 16- year-old boys. *Pediatr Exerc Sci.* 2017; 29(1), 94-102.
93. Miyashiro K, Nagahara R, Yamamoto K, Nishijima T. Kinematics of Maximal Speed Sprinting With Different Running Speed, Leg Length, and Step Characteristics. *Front Sports Act Living.* 2019 Sep 26;1:37.

94. Morin J., Bourdin M., Edouard P., Peyrot N., Samozino P., Lacour J (2012) Mechanical determinants of 100-m sprint running performance. *European Journal of Applied Physiology* 112, 3921-3930.
95. Morin J., Slawinski J., Dorel S., Saez de villareal E., Couturier A., Samozino P., Brughelli M., Rabita G., Acceleration capability in elite sprinters and ground impulse: Push more, brake less?, *Journal of Biomechanics*, Volume 48, Issue 12, 2015, Pages 3149-3154,
96. Muller, H., H. Hommel, *New Studies in Athletics*, (1997)
97. Murphy A., Lockie R., Coutts A (2003). Kinematic determinants of early acceleration in field sport athletes. *Journal of Sports Science and Medicine* 2, 144-150.
98. Nagahara R., Matsubayashi T., Matsuo A., Zushi K.; Kinematics of transition during human accelerated sprinting. *Biol Open* 15 August 2014; 3 (8): 689–699
99. Newton, R.U., W.J. Kraemer (1994). Developing explosive muscular power: implications for a mixed method training strategy. *Strength Cond.* 16(5):20-31.
100. Novacheck, Tom F. "The biomechanics of running." *Gait & posture* 7.1 (1998): 77-95.
101. Nummela, A.; Keranen, T.; Mikkelsen, L. Factors related to top running speed and economy. *Int. J. Sports Med.* 2007, 28, 655–661.
102. Qaili, E., Iseni, A (2020). Impact of training program for the development of explosive force on some specific-motor skills in 14 years old students. *Research in Kinesiology*, 48(1), 8-12.
103. Paradisis GP, Bissas A, Pappas P, Zacharogiannis E, Theodorou A, Girard O. Sprint mechanical differences at maximal running speed: Effects of performance level. *J Sports Sci.* 2019 Sep;37(17):2026-2036.
104. Pavlović, R (2006). *Athletics-anthropological characteristics*. University East Sarajevo: Faculty of Physical Education
105. Petrakos G., Morin J., Egan B (2016) Resisted sled sprint training to improve sprint performance: A systematic review. *Sports Medicine* (46)3, 381-400.

106. Pietraszewski, P., Gołaś, A., Matusiński, A., Mrzygłód, S., Mostowik, A., & Maszczyk, A (2020). Muscle activity asymmetry of the lower limbs during sprinting in elite soccer players. *Journal of Human Kinetics*, 75(1), 239-245.
107. Prampero, P.E., Fusi, S., Sepulcri, L., Morin, J.B. and Antonutto, G., Sprint Running: A New Energetic Approach, *The Journal of Experimental Biology*, 2005, 208, 2809-2816.
108. Radić Z., Simeonov A (2009). Влијанието на некои морфолошки и моторни фактори врз резултатот во трчањето на 100 метри. *Физичка култура (Скопје)*, Год 37, Бр.2, стр. 158-160
109. Rocheford, E.C, DeVoe, D.E. & Reiser, R.F (2006). Effect of previous unilateral injuries on ground reaction force bilateral asymmetries during static lifting and standing. *J Hum Mov Stud* 51: 403–424
110. Ross, A., Leveritt, M. and Riek, S., Neural Influences on Sprint Running: Training Adaptations and Acute Response, *Sports Medicine*, 2001, 31(6), 409-425.
111. Sacks, R. D., and R. R. Roy. Architecture of the hind limb of muscle of cats: functional significance. *J. Morphol.* 173: 185–195, 1982.
112. Salo A., Bezodis I.N., Batterham A.M., Kerwin D.G. Elite sprinting: Are athletes individually step-frequency or step-length reliant? *Med. Sci. Sports Exerc.* 2011; 43:1055–1062.
113. Selim, A. S. A. N. " Investigation of the relationship between lower extremity balance asymmetry and acceleration, speed and agility performance in healthy individuals." *International Journal of Education Technology and Scientific Research* 8.23 (2023): 1329-1354.
114. Shen W. The effects of stride length and frequency on the speeds of elite sprinters in 100 meter dash, *Biomechanical Proceedings of XVIII International Symposium of Biomechanics in Sports, Hong-Kong*, 333-336 2000.
115. Schluter, J. M., R. H. Fitts. Shortening velocity and ATPase activity of rat skeletal muscle fibers: effects of endurance exercise training. *Am. J. Physiol. Cell Physiol.* 266: C1699–C1713, 1994
116. Segers V., Lenoir M., Aerts P., De Clercq D. Kinematics of the transition between walking and running when gradually changing speed. *Gait Posture*. 2007;26:349–361.

117. Seiler S, De Koning JJ, Foster C. The fall and rise of the gender difference in elite anaerobic performance 1952-2006. *Med Sci Sports Exerc.* 2007;39(3):534–40.
118. Smirniotou, A.; Katsikas, C.; Paradisis, G.; Argeitaki, P.; Zacharogiannis, E.; Tziortzis, S. Strength-power parameters as predictors of sprinting performance. *J. Sport. Med. Phys. Fit.* 2008, 48, 447.
119. Smajlovic, N., Kozicc, V (2006). Effects of changes in athletic policies at a time starting reaction in sprint events. *Homo Sporticus*, 9(2), 21-27.
120. Spector, S. A., P. F. Gardiner, R. F. Zernicke, R. R. Roy, and V. R. Edgerton. Muscle architecture and the force-velocity characteristics of cat soleus and medial gastrocnemius: implications for motor control. *J. Neurophysiol.* 44: 951–960, 1980.
121. Standing RJ, Maulder PS. The Biomechanics of Standing Start and Initial Acceleration: Reliability of the Key Determining Kinematics. *J Sports Sci Med.* 2017 Mar 1;16(1):154-162.
122. Sugisaki, N., Kanehisa, H., Tauchi, K., Okazaki, S., Iso, S., Okada, J (2011) The Relationship Between 30-m Sprint Running Time and Muscle Cross-sectional Areas of the Psoas Major and Lower Limb Muscle in Male College Short and Middle Distance Runners. *International Journal of Sport and Health Science*, 9, 1-7.
123. Sunaryadi, Y. (2022) Identification of Step-Length and Step-Frequency : Determining Factors of 100m Sprinting Performance At Junior Level Athlete, *Jurnal Pendidikan Jasmani dan Olahraga, JPJO* 7 (2) 243-249.
124. Tatlıcioğlu, E., Atalağ, O., Kırmızıgil, B., Kurt, C., & Acar, M. F (2019). Side-to-side asymmetry in lower limb strength and hamstring-quadriceps strength ratio among collegiate American football players. *Journal of Physical Therapy Science*, 31(11), 884–888.
125. Taylor MJD, Beneke R. Spring mass characteristics of the fastest men on earth. *Sports Med.* 2012; 33:667–470.
126. Tellez, T., & Doolittle, D (1984). Sprinting from start to finish. *Track Technique*, 88, 2802-2805.
127. Thompson M. A., *Physiological and Biomechanical Mechanisms of Distance Specific Human Running Performance, Integrative and Comparative Biology*, Volume 57, Issue 2, August 2017,

128. Tomkinson, G.T, Popovic, N. & Martin, M (2003). Bilateral symmetry and the competitive standard attained in elite and sub-elite sport. *J Sport Sci* 21: 201–211.
129. Trivers R, Fink B, Russell M, McCarty K, James B, Palestis BG. Lower body symmetry and running performance in elite Jamaican track and field athletes. *PLoS One* 9(11): e113106, 2014.
130. Vagenas G, Hoshizaki B. Functional asymmetries and lateral dominance in the lower limbs of distance runners. *J Appl Biomech.* 1991; 7:311–329.
131. Vagenas G., Hoshizaki B..(1992). A multivariable analysis of lower extremity kinematic asymmetry in running. *Journal of Applied Biomechanics*, t.8, nr 1, pp. 11-29, 1992.
132. Van den Tillaar R, Nagahara R, Gleadhill S, Jiménez-Reyes P. Step-to-Step Kinematic Validation between an Inertial Measurement Unit (IMU) 3D System, a Combined Laser+IMU System and Force Plates during a 50 M Sprint in a Cohort of Sprinters. *Sensors.* 2021; 21(19):6560. <https://doi.org/10.3390/s21196560>
133. Van Praagh, E., Dore, E., Short-Term Muscle Power During Growth and Maturation, *Sports Medicine*, 2002, 32(11), 701-728.
134. Wdowski, Maximilian M., and Marianne JR Gittoes. "Inter-limb step asymmetry in closed and open skill sprint accelerations in soccer players." *Human Movement* 22.1 (2021): 1-8.
135. Weyand P., Sternlight D., Bellizzi M., Wright S (2000) Faster top running speeds are achieved with greater ground forces not more rapid leg movements. *Journal of Applied Physiology* 89(5), 1991-1999
136. Wilson C., Gittoes M., Heywood P. The effect of pace on stride characteristics and variability in sprint running; *Proceedings of the XXVI International Symposium of Biomechanics in Sports (ISBS)*; Seoul, Korea. 14–18 July 2008; pp. 456–459.
137. Willwacher S., Heinrich K., Goldman J., Braunstein B., Sanno M., Bruggemann G (2016) Determinants of acceleration performance in elite female sprinters. In: 34 *International Symposium on Biomechanics in Sports*, Tsukuba, Japan, July 18 – 22 1128-1131.

138. Woolford SM, Polglaze T, Rowsell G, Spencer M. Field testing principles and protocols. In: *Physiological Tests for Elite Athletes*. 2nd ed. Australian Institute of Sport. Tanner R, Gore C, eds. IL, USA: Human Kinetics; 2013: 237
139. Yoshioka, S., Nagano, A., Hay, D.C. & Fukashiro, S (2011). The effect of bilateral asymmetry of muscle strength on the height of a squat jump: a computer simulation study. *Journal of Sports Sciences*, 29(8), 867-877.
140. Young WB, James R, Montgomery I. Is muscle power related to running speed with changes of direction? *J Sports Med Phys Fitness*. 2002; 42(3), 282-288.
141. Yuk Y. Relationships between selected anthropometric measures of lower limbs and 60-meter sprinting performance in university students. 2011
142. Zahálka, F., Malý, T., Malá, L., Gryc, T., & Hráský, P (2013). Power assessment of lower limbs and strength asymmetry of soccer goalkeepers. *Acta Gymnica*, 43(2)
143. Zifchock RA, Davis I, Higginson J, Royer T. The symmetry angle: a novel, robust method of quantifying asymmetry. *Gait Posture*. 2008; 27:622–627.

STRESZCZENIE

Tytuł: Asymetria funkcjonalna w kształtowaniu szybkości maksymalnej w powtarzanych biegach sprinterskich

Słowa kluczowe: biegi sprinterskie, kinematyka, asymetria, szybkość

Celem pracy jest określenie na podstawie uzyskanych parametrów kinematycznych w biegu na dystansie 50 m występowania symetrii lub asymetrii funkcjonalnej (kinematycznej) i zbadanie jej wpływu na poszczególne fazy biegu oraz na wynik końcowy u zawodników na różnym poziomie sportowym. Dodatkowym aspektem jest porównanie występowania asymetrii i oddziaływania jej w stosunku do osiągniętej prędkości maksymalnej.

Interpretacja parametrów kinematycznych w oparciu o asymetrię kończyn dolnych wymagała odpowiedzi na następujące pytania badawcze:

1. Czy symetria lub asymetria funkcjonalna (kinematyczna) kończyn dolnych występuje w biegu oraz jak wpływa na wyniki w sprincie?
2. Czy fazy biegu sprinterskiego na 50 m różnicują poszczególne parametry kinematyczne pod względem symetrii i asymetrii?
3. Czy poziom sportowy poza wynikiem wpływa na symetrie lub asymetrie parametrów kinematycznych kroku sprinterskiego?
4. Czy wraz ze wzrostem prędkości maksymalnej biegu zmienia się wartość symetrii lub asymetrii funkcjonalnej parametrów kinematycznych w biegach sprinterskich?

Badania przeprowadzono z udziałem wyselekcjonowanej 18-osobowej grupy najlepszych polskich lekkoatletów w wieku seniorskim i juniorskim specjalizujących się w biegach sprinterskich, mających rekordy życiowe na dystansie 100 m na poziomie elity (seniorzy $\leq 10,40$) i sub-elity (juniorzy $\leq 11,10$ s). Badani zawodnicy to zawodnicy kadry Polski i medaliści imprez międzynarodowych oraz wielokrotni medaliści Mistrzostw Polski w biegach sprinterskich.

Przed eksperymentem każdy zawodnik przeszedł pomiary antropometryczne (wysokość i masa ciała). Każdy sprinter wykonał cztery biegi na 50 m, startując z pozycji wysokiej

z zakroku. Po każdym biegu zawodnicy mieli 5 minut przerwy. Do analizy wybrano najwolniejszy i najszybszy bieg z czterech. Na całej długości dystansu 50 m użyto urządzenia OptoJumpNEXT do pomiaru parametrów kinematycznych oraz fotokomórek WittyGate do pomiaru czasu na odcinkach 0-20 m i 0-50 m.

Do przeprowadzenia analizy statystycznej wyliczono wskaźnik symetrii (Symmetry Index) do zgromadzonych parametrów kinematycznych oraz użyto kilku zaawansowanych metod statystycznych, które pozwoliły na dokładne zbadanie danych oraz wyciągnięcie wniosków dotyczących badanych zmiennych. Wśród zastosowanych metod znalazły się: test t-Studenta dla prób niezależnych, jednowymiarowa analiza wariancji (ANOVA), testy post-hoc Bonferroniego, regresja krokowa wsteczna oraz analiza profilowa PAM.

Przeprowadzone badania oraz obszerna analiza wyników, poprzez zaawansowane metody statystyczne, pozwoliły wyciągnąć z eksperymentu następujące wnioski. Asymetria funkcjonalna biegu ma istotny wpływ na wyniki w sprincie. Badania pokazują, że zawodnicy z grupy elity, którzy osiągają lepsze wyniki, wykazują mniejszą asymetrię w kluczowych parametrach kinematycznych, takich jak długość kroku, częstotliwość kroku oraz czas kontaktu z podłożem. Większa symetria tych parametrów sprzyja lepszym wynikom w biegu na 50 metrów. Fazy biegu sprinterskiego na 50 metrów różnicują poszczególne parametry kinematyczne pod względem asymetrii. W fazie przyspieszenia (pierwsze 20 metrów) mniejsza asymetria długości kroku i częstotliwości kroku koreluje z lepszymi wynikami. W fazie prędkości maksymalnej (ostatnie 30 metrów) kluczowa jest symetria częstotliwości kroku. Poziom sportowy poza wynikiem wpływa na współczynnik asymetrii parametrów kinematycznych kroku sprinterskiego. Zawodnicy elity wykazują mniejszą asymetrię w porównaniu do zawodników sub-elity. Różnice te są widoczne w takich parametrach jak długość kroku, częstotliwość kroku i czas kontaktu, co wskazuje, że wyższy poziom sportowy jest związany z bardziej zoptymalizowaną techniką biegu. Wraz ze wzrostem prędkości biegu zmienia się wartość asymetrii funkcjonalnej parametrów kinematycznych w biegach sprinterskich. Analiza wykazała, że w fazie przyspieszenia symetria długości kroku i czasu kontaktu jest kluczowa, natomiast w fazie prędkości maksymalnej symetria częstotliwości kroku odgrywa istotną rolę. Zawodnicy, którzy są w stanie utrzymać większą symetrię przy wyższych prędkościach, osiągają lepsze wyniki.

ABSTRACT

Title: Functional asymmetry in the development of maximal speed in repeated sprint running

Keywords: sprint running, kinematics, asymmetry, speed

The purpose of this study is to determine, based on the obtained kinematic parameters in running at a distance of 50 m, the occurrence of symmetry or functional (kinematic) asymmetry and to study its impact on the various phases of running and on the final result in athletes at different sports levels. An additional aspect is to compare the occurrence of asymmetry and its impact on the maximum speed achieved.

The interpretation of kinematic parameters based on lower limb asymmetry required answering the following research questions:

1. Does symmetry or functional (kinematic) asymmetry of the lower limbs occur in running, and how does it affect sprint performance?
2. Do the phases of a 50-meter sprint run differentiate individual kinematic parameters in terms of symmetry and asymmetry?
3. Does the sport's level, in addition to the score, affect the symmetries or asymmetries of the kinematic parameters of the sprint stride?
4. Does the value of functional symmetry or asymmetry of kinematic parameters in sprint running change with the increase of maximum running speed?

The study was conducted with a selected 18-person group of the best Polish senior and junior athletes specializing in sprint running, having life records at 100 m at the elite (seniors ≤ 10.40) and sub-elite (juniors ≤ 11.10 s) levels. The tested athletes are Polish national team athletes medalists of international events and multiple medalists of the Polish Championships in sprint running. Before the experiment, each athlete underwent anthropometric measurements (height and body weight).

Each sprinter performed four 50-meter runs, starting from a high position at a bend. After each run, the athletes had a five-minute break. The slowest and fastest run of the four

was selected for analysis. An OptoJumpNEXT device was used to measure kinematic parameters over the entire 50 m distance, and WittyGate photocells were used to measure time over 0–20 m and 0–50 mm distances.

For statistical analysis, a symmetry index was calculated for the collected kinematic parameters, and several advanced statistical methods were used to thoroughly examine the data and draw conclusions about the variables studied. Among the methods used were the Student's t-test for independent samples, one-dimensional analysis of variance (ANOVA), Bonferroni post-hoc tests, backward stepwise regression, and PAM profile analysis.

The research conducted and the extensive analysis of the results through advanced statistical methods have led to significant findings. The functional asymmetry of running has a profound impact on sprint performance. The study reveals that elite athletes who perform better exhibit less asymmetry in key kinematic parameters such as stride length, stride frequency, and ground contact time. Greater symmetry in these parameters fosters better performance in the 50-meter run. The phases of a 50-meter sprint run differentiate individual kinematic parameters in terms of asymmetry. In the acceleration phase (the first 20 meters), lower stride length and frequency asymmetry correlate with better performance. Step frequency symmetry is crucial in the maximum speed phase (the last 30 meters). The athletes' performance level, in addition to the score, significantly influences the asymmetry coefficient of the kinematic parameters of the sprint stride. Elite athletes show less asymmetry compared to sub-elite athletes, a finding that underscores the impact of the athletes' skill level on the study's findings. The findings of this research have practical implications for coaches, sports scientists, and athletes. A higher athletic level is associated with a more optimized running technique. As running speed increases, the value of the functional asymmetry of kinematic parameters in sprint running changes. The analysis showed that the symmetry of stride length and contact time is crucial in the acceleration phase, while in the maximum speed phase, the symmetry of stride frequency plays an important role. Athletes who can maintain excellent symmetry at higher speeds perform better. These insights can be used to design training programs that focus on improving stride length and frequency symmetry, thereby enhancing sprint performance.

SPIS RYCIN

Rycina 1. Schemat rozstawienia urządzeń pomiarowych w trakcie biegu na 50 metrów ...22

SPIS TABEL

Tabela 1. Przydział do grup, dane antropometryczne badanych oraz ich rekordy życiowe na dystansie 60 m oraz 100 m.....	18
Tabela 2. Charakterystyka parametrów somatycznych i rekordów życiowych sprinterów z podziałem na: Elitę i sub-elitę, $p < 0.05$	25
Tabela 3. Charakterystyka parametrów kinematycznych najwolniejszego oraz najszybszego biegu na dystansie 50 m z podziałem na: Elitę i sub-elitę, $p < 0.05$	27
Tabela 4. Charakterystyka parametrów kinematycznych najwolniejszego oraz najszybszego biegu na dystansie 20 m (faza przyspieszenia startowego) z podziałem na: Elitę i sub-elitę, $p < 0.05$	29
Tabela 5. Charakterystyka parametrów kinematycznych najwolniejszego oraz najszybszego biegu na dystansie 30 m (faza prędkości maksymalnej) z podziałem na: Elitę i sub-elitę, $p < 0.05$	31
Tabela 6. Charakterystyka indeksu symetrii parametrów kinematycznych najwolniejszego oraz najszybszego biegu na dystansie 50 metrów z podziałem na: Elitę i sub-elitę, $p < 0.05$	33
Tabela 7. Charakterystyka indeksu symetrii parametrów kinematycznych najwolniejszego oraz najszybszego biegu na dystansie 20 metrów (przyspieszenia startowego) z podziałem na: Elitę i sub-elitę, $p < 0.05$	36
Tabela 8. Charakterystyka indeksu symetrii parametrów kinematycznych najwolniejszego oraz najszybszego biegu na dystansie 30 metrów (prędkości maksymalnej) z podziałem na: Elitę i sub-elitę, $p < 0.05$	39
Tabela 9. Wyniki analizy wariancji (ANOVA) dla indeksów symetrii parametrów kinematycznych w zależności od grupy i biegu oraz interakcji grupa x bieg w biegu na 20 metrów (przyspieszenia startowego), $p < 0.05$	41
Tabela 10. Wyniki testów post-hoc według Bonferroniego dla porównań parami indeksów symetrii parametrów kinematycznych w grupach elity i sub-elity w biegu na 20 metrów (przyspieszenia startowego), $p < 0.05$	42
Tabela 11. Wyniki analizy wariancji (ANOVA) dla indeksów symetrii parametrów kinematycznych w zależności od grupy i biegu oraz interakcji grupa x bieg w biegu na 30 metrów (prędkości maksymalnej), $p < 0.05$	42
Tabela 12. Wyniki testów post-hoc według Bonferroniego dla porównań parami indeksów symetrii parametrów kinematycznych w grupach elity i sub-elity w biegu na 30 metrów (prędkości maksymalnej), $p < 0.05$	43
Tabela 13. Wyniki regresji krokowej dotyczącej indeksów symetrii parametrów kinematycznych na dystansach 20 (przyspieszenia startowego) i 30 metrów (prędkości maksymalnej) dla elity i sub-elity, $p < 0.05$	45
Tabela 14. Analiza profilowa PAM indeksów symetrii parametrów kinematycznych dystansach 20 (przyspieszenia startowego) i 30 metrów (prędkości maksymalnej) dla Elity i Sub-elity, $p < 0.05$	47

SPIS WYKRESÓW

Wykres 1. Charakterystyka indeksu symetrii parametrów kinematycznych najwolniejszego oraz najszybszego biegu na dystansie 50 metrów dla Elity	34
Wykres 2. Charakterystyka indeksu symetrii parametrów kinematycznych najwolniejszego oraz najszybszego biegu na dystansie 50 metrów dla Sub-Elity	34
Wykres 3. Charakterystyka indeksu symetrii parametrów kinematycznych najwolniejszego oraz najszybszego biegu na dystansie 20 metrów (przyspieszenia startowego) dla Elity ...	37
Wykres 4. Charakterystyka indeksu symetrii parametrów kinematycznych najwolniejszego oraz najszybszego biegu na dystansie 20 metrów (przyspieszenia startowego) dla Sub-Elity	37
Wykres 5. Charakterystyka indeksu symetrii parametrów kinematycznych najwolniejszego oraz najszybszego biegu na dystansie 30 metrów (prędkości maksymalnej) dla Elity	40
Wykres 6. Charakterystyka indeksu symetrii parametrów kinematycznych najwolniejszego oraz najszybszego biegu na dystansie 30 metrów (prędkości maksymalnej) dla Sub-Elity	40
Wykres 7. Analiza profilowa PAM indeksów symetrii parametrów kinematycznych dla biegu wolnego 20 metrów (przyspieszenie startowe) dla Elity i Sub-elity	48
Wykres 8. Analiza profilowa PAM indeksów symetrii parametrów kinematycznych dla biegu szybkiego 20 metrów (przyspieszenie startowe) dla Elity i Sub-elity	48
Wykres 9. Analiza profilowa PAM indeksów symetrii parametrów kinematycznych dla biegu wolnego 30 metrów (prędkość maksymalna) dla Elity i Sub-elity	49
Wykres 10. Analiza profilowa PAM indeksów symetrii parametrów kinematycznych dla biegu szybkiego 30 metrów (prędkość maksymalna) dla Elity i Sub-elity	49