



Akademia Wychowania Fizycznego
im. Eugeniusza Piaseckiego w Poznaniu

mgr Damian Archacki

**Udział tlenowych i beztlenowych systemów energetycznych
w krótkotrwałym wysiłku o mocy maksymalnej
w zależności od specjalności sportowej i płci**

Rozprawa doktorska

Promotor:
prof. AWF dr hab. Krzysztof Kusy

Poznań 2025

*Mojej żonie,
bez której ten doktorat by nie powstał*

SPIS TREŚCI

DANE O KANDYDACIE	4
WYKAZ SKRÓTÓW	5
STRESZCZENIE.....	7
ABSTRACT.....	9
1. WSTĘP	11
2. CELE I HIPOTEZY	14
3. CYKL PUBLIKACJI.....	15
4. MATERIAŁ I METODY BADAWCZE	16
4.1. Uczestnicy badań.....	16
4.2. Projekt badań	16
4.3. Procedura pomiarowa	18
4.3.1. Analiza składu ciała.....	18
4.3.2. Test Wingate	18
4.3.3. Pobór tlenu oraz stężenie mleczanu	19
4.3.4. Obliczanie udziału systemów energetycznych	19
4.3.5. Analiza statystyczna.....	19
5. WYNIKI	21
5.1. Skład ciała, masa mięśni szkieletowych i wydolność tlenowa.....	21
5.2. Moc szczytowa i średnia	22
5.3. Różnice w udziale systemów energetycznych między grupami i terminami badań	24
5.4. Różnice w udziale systemów energetycznych między płciami.....	26
6. DYSKUSJA.....	29
6.1. Publikacja 1	29
6.2. Publikacja 2	32
7. WNIOSKI	34
8. IMPLIKACJE PRAKTYCZNE	35
9. PIŚMIENNICTWO	36
PODZIĘKOWANIA	43
ZAŁĄCZNIK 1. OŚWIADCZENIA	44
ZAŁĄCZNIK 2. PUBLIKACJE	55

DANE O KANDYDACIE

Data uzyskania tytułu magistra: 16.07.2019 r.

Nazwa jednostki organizacyjnej, w której nadany został tytuł: Wydział Wychowania Fizycznego, Sportu i Rehabilitacji Akademii Wychowania Fizycznego im. Eugeniusza Piaseckiego w Poznaniu.

Kandydat nie ubiegał się uprzednio o nadanie stopnia doktora.

WYKAZ SKRÓTÓW

ADP (ang. *adenosine diphosphate*) – adenozyndifosforan

Aerobic_{EE} (ang. *energy expenditure from aerobic system*) – wydatek energetyczny dla systemu tlenowego

ANOVA (ang. *analysis of variance*) – analiza wariancji

ATP (ang. *adenosine triphosphate*) – adenozynotrifosforan

ATP-PCr_{EE} (ang. *energy expenditure from phosphagen system*) – wydatek energetyczny dla systemu fosfagenowego

BF (ang. *body fat*) – zawartość tkanki tłuszczowej

BM (ang. *body mass*) – masa ciała

DXA (ang. *dual-energy X-ray absorptiometry*) – absorpcjometria promieniowania rentgenowskiego o podwójnej energii

E_{AER} (ang. *energy from aerobic system*) – energia z systemu tlenowego

E_{LA} (ang. *energy from glycolytic system*) – energia z systemu glikolitycznego

E_{PCR} (ang. *energy from phosphagen system*) – energia z systemu fosfagenowego

EPOC (ang. *excess post-exercise oxygen consumption*) – nadmiarowe zużycie tlenu po wysiłku

E_{TOT} (ang. *total energy expenditure*) – całkowity wydatek energetyczny

FI (ang. *fatigue index*) – wskaźnik zmęczenia

Glycolytic_{EE} (ang. *energy expenditure from glycolytic system*) – wydatek energetyczny dla systemu glikolitycznego

H-PP (ang. *high value of peak power output*) – wysoka moc szczytowa

H- $\dot{V}O_2$ max (ang. *high value of maximal oxygen uptake*) – wysoki pułap tlenowy

L-PP (ang. *low value of peak power output*) – niska moc szczytowa

L- $\dot{V}O_2$ max (ang. *low value of maximal oxygen uptake*) – niski pułap tlenowy

LA_{PEAK} (ang. *blood lactate concentration at peak*) – maksymalne stężenie mleczanu

LA_{REST} (ang. *blood lactate concentration at rest*) – stężenie mleczanu w spoczynku

LDH (ang. *lactate dehydrogenase*) – reakcja dehydrogenazy mleczanowej

LLM (ang. *leg lean mass*) – masa ciała szczupłego kończyn dolnych

MANOVA (ang. *multivariate analysis of variance*) – wielowymiarowa analiza wariancji

MP (ang. *mean power*) – moc średnia

PCr (ang. *phosphocreatine*) – fosfokreatyna

PCr-LA-O₂ (ang. *phosphocreatine-lactate-oxygen*) – trójkomponentowa metoda wyznaczania udziału systemów energetycznych

PFK (ang. *phosphofructokinase*) – reakcja fosfofruktokinazowa

PP (ang. *peak power*) – moc szczytowa

RER (ang. *respiratory exchange ratio*) – współczynnik wymiany oddechowej

SMM (ang. *skeletal muscle mass*) – masa mięśni szkieletowych

Total_{EE} (ang. *total energy expenditure*) – całkowity wydatek energetyczny

$\dot{V}O_2$ (ang. *oxygen uptake*) – pobór tlenu

$\dot{V}O_{2max}$ (ang. *maximal oxygen uptake*) – maksymalny pobór tlenu

STRESZCZENIE

Wprowadzenie. U wysoko wytrenowanych sportowców trening może modyfikować udział systemów metabolicznych dostarczających energię do aktywności mięśni szkieletowych, jednak profil energetyczny wynikający ze specyficznych adaptacji wciąż nie jest w pełni poznany. Zdolność generowania maksymalnej mocy zależy od wielu czynników, w tym udziału poszczególnych systemów energetycznych. Celem podjętych badań było porównanie udziału trzech systemów energetycznych podczas 15-sekundowego wysiłku o mocy maksymalnej u sportowców o utrwalonych zmianach adaptacyjnych pod wpływem długotrwałego treningu: szybkościowego, wytrzymałościowego i mieszanego (publikacja 1) oraz między kobietami i mężczyznami o podobnych, specyficznych dla danej dyscypliny sportowej adaptacjach fizjologicznych (publikacja 2).

Materiał i metody badawcze. W pierwszej turze zbadano trzy grupy zawodników: wytrzymałościową ($n = 17, 20,3 \pm 6,0$ lat), szybkościową ($n = 14, 20,3 \pm 2,5$ roku) oraz mieszaną (sporty zespołowe; $n = 19, 23,4 \pm 4,8$ roku). Dodatkowo, oprócz kryterium specjalizacji sportowej, uczestników podzielono na grupy według mediany maksymalnego poboru tlenu ($\dot{V}O_{2max}$) w teście do odmowy i mocy szczytowej (PP) w zmodyfikowanym 15-sekundowym teście Wingate. Badani wykonali test dwukrotnie – przed podokresem przygotowania ogólnego i po nim. W drugiej turze badań porównano zawodników i zawodniczki w ramach dwóch specjalizacji: wytrzymałościowej (17 mężczyzn w wieku 23 ± 7 lat) i 17 kobiet w wieku 20 ± 2 lata) oraz szybkościowej (14 mężczyzn w wieku $21,1 \pm 2,6$ roku i 14 kobiet w wieku 20 ± 3 lata). Wszyscy wykonali zmodyfikowany 15-sekundowy test Wingate przed okresem przygotowawczym. Udział systemów energetycznych – fosfagenowego, glikolitycznego i tlenowego – został obliczony przy użyciu metody trójkomponentowej PCr-LA- O_2 , opartej na: (1) parametrach składowej szybkiej krzywej wykładniczej opisującej nadmiarowe zużycie tlenu po wysiłku, (2) pomiarach stężenia mleczanu we krwi przed wysiłkiem i po wysiłku oraz (3) poborze tlenu podczas wysiłku.

Wyniki. Zaobserwowano istotne różnice w udziale systemów energetycznych: fosfagenowego, glikolitycznego i tlenowego między grupami sportowymi. Proporcje wynosiły odpowiednio: 52–39–9% u sportowców wytrzymałościowych, 34–54–12% u zawodników sportów zespołowych oraz 42–50–8% u sportowców szybkościowych. U sportowców wytrzymałościowych udział systemu fosfagenowego był istotnie statystycznie wyższy ($p < 0,001$), a systemu glikolitycznego – niższy ($p = 0,006$) niż u zawodników sportów zespołowych. Udział systemu tlenowego był znacząco wyższy u sportowców wytrzymałościowych niż u szybkościowych ($p = 0,003$). Po podokresie przygotowania ogólnego (14 tygodni) nie zaobserwowano istotnych zmian, z wyjątkiem spadku udziału systemu tlenowego u sportowców zespołowych ($p = 0,048$). W obu grupach sportowych: wytrzymałościowej i szybkościowej, proporcje procentowe między systemami energetycznymi nie różniły się znacząco między mężczyznami a kobietami. Udział systemów (fosfagenowy–glikolityczny–tlenowy) wynosił 52–37–11% u mężczyzn i 48–39–13% u kobiet w grupie wytrzymałościowej, a w grupie szybkościowej – 42–50–8% u mężczyzn i 41–50–9% u kobiet. Wykazano istotne różnice w całkowitym wydatku energetycznym

oraz wydatku energetycznym w poszczególnych systemach (kJ) między mężczyznami a kobietami w obu specjalnościach sportowych ($p = 0,001-0,013$). W grupie wytrzymałościowej wydatek energetyczny dla poszczególnych systemów (fosfagenowy–glikolityczny–tlenowy) wynosił 35–25–7 kJ u mężczyzn i 20–16–5 kJ u kobiet, a w grupie szybkościowej – 33–37–6 kJ u mężczyzn i 21–25–4 kJ u kobiet.

Wnioski. Specjalizacja sportowa wiąże się z odmiennym udziałem systemów energetycznych podczas krótkotrwałego wysiłku o mocy maksymalnej. Sportowcy z utrwaloną specyficzną adaptacją wykazują stabilny profil energetyczny podczas podokresu przygotowania ogólnego rozpoczynającego roczny cykl treningowy. Procentowy udział systemów energetycznych nie różni się u mężczyzn i u kobiet o podobnych adaptacjach metabolicznych, specyficznych dla danej dyscypliny sportu, pomimo różnic w składzie ciała, wydajności mechanicznej i całkowitym wydatku energetycznym. Wielkość i charakter różnic międzypłciowych zależą głównie od dyscypliny sportu oraz masy mięśni szkieletowych.

ABSTRACT

Background. In highly trained athletes, training may modify the contribution of metabolic systems providing energy to skeletal muscle activity, but the energy profile resulting from specific adaptations is still not fully understood. The ability to generate maximum power depends on many factors, including the involvement of individual energy systems. The aim of the research was to compare the contribution of three energy systems during a 15-second maximal effort in athletes with established adaptive changes resulting from long-term training: speed, endurance, and mixed (1st publication), as well as between men and women with similar, discipline-specific physiological adaptations (2nd publication).

Material and Methods. In the first phase of the study, three groups of athletes were examined: endurance ($n = 17$, 20.3 ± 6.0 years), speed ($n = 14$, 20.3 ± 2.5 years), and mixed (team sports; $n = 19$, 23.4 ± 4.8 years). Additionally, apart from the criterion of sports specialization, participants were divided into groups based on the median of maximum oxygen uptake ($\dot{V}O_{2\max}$) during an incremental exercise test to exhaustion and peak power output (PP) in a modified 15-second Wingate test. The tests were conducted twice – before and after the general preparation period. In the second phase of the study, male and female athletes were compared within two specializations: endurance (17 men aged 23 ± 7 years and 17 women aged 20 ± 2 years) and speed (14 men aged 21.1 ± 2.6 years and 14 women aged 20 ± 3 years). All participants performed the modified 15-second Wingate test before the preparatory period. The contribution of the energy systems – phosphagen, glycolytic, and oxidative – was calculated using the three-component PCr-LA- O_2 method, which is based on: (1) parameters of the fast component of the exponential curve describing excess post-exercise oxygen consumption, (2) measurements of blood lactate concentration before and after exercise, and (3) oxygen uptake during exercise.

Results. Significant differences were observed in the contribution of energy systems: phosphagen, glycolytic, and oxidative among the athletic groups. The proportions were 52–39–9% for endurance athletes, 34–54–12% for team sport athletes, and 42–50–8% for speed-power athletes. Endurance athletes showed statistically significant differences in the phosphagen system ($p < 0.001$) and glycolytic system ($p = 0.006$) compared to team sport athletes, as well as in the oxidative system compared to speed athletes ($p = 0.003$). After the general preparation phase (14 weeks), no significant changes were observed, except for a decrease in the contribution of the oxidative system in team sport athletes ($p = 0.048$). The system contributions (phosphagen–glycolytic–oxidative) were 52–37–11% for men and 48–39–13% for women in the endurance group, while for speed athletes, the proportions were 42–50–8% for men and 41–50–9% for women. Significant differences were found in total energy expenditure and energy expenditure across the three systems (kJ) between men and women in both for athletic specializations ($p = 0.001$ – 0.013). In the endurance group, energy expenditure for the respective systems (phosphagen–glycolytic–oxidative) was 35–25–7 kJ in men vs. 20–16–5 kJ in women. In the speed-power group, the corresponding values were 33–37–6 kJ for men and 21–25–4 kJ for women. In both sports groups, the percentages between the energy systems were not significantly different between men and women.

Conclusions. Sports specialization influences the contribution of energy systems during short-duration maximum power exercise. Athletes with established specific adaptations exhibit a stable energy profile during the general preparation phase at the beginning of the annual training cycle. The percentage contribution of energy systems does not differ between men and women with similar metabolic adaptations specific to a given sport discipline, despite differences in body composition, mechanical efficiency, and total energy expenditure. The magnitude and specificity of the sex differences depend primarily on the sport discipline and skeletal muscle mass.

1. WSTĘP

Adenozynotrifosforan (ATP) w mięśniach występuje w niskim stężeniu, ok. 24 mmol na kilogram suchej masy mięśniowej. Energii uwalnianej na skutek rozpadu ATP podczas maksymalnego wysiłku wystarczyłoby zaledwie na ok. 2 sekundy bez mechanizmów zapobiegających jego całkowitej degradacji (Górski [red.] 2006, s. 435–437; Hargreaves i Spriet 2020).

Resynteza ATP w mięśniach odbywa się w procesach metabolicznych dwojakiego rodzaju: (1) beztlenowych, tzn. reakcji kinazy kreatynowej, reakcji miokinazowej i glikolizy, oraz (2) tlenowych, poprzez cykl kwasu trikarboksylowego, w którym oksydacji ulega acetylo-koenzym A (Żołądź [red.] 2019, s. 95–105). Do resyntezy ATP podczas wysiłku przyczyniają się wszystkie szlaki, zarówno w procesach beztlenowych, jak i tlenowych, jednak stopień ich aktywności różni się w zależności od rodzaju, intensywności i czasu trwania wykonywanego wysiłku (Åstrand i Rodahl 1970; Gollnick i in. 1986; Robergs i Roberts 1997).

W systemie fosfagenowym regeneracja ATP zachodzi m.in. dzięki reakcji kinazy kreatynowej i przeniesieniu bogatoenergetycznej grupy fosforanowej z fosfokreatyny (PCr) na adenozynodifosforan (ADP) oraz – w mniejszym stopniu – dzięki tzw. reakcji miokinazowej katalizowanej przez enzym kinazę adenylanową, w której dwie cząsteczki ADP tworzą jedną cząsteczkę ATP (Górski [red.] 2006, s. 435–437). Energia jest dostarczana natychmiastowo z wewnątrzmięśniowych zapasów ATP i ADP, zawierających wysokoenergetyczne wiązania bezwodnikowe, oraz z PCr. Dzieje się to od 3,5 do 8 razy szybciej niż w przypadku wykorzystania metabolizmu tlenowego. Jednak średnia zawartość magazynowanego ATP wynosi tylko ok. 5 mmol, a PCr – 15–20 mmol na kilogram mokrej masy mięśniowej. System ten dominuje i dostarcza natychmiastowej energii podczas wysiłku o maksymalnej intensywności przez 5–6 sekund pracy (Bogdanis i in. 1996, 1998; Gaitanos i in. 1993; Spriet 1992). Aktywność systemu glikolitycznego obejmującego szlaki niemitochondrialne wzrasta podczas wysiłków trwających dłużej niż kilka sekund (Pilegaard i in. 1999). Pirogronian powstający bez obecności tlenu w reakcji glikolizy ulega przekształceniu w mleczan, który gromadzi się w mięśniach, a następnie dyfunduje do krwi (Górski [red.] 2006, s. 436–437). Glikoliza obejmuje szereg reakcji, które można podzielić na dwie fazy: (1) fazę przygotowawczą lub „inwestycyjną”, która wymaga zużycia dwóch cząsteczek ATP, oraz (2) fazę regeneracyjną, zwaną fazą „wypłaty”, podczas której następuje tworzenie cząsteczek ATP netto (Kon i in. 2019). System glikolityczny jest najbardziej aktywny podczas wysiłków submaksymalnych trwających od 10 do 120 sekund (Beneke i in. 2002; Hultman i in. 1991; Serresse i in. 1988; Smith i Hill 1991). Maksymalna aktywność glikolizy jest osiągana, gdy podczas wysiłku znacząco zwiększy się rozbieżność pomiędzy tempem poboru tlenu a zapotrzebowaniem na energię (Medbo i Tabata 1989). Zwiększone stężenie jonów wodorowych (H^+) może prowadzić do hamowania kluczowych enzymów glikolizy, takich jak fosfofruktokinaza oraz heksokinaza. Wysokie stężenie H^+ powoduje zakwaszenie środowiska komórkowego, co bezpośrednio oddziałuje na aktywność tych enzymów, obniżając tym samym efektywność procesu glikolizy (Facey i in. 2013). Działanie systemu tlenowego polega głównie na utlenianiu acetylo-koenzymu A pochodzącego z glikolizy za pośrednictwem dehydrogenazy pirogronianowej lub beta-oksydacji kwasów tłuszczowych, po których następuje fosforylacja oksydacyjna za

pośrednictwem mitochondrialnego łańcucha transportu elektronów i oksydazy cytochromowej (Żołądź [red.] 2019, s. 95–105). System ten dostarcza energii przede wszystkim podczas długotrwałych wysiłków o umiarkowanej i średniej intensywności, poniżej progu mleczanowego. Po upływie 2–6 minut aktywność przemian tlenowych współdziałających w pokrywaniu zapotrzebowania na energię osiąga poziom odpowiadający intensywności wysiłku (Górski [red.] 2002, s. 102–105).

W ostatnich latach badacze szacowali udział systemów energetycznych w wysiłkach typowych dla różnych dyscyplin sportowych, tańca klasycznego oraz gier ruchowych w rzeczywistości wirtualnej za pomocą kilku metod: metody PCr-LA-O₂ (Kaufmann i in. 2022a), metody maksymalnego skumulowanego deficytu tlenowego (Li i in. 2015; Valenzuela i in. 2020) oraz metody skumulowanego deficytu tlenowego (Jabbour i in. 2015; Reis i in. 2010). Badano 400-metrowe biegi płaskie i przez płotki (Zouhal i in. 2010), judo (Julio i in. 2017), karate (Beneke i in. 2004; Doria i in. 2009), taekwondo olimpijskie (Campos i in. 2012), boks (Davis i in. 2015), dżiu-dżitsu (Rodrigues-Krause i in. 2020), mieszane sztuki walki (Tortu i in. 2024a, 2024b; Tortu i Gökhan 2024), sporty zespołowe (Tortu i in. 2024b), narciarstwo biegowe (Losnegard 2019), wioślarstwo (De Campos Mello i in. 2009), kajakarstwo (Zouhal i in. 2012), wspinaczkę skałkową (Bertuzzi i in. 2007; Doria i in. 2020; Maciejczyk i in. 2022), balet (Guidetti i in. 2008), gimnastykę sportową (Kaufmann i in. 2022b), badminton (Fu i in. 2021), pływanie (Pelarigo i in. 2017; Shimoyama i in. 2003), piłkę nożną (Ulupinar i in. 2021, 2023), tenis stołowy (Miloni i in. 2017) oraz gry ruchowe (ang. *exergames*) (Park i in. 2020; Yang i in. 2022).

Pomimo wielu doniesień brakuje badań dotyczących udziału systemów energetycznych w wysiłkach krótkotrwałych o mocy maksymalnej (sprinterskich). Sprint ma natomiast kluczowe znaczenie w sporcie wyczynowym – nie tylko w dyscyplinach szybkościowych, ale także wytrzymałościowych, m.in. ze względu na finisz lub realizację decydujących elementów gry (Spencer i Gastin 2001). Dotychczas wykazano, że w przypadku krótkotrwałych wysiłków o mocy maksymalnej (do 30 sekund) 56–87% energii pokrywają źródła beztlenowe (Beneke i in. 2002; Julio i in. 2019; Serresse i in. 1988; Smith i Hill 1991), a udział metabolizmu tlenowego waha się w zakresie 13–44% (Calbet i in. 1997; Hill 1999; Medbo i Tabata 1989; Serresse i in. 1988; Spencer i Gastin 2001). Wyniki wcześniejszych badań (Bertuzzi i in. 2007; Zouhal i in. 2010, 2012) sugerują, że sportowcy wytrzymałościowi w większym stopniu wykorzystują system tlenowy, ze względu na lepiej rozwiniętą wydolność tlenową, a sportowcy szybkościowi – beztlenowe źródła energii, zgodnie z ich adaptacjami do wysiłków sprinterskich. Potwierdzać to mogą również doniesienia oparte na kalorymetrii i pomiarach wskaźnika wymiany oddechowej (RER). Sportowcy, którzy w większym stopniu polegają na metabolizmie tlenowym, wykazują niższy RER podczas wysiłku, co wskazuje na zwiększoną oksydację kwasów tłuszczowych w porównaniu ze sportowcami skoncentrowanymi na intensywnym treningu anaerobowym. Z kolei sportowcy uprawiający dyscypliny szybkościowe prezentują wyższy RER, co odzwierciedla większe wykorzystanie węglowodanów (Degens i in. 2019; Marra i in. 2021). Sugeruje to, że u zawodników o różnych profilach metabolicznych bardziej aktywny wydaje się ten typ metabolizmu, który jest lepiej rozwinięty w procesie długoterminowej adaptacji treningowej. Ponadto szereg czynników związanych z różnicami międzypłciowymi bezpośrednio lub pośrednio wpływa na przemiany energetyczne podczas wysiłków skutkujących wytworzeniem maksymalnej mocy. Są to przede wszystkim: budowa i skład ciała (Lundsgaard i in. 2017), czynniki fizjologiczne (Gray i in. 2006) oraz biochemiczne (Esbjörnsson i in. 1993; Esbjörnsson-Liljedahl i in. 2002).

Chociaż przeprowadzono wiele badań dotyczących różnic międzypłciowych, jedynie nieliczne z nich bezpośrednio porównywały udział systemów energetycznych u męż-

czyż i u kobiet podczas krótkotrwałego wysiłku o mocy maksymalnej. Z jednej strony nie stwierdzono istotnych różnic w procentowym udziale poszczególnych systemów energetycznych, a z drugiej – odnotowano znaczące różnice w całkowitym wydatku energetycznym (kJ) między płciami (Duffield i in. 2004; Tortu i Gökhan 2024). Tortu i in. (2024b) wykazali występowanie znaczących różnic zarówno w wartościach bezwzględnych, jak i względnych udziału systemów energetycznych i całkowitego wydatku energetycznego między mężczyznami a kobietami sportów zespołowych w powtarzanych testach maksymalnych. Jednakże doniesienia te nie są jednoznaczne i należy zauważyć, że specyficzna adaptacja sportowa i nieuwzględnienie wskaźników takich jak masa mięśni szkieletowych (SMM) lub masa ciała szczupłego kończyn dolnych (LLM) mogą wpływać na wyniki badań i dalsze interpretacje.

Interesujące są potencjalne różnice w udziale systemów energetycznych związane ze specyficzną adaptacją sportową i płcią oraz ocena możliwości modyfikowania „profilu energetycznego” zawodniczki lub zawodnika. Wiedza ta może przyczynić się do lepszego zrozumienia oddziaływania treningu na metabolizm wysiłkowy, a w praktyce – wpłynąć na personalizację strategii treningowych u sportowców wyczynowych oraz innych osób aktywnych fizycznie. Dotychczas nie opublikowano badań, które bezpośrednio porównywałyby udział systemów energetycznych u osób reprezentujących różne profile treningowe, wykonujących ten sam krótkotrwały standardowy test o mocy maksymalnej. Nie zostało też wyjaśnione, w jakim stopniu bieżący proces treningowy i płeć wpływają na udział systemów energetycznych w krótkotrwałym wysiłku o mocy maksymalnej u sportowców wyczynowych.

2. CELE I HIPOTEZY

Cele:

1. Określenie związku między specyfiką uprawianej dyscypliny sportowców wyczynowych a proporcją udziału systemów energetycznych tlenowych i beztlenowych w krótkotrwałym wysiłku o mocy maksymalnej (publikacja 1).
2. Ocena zmian proporcji udziału systemów energetycznych podczas krótkotrwałego wysiłku o mocy maksymalnej w grupach sportowych o różnych specjalnościach w podokresie przygotowania ogólnego (publikacja 1).
3. Określenie różnic międzypłciowych w udziale systemów energetycznych w krótkotrwałym wysiłku maksymalnym u kobiet i mężczyzn o tym samym profilu sportowym: szybkościowym oraz wytrzymałościowym (publikacja 2).

Hipotezy:

1. Charakter specjalności sportowej obciążeń wiąże się z różnymi proporcjami udziału systemów energetycznych tlenowych i beztlenowych w krótkotrwałym wysiłku o mocy maksymalnej. Sportowcy uprawiający dyscypliny szybkościowe charakteryzują się większym udziałem systemów anaerobowych, szczególnie fosfagenowego, niż sportowcy dyscyplin wytrzymałościowych (publikacja 1).
2. Udział systemów energetycznych w krótkotrwałym wysiłku o mocy maksymalnej u sportowców zmienia się w odpowiedzi na trwający proces treningowy. Specyficzne adaptacje zależą od fazy treningowej oraz od rodzaju uprawianej dyscypliny sportowej (publikacja 1).
3. Istnieją różnice międzypłciowe w udziale systemów energetycznych podczas krótkotrwałego wysiłku o mocy maksymalnej, które determinowane są specjalnością sportową (publikacja 2).

3. CYKL PUBLIKACJI

Niniejszy autoreferat przedstawia w ujęciu syntetycznym wyniki badań zawartych w dwóch artykułach opublikowanych w ramach monotematycznego cyklu pod wspólnym tytułem *Udział tlenowych i beztlenowych systemów energetycznych w krótkotrwałym wysiłku o mocy maksymalnej w zależności od specjalności sportowej i płci*.

1. Archacki D., Zieliński J., Pospieszna B., Włodarczyk M., Kusy K. (2024) The contribution of energy systems during 15-second sprint exercise in athletes of different sports specializations. PeerJ, 12, e17863. <http://doi.org/10.7717/peerj.17863>
punktacja MNiSW: 100; Impact Factor: 2,3; Impact Factor 5-letni: 3,2
2. Archacki D., Zieliński J., Ciekot-Sołtysiak M., Zarębska E.A., Kusy K. (2024) Sex differences in the energy system contribution during sprint exercise in speed-power and endurance athletes. Journal of Clinical Medicine, 13, 4812. <https://doi.org/10.3390>
punktacja MNiSW: 140; Impact Factor: 3,0; Impact Factor 5-letni: 3,4

4. MATERIAŁ I METODY BADAWCZE

4.1. Uczestnicy badań

Badaniom poddano dwie grupy składające się z wysoko wytrenowanych zawodników i zawodniczek oraz jedną grupę sportowców amatorów. Zawodnicy różnili się od siebie specyficzną adaptacją wysiłkową ze względu na uprawianie dyscyplin o charakterze wytrzymałościowym (wyczynowe biegi średnie/długie i triathlon), szybkościowym (wyczynowe biegi krótkie oraz taekwondo) i mieszanym (sporty zespołowe: amatorska piłka nożna). Łącznie analizie poddano wyniki pomiarów 96 osób (46 kobiet i 50 mężczyzn) w przedziale wiekowym 18–30 lat.

W publikacji 1 zaprezentowano analizę danych 50 mężczyzn podzielonych na dwie grupy według uprawianej dyscypliny. Grupa wytrzymałościowa obejmowała 17 osób w wieku 20 ± 6 lat o masie ciała $68,2 \pm 6,2$ kg, wysokości ciała $176,7 \pm 5$ cm i zawartości tkanki tłuszczowej $14,2 \pm 3,3\%$. Grupa szybkościowa (sprinterska) składała się z 14 osób, których wiek wynosił $20 \pm 2,5$ roku, masa ciała $78,2 \pm 9,2$ kg, wysokość ciała $181,1 \pm 5,7$ cm, a zawartość tkanki tłuszczowej $15,7 \pm 4,8\%$. W skład trzeciej, amatorskiej grupy zawodników gier zespołowych weszło 19 osób w wieku $23 \pm 4,8$ roku o masie ciała $75,2 \pm 7,1$ kg, wysokości ciała $180,1 \pm 5,5$ cm i zawartości tkanki tłuszczowej $17,7 \pm 4,9\%$. Szczegółowa charakterystyka uczestników w obu terminach badań została przedstawiona w publikacji 1.

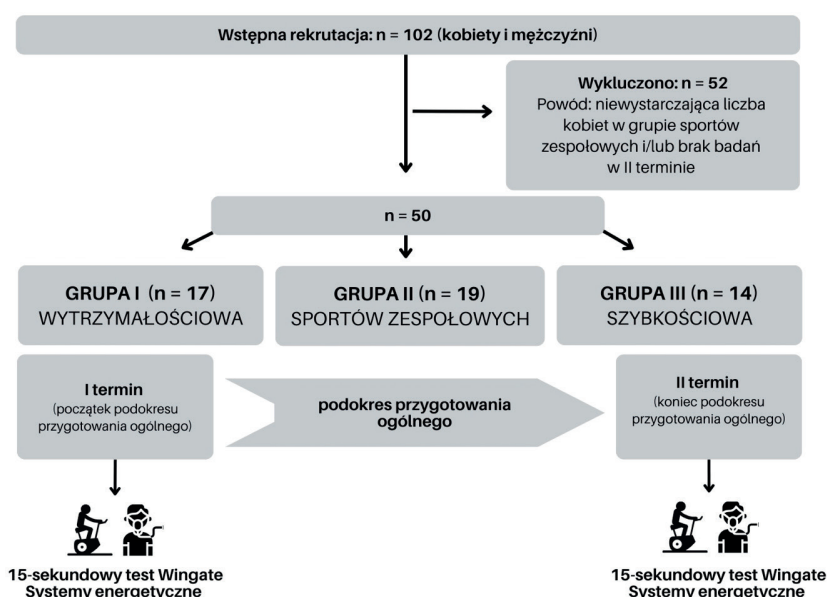
W publikacji 2 analizie poddano dane kobiet i mężczyzn uprawiających sport wyczynowo, podzielonych według specyfiki uprawianej dyscypliny – łącznie 62 osoby (31 kobiet i 31 mężczyzn). Grupa wytrzymałościowa składała się z 17 mężczyzn (wiek 23 ± 7 lat, masa ciała $68,0 \pm 6,6$ kg, wysokość ciała 179 ± 6 cm, zawartość tkanki tłuszczowej $13,2 \pm 3\%$) oraz 17 kobiet (wiek 20 ± 2 lata, masa ciała $54,4 \pm 4,4$ kg, wysokość ciała $165,1 \pm 4,2$ cm, zawartość tkanki tłuszczowej $21,8 \pm 3,6\%$). Grupa szybkościowa (sprinterska) składała się z 14 mężczyzn (wiek $21,0 \pm 2,6$ roku, masa ciała $78,0 \pm 9,4$ kg, wysokość ciała $182,1 \pm 5,4$ cm, zawartość tkanki tłuszczowej $15,9 \pm 4,8\%$) oraz 14 kobiet (wiek 20 ± 3 lata, masa ciała $62,9 \pm 11$ kg, wysokość ciała $171,1 \pm 9$ cm, zawartość tkanki tłuszczowej $24,5 \pm 5\%$). Podstawowe charakterystyki wraz z różnicami międzypłciowymi oraz międzygrupowymi zostały przedstawione w publikacji 2.

4.2. Projekt badań

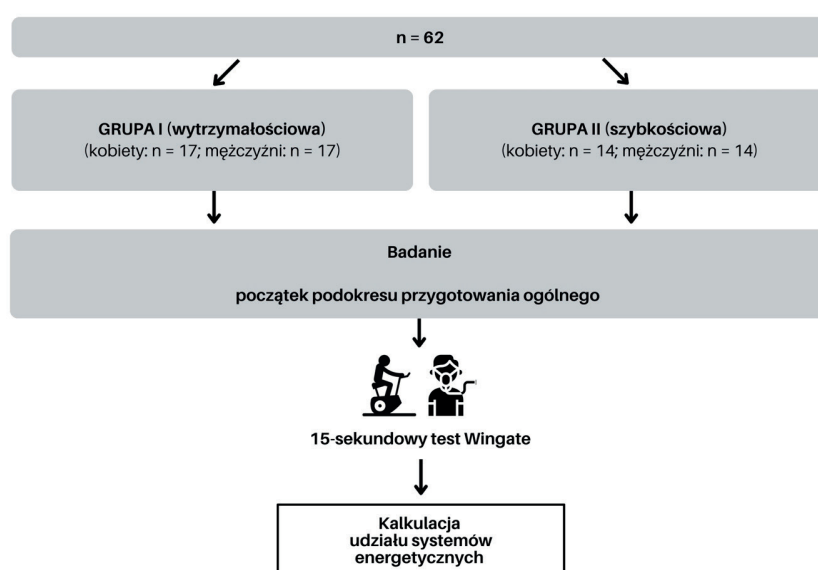
W pierwszej części projektu zbadano trzy grupy mężczyzn w dwóch terminach cyklu treningowego. Badania w pierwszym terminie zostały przeprowadzone po okresie przejściowym (roztrenowania), a w drugim terminie na końcu podokresu przygotowania ogólnego, po ok. 14 tygodniach (rycina 1). Grupa wytrzymałościowa wykonywała w tym okresie 6–7 jednostek treningowych tygodniowo, z czego 1–2 sesje obejmowały trening siłowy i kondycyjny, o średnim czasie trwania sesji 120 minut i łącznej objętości 182 godzin treningowych. Sportowcy z grupy szybkościowej uczestniczyli w 6–7 sesjach treningowych tygodniowo, w tym w 2 sesjach treningu oporowego nastawionego na budowanie ogólnej siły, o średnim czasie trwania sesji 90 minut i łącznej objętości 137 godzin treningowych. Grupa zawodników sportów zespołowych odbywała tygodniowo 3–4 sesje trenin-

gowe piłkarskie, każda o średnim czasie trwania 80 minut, o łącznej objętości 65 godzin treningowych, bez sesji treningu oporowego (siłowego). Oprócz kryterium specjalizacji sportowej wprowadzono podział uczestników na grupy według median maksymalnego poboru tlenu ($\dot{V}O_{2max}$) w teście wytrzymałościowym do odmowy i mocy szczytowej (PP) w zmodyfikowanym 15-sekundowym teście Wingate. W rezultacie każdy sportowiec został przypisany do grupy o niskim lub wysokim $\dot{V}O_{2max}$, grupy o niskim lub wysokim PP lub do jednej z kombinacji tych kategorii.

W drugiej części projektu analizą objęto kobiety i mężczyzn w dwóch grupach specjalizacji sportowych, zbadanych w jednym terminie, tzn. bezpośrednio po okresie roztrenowania, na początku podokresu przygotowania ogólnego (rycina 2). Przed przystąpieniem do badań wszyscy uczestnicy zapoznali się zarówno z procedurami dotyczącymi przeprowadzanych badań, jak i z samym testem.



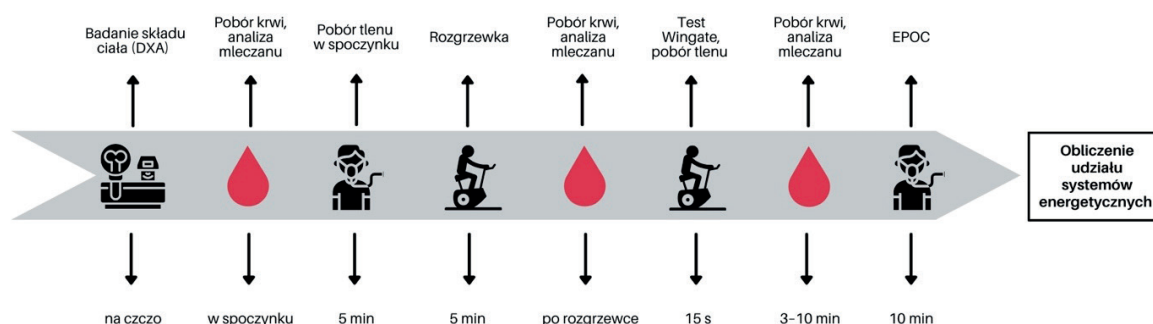
Rycina 1. Schemat badań w pierwszej części projektu (publikacja 1)



Rycina 2. Schemat badań w drugiej części projektu

4.3. Procedura pomiarowa

Badania zostały przeprowadzone w Laboratorium Analizy Ruchu Człowieka Zakładu Lekkiej Atletyki i Przygotowania Motorycznego Akademii Wychowania Fizycznego im. Eugeniusza Piaseckiego w Poznaniu. Procedura badań w projekcie została zatwierdzona przez Komisję Bioetyczną Uniwersytetu Medycznego im. Karola Marcinkowskiego w Poznaniu decyzją z 9 września 2020 roku (nr 627/20) i przeprowadzona zgodnie z zasadami Deklaracji helsińskiej. Wszystkich zawodników poinformowano o celach, procedurach i ryzyku badań, podpisali oni także zgodę na udział w badaniach. Schemat procedury pomiarowej został przedstawiony na rycinie 3, a szczegóły opisano w kolejnych podrozdziałach.



DXA – absorpcjometria promieniowania rentgenowskiego o podwójnej energii; EPOC – nadmiarowe zużycie tlenu po wysiłku

Rycina 3. Schemat głównych procedur pomiarowych (publikacja 1)

4.3.1. Analiza składu ciała

Do pomiaru wysokości i masy ciała użyto cyfrowej stacji pomiarowej SECA 285 (Seca GmbH, Hamburg, Niemcy). Skład ciała ustalono za pomocą metody absorpcjometrii promieniowania rentgenowskiego o dwóch energiach (DXA) przy użyciu urządzenia Lunar Prodigy Pro (GE Healthcare, Madison, USA). Badanie przeprowadzono zgodnie z protokołem zaproponowanym przez Nanę i in. (2015).

4.3.2. Test Wingate

Zawodnicy wykonywali zmodyfikowany 15-sekundowy test Wingate na ergometrze rowerowym Cyclus 2 (RBM elektronik-automation GmbH, Lipsk, Niemcy) zgodnie z zaleceniami standaryzacji według Inbara i in. (1996). Test polegał na wykonaniu maksymalnego wysiłku w założonym czasie i pozwalał zarejestrować m.in. wartości mocy szczytowej (PP) i średniej (MP) oraz wskaźnika zmęczenia (FI). Protokół rozpoczynał się od 5-minutowej rozgrzewki przeplatanej kilkoma 2–3 sekundowymi przyspieszeniami. Głównie zadanie polegało na 15-sekundowym sprincie w pozycji stojącej. Zastosowano obciążenie wynoszące dla mężczyzn 0,085 kg, a dla kobiet – 0,075 kg na kilogram masy ciała (Katch i in. 1977). Po zakończeniu wysiłku uczestnicy pozostawali w pozycji siedzącej przez 10 minut.

4.3.3. Pobór tlenu oraz stężenie mleczanu

Wskaźniki oddechowe mierzono za pomocą ergospirometru MetaMax 3B (Cortex Biophysik GmbH, Lipsk, Niemcy), a częstość skurczów serca przy użyciu monitora Polar Team™ (Polar Electro Oy, Kempele, Finlandia). Dane rejestrowano nieprzerwanie przez 5 minut przed rozpoczęciem testu Wingate, w trakcie jego trwania oraz przez 10 minut po jego zakończeniu. Do pomiaru stężenia mleczanu użyto analizatora Biosen C-line (EKF diagnostik GmbH, Barleben, Niemcy). Próbkę krwi pobierano z opuszki palca w spoczynku, bezpośrednio po rozgrzewce oraz między 3 a 10 minutą po zakończeniu wysiłku (8 pomiarów co minutę). W dalszej analizie uwzględniano indywidualną wartość szczytową. Tego samego dnia, po zakończeniu zmodyfikowanego testu Wingate oraz po wypoczynku, zawodnicy wykonywali ergospirometryczny test do odmowy na bieżni mechanicznej h/p cosmos pulsar (Sports & Medical GmbH, Nussdorf-Traunstein, Niemcy) w celu oceny $\dot{V}O_{2\max}$, zgodnie ze standardami przedstawionymi przez Edvardsen i in. (2014).

4.3.4. Obliczanie udziału systemów energetycznych

W celu oszacowania udziału systemów tlenowego, glikolitycznego i fosfagenowego oraz wydatku energetycznego zastosowano metodę PCr-LA- O_2 . Metoda ta polega na analizie przebiegu tzw. składowej szybkiej krzywej wykładniczej, opisującej nadmiarowe zużycie tlenu po wysiłku (system fosfagenowy, PCr), różnicę stężenia mleczanu we krwi przed wysiłkiem i po nim (system glikolityczny, LA) oraz pomiar zużycia tlenu podczas wysiłku (system tlenowy, O_2). Procedury przeprowadzono zgodnie z wytycznymi zawartymi w literaturze (Beneke i in. 2002, 2004; Bertuzzi i in. 2007).

Energię uzyskaną z systemu tlenowego (E_{AER}) obliczono na podstawie różnicy między poborem tlenu ($\dot{V}O_2$) w spoczynku (mierzonym przez 5 minut) a $\dot{V}O_2$ podczas maksymalnego wysiłku przy użyciu metody trapezoidalnej (Beneke i in. 2002). Energia produkowana przez system glikolityczny (E_{LA}) została oszacowana na podstawie różnicy między szczytowym a spoczynkowym stężeniem mleczanu we krwi. Przyjęto, że wartość netto $1 \text{ mmol} \cdot \text{l}^{-1}$ mleczanu odpowiada $3 \text{ ml } O_2 \cdot \text{kg masy ciała}^{-1}$ (Spencer i in. 2004).

Energię pochodzącą z systemu fosfagenowego oszacowano na podstawie parametrów składowej szybkiej przebiegu nadmiarowego zużycia tlenu po wysiłku (EPOC) (Gaesser i Brooks 1984). W celu uzyskania odpowiedniego dopasowania krzywej kinetyki EPOC wykonywano analizy dla czasu trwania EPOC od 3 do 10 minut. Ze względu na najbardziej wiarygodne i spójne wyniki przyjęto 7-minutowy okres EPOC jako standard dla wszystkich analiz. Dane analizowano metodą dwuwykładniczą (Beneke i in. 2002; Özyener i in. 2001) przy użyciu oprogramowania GEDAE-LaB (Bertuzzi i in. 2016). Uzyskano wysokie współczynniki determinacji dla wszystkich analizowanych krzywych powysiłkowej kinetyki tlenu ($r^2 = 0,80\text{--}0,98$).

Całkowity wydatek energetyczny (E_{TOT}) wyrażony został jako suma energii trzech systemów przy założeniu równoważnika $20,9 \text{ kJ}$ na 1 litr tlenu, zgodnie z równaniem $E_{TOT} = E_{AER} + E_{LA} + E_{PCR}$. Udział każdego z systemów został wyrażony jako wartość procentowa E_{TOT} .

4.3.5. Analiza statystyczna

Analizy statystyczne przeprowadzono za pomocą programu Statistica 13.3 (Software Inc., Palo Alto, CA, USA). Rozkład normalności danych zweryfikowano przy użyciu testu

Shapiro–Wilka. Do oceny jednorodności wariancji zastosowano test Levene’a. Dwuczynnikowa analiza wariancji (ANOVA) z powtarzanymi pomiarami została przeprowadzona w celu zbadania efektów: grupy sportowej, terminu badań oraz ich interakcji (publikacja 1). Wielowymiarowa analiza wariancji (MANOVA) i dwuczynnikowa analiza wariancji zostały wykonane celem zbadania efektów: grupy sportowej, płci oraz ich interakcji (publikacja 2). Dodatkowo, jednoczynnikowa analiza wariancji (ANOVA) została zastosowana w celu wykrycia różnic między systemami energetycznymi w każdej z grup (publikacja 1) oraz w celu zweryfikowania wielkości różnic wśród grup między mężczyznami i kobietami (publikacja 2). W razie stwierdzenia istotności efektów głównych stosowano test *post-hoc* Bonferroniego. We wszystkich analizach przyjęto poziom istotności równy $p < 0,05$. Częstkowy eta kwadrat (η^2) został zastosowany jako miara wielkości efektu i był interpretowany jako mały (0,01), średni (0,06) lub duży (0,14) (Cohen 1988). Wartości zmiennych wyrażono jako średnie i odchylenia standardowe.

5. WYNIKI

5.1. Skład ciała, masa mięśni szkieletowych i wydolność tlenowa

Jak opisano w publikacji 1, grupa szybkościowa charakteryzowała się najwyższymi, a grupa wytrzymałościowa najniższymi wartościami SMM oraz LLM. Grupa sportów zespołowych wykazała wartości pośrednie zarówno w przypadku SMM, jak i LLM i nie różniła się istotnie od grup szybkościowej i wytrzymałościowej. Zawodnicy sportów zespołowych znacząco zwiększyli SMM i LLM oraz zmniejszyli procentową zawartość tkanki tłuszczowej (BF) między terminami badań. Grupa wytrzymałościowa charakteryzowała się znacząco wyższym bezwzględnym $\dot{V}O_{2\max}$ ($\text{l}\cdot\text{min}^{-1}$) niż zawodnicy sportów zespołowych oraz wyższym względnym i bezwzględnym $\dot{V}O_{2\max}$ ($\text{ml}\cdot\text{min}^{-1}\cdot\text{kg}^{-1}$) niż grupa szybkościowa. Dodatkowo, w grupie sportów zespołowych zaobserwowano znaczący wzrost zarówno bezwzględnego, jak i względnego $\dot{V}O_{2\max}$ między terminami badań, podczas gdy inne grupy nie wykazały takich zmian (tabela 1).

Tabela 1. Zmiany w składzie ciała oraz wydolności tlenowej pomiędzy pierwszym a drugim terminem badań (publikacja 1)

	Grupa I wytrzymałościowa (n = 17)		Grupa II sportów zespołowych (n = 19)		Grupa III szybkościowa (n = 14)	
	przed	po	przed	po	przed	po
BM (kg)	68,3 ± 6,3*	68,7 ± 5*	75,2 ± 7,1	75,4 ± 6,8	78,1 ± 9,2	78,8 ± 9,7
BF (%)	14,2 ± 3,3	14,2 ± 3,1	17,7 ± 4,9	16,5 ± 4 [#]	15,7 ± 4,8	15,3 ± 4,9
SMM (kg)	29,7 ± 2,9*	29,7 ± 2,6*	32,1 ± 3,3	32,7 ± 3,4 [#]	34,7 ± 4,8	35,3 ± 4,6
LLM (kg)	19,2 ± 1,8*	19,1 ± 1,7*	21 ± 2,1	21,4 ± 2,3 [#]	22,7 ± 3,0	22,9 ± 2,9
$\dot{V}O_{2\max}$ ($\text{l}\cdot\text{min}^{-1}$)	4,2 ± 0,4 [†]	4,4 ± 0,4 [†]	3,6 ± 0,2	3,8 ± 0,3 [#]	4,1 ± 0,6	4,3 ± 0,6
$\dot{V}O_{2\max}$ ($\text{ml}\cdot\text{min}^{-1}\cdot\text{kg}^{-1}$)	62,2 ± 4,5 ^{†*}	64,9 ± 7,3 ^{†*}	49,3 ± 3,9	51,1 ± 4,8 [#]	51,8 ± 6,4	53,4 ± 7,9

BM – masa ciała; BF – zawartość tkanki tłuszczowej; SMM – masa mięśni szkieletowych; LLM – masa ciała szczupłego kończyn dolnych; $\dot{V}O_{2\max}$ – maksymalny pobór tlenu

[#] istotna różnica w porównaniu z pierwszym terminem badań

* istotna różnica w porównaniu z grupą szybkościową w tym samym terminie badań

[†] istotna różnica w porównaniu z grupą sportów zespołowych w tym samym terminie badań

W publikacji 2 opisano różnice między płciami zaobserwowane w grupach sportowych wytrzymałościowej i szybkościowej dla wszystkich zmiennych z wyjątkiem stężenia mleczanu we krwi w spoczynku. Mężczyźni z obu grup wykazali istotnie większą masę ciała (BM), SMM i LLM oraz niższy poziom BF w porównaniu z kobietami w tej samej grupie sportowej (tabela 2).

Tabela 2. Podstawowe charakterystyki grup sportowych oraz różnice pomiędzy mężczyznami i kobietami (publikacja 2)

	Grupa wytrzymałościowa (n = 34)		Grupa szybkościowa (n = 28)	
	Mężczyźni (n = 17)	Kobiety (n = 17)	Mężczyźni (n = 14)	Kobiety (n = 14)
BM (kg)	68 ±6,6 ^{#*}	54 ±4,4 [†]	78 ±9,4 [#]	62,9 ±11
BF (kg)	9,0 ±2,5	11,7 ±1,8 [†]	12,4 ±4,0	15,8 ±5,9
BF (%)	13,2 ±3 ^{#*}	21,8 ±3,6 [†]	15,9 ±4,8 [#]	24,5 ±5
SMM (kg)	29,9 ±3,2 ^{#*}	20,3 ±2,3 [†]	34,6 ±5 [#]	24 ±3,6
SMM (%)	43,9 ±1,4 [#]	37,6 ±1,9	44,2 ±2,8 [#]	38,3 ±2,1
LLM (kg)	19,6 ±2,1 ^{#*}	13,8 ±1,7 [†]	22,6 ±3,1 [#]	16,5 ±3
LLM (%)	81,7 ±3 [#]	70,5 ±4	79,7 ±5 [#]	69,5 ±5
LA _{REST} (mmol·l ⁻¹)	2,2 ±0,6	2 ±0,6	2,3 ±0,6	2,2 ±0,5
LA _{PEAK} (mmol·l ⁻¹)	7,8 ±1,1 ^{#*}	6,9 ±1,8 [†]	9,6 ±1,7	8,7 ±1,6

BM – masa ciała; BF – zawartość tkanki tłuszczowej; SMM – masa mięśni szkieletowych; LLM – masa ciała szczupłego kończyn dolnych; LA_{REST} – stężenie mleczanu w spoczynku; LA_{PEAK} – maksymalne stężenie mleczanu

[#] istotna różnica w porównaniu z zawodniczkami tej samej specjalności

^{*} istotna różnica pomiędzy specjalnościami sportowymi mężczyzn

[†] istotna różnica pomiędzy specjalnościami sportowymi kobiet

5.2. Moc szczytowa i średnia

Opisani w publikacji 1 zawodnicy z grupy szybkościowej uzyskiwali istotnie wyższe wartości PP, MP oraz FI niż zawodnicy z grupy wytrzymałościowej. Różnice między grupami w mocy względnej (zarówno na kilogram masy ciała, jak i SMM) były nieistotne. Nie stwierdzono również wyraźnych zmian w żadnej z powyższych zmiennych między dwoma badaniami (tabela 3). Szczegółowe dane znajdują się w tabeli 2 publikacji 1.

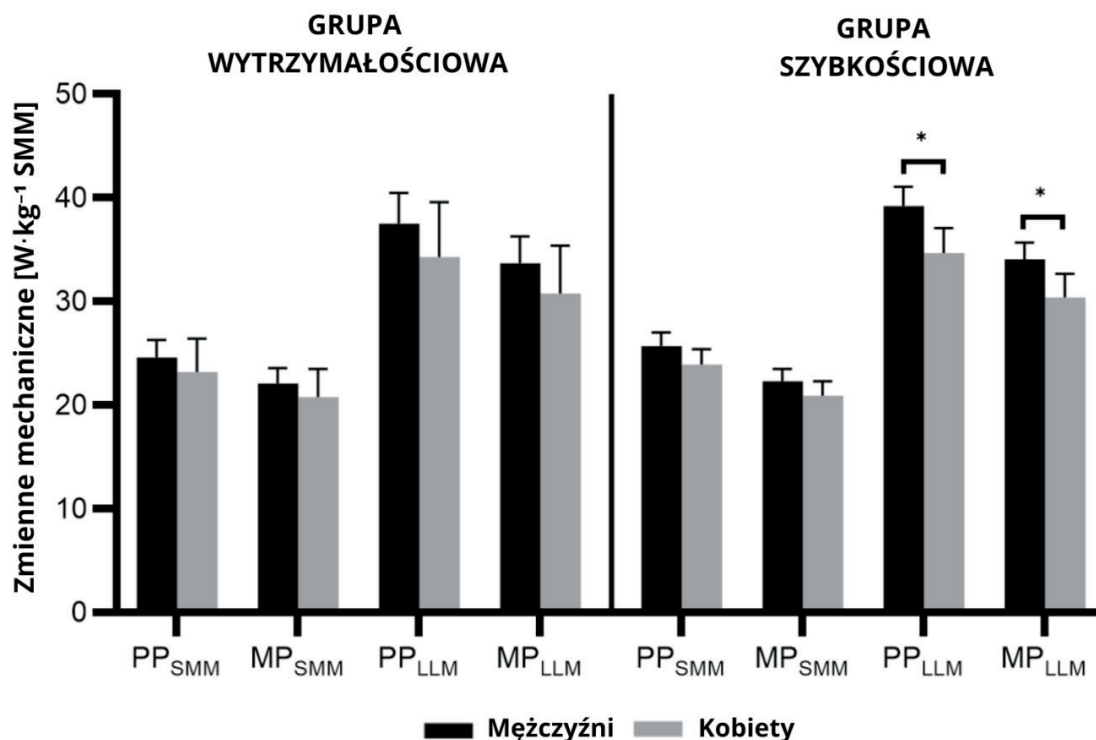
Mężczyźni z grupy szybkościowej opisaney w publikacji 2 osiągnęli istotnie większą moc szczytową w przeliczeniu na masę ciała szczupłego kończyn dolnych (PP_{LLM}) oraz większą moc średnią w przeliczeniu na masę ciała szczupłego kończyn dolnych (MP_{LLM}) niż kobiety (p = 0,008). Grupa wytrzymałościowa nie wykazała istotnych różnic międzypłciowych w żadnej ze zmiennych mechanicznych przeliczonych na SMM lub LLM (rycina 4).

Tabela 3. Zmiany parametrów mechanicznych w teście Wingate między pierwszym a drugim terminem badań (publikacja 1)

	Grupa I wytrzymałościowa (n = 17)				Grupa II sportów zespołowych (n = 19)				Grupa III szybkościowa (n = 14)				Dwuczynnikowa analiza wariancji (ANOVA)			
	przed		po		przed		po		przed		po		grupa		termin	
	przed	po	przed	po	przed	po	przed	po	przed	po	przed	po	p	η^2	p	η^2
PP (W)	784 ±95*	772,4 ±88*	853 ±123	860,8 ±101	918 ±106	932 ±143	<0,001	0,244	0,713	0,002	0,536	0,026				
PP (W·kg ⁻¹ BM)	11,5 ±0,9	11,3 ±0,8	11,3 ±1	11,4 ±0,9	11,6 ±1,1	11,8 ±1,2	0,280	0,052	0,735	0,002	0,528	0,026				
PP (W·kg ⁻¹ SMM)	26,4 ±1,9	26 ±1,9	26,6 ±2,2	26,3 ±1,3	26,7 ±3,6	26,4 ±2,1	0,843	0,007	0,424	0,013	0,987	0,000				
MP (W)	698 ±78,7*	697 ±76*	727,6 ±72	750,5 ±81	798,3 ±82	806,4 ±113	0,003	0,216	0,148	0,043	0,324	0,046				
MP (W·kg ⁻¹ BM)	10,2 ±0,7	10,2 ±0,7	9,7 ±0,7	10,0 ±0,7	10,1 ±0,9	10,2 ±0,9	0,194	0,067	0,658	0,004	0,237	0,057				
MP (W·kg ⁻¹ SMM)	23,5 ±1,6	23,5 ±1,7	22,7 ±1	23 ±1,1	23,3 ±3,1	22,9 ±1,5	0,410	0,037	0,874	0,000	0,577	0,023				
FI (W·s ⁻¹)	14,9 ±3,7	14,9 ±5,9*	21,8 ±9,3	21,6 ±8,2	21,5 ±5,2	24,7 ±9,2	<0,001	0,255	0,362	0,017	0,400	0,038				
LA _{REST} (mmol·l ⁻¹)	2,1 ±0,5	1,9 ±0,4	1,9 ±0,5	1,5 ±0,6	2,1 ±0,6	1,9 ±0,6	0,165	0,073	0,002	0,180	0,449	0,033				
LA _{PEAK} (mmol·l ⁻¹)	8,3 ±1,7	8,0 ±1,3	9,8 ±2,1	9,6 ±1,6	9,6 ±1,8	9,8 ±1,7	0,009	0,180	0,410	0,014	0,499	0,029				

PP – moc szczytowa; MP – moc średnia; FI – wskaźnik zmęczenia; LA_{REST} – stężenie mleczanu w spoczynku; LA_{PEAK} – maksymalne stężenie mleczanu; BM – masa ciała; SMM – masa mięśni szkieletowych

* istotnie różne w porównaniu z grupą szybkościową



PP_{SMM} – moc szczytowa na kilogram masy mięśniowej; MP_{SMM} – moc średnia na kilogram masy mięśniowej; PP_{LLM} – moc szczytowa na kilogram masy ciała szczupłego kończyn dolnych; MP_{LLM} – moc średnia na kilogram masy ciała szczupłego kończyn dolnych

* istotna różnica pomiędzy płciami

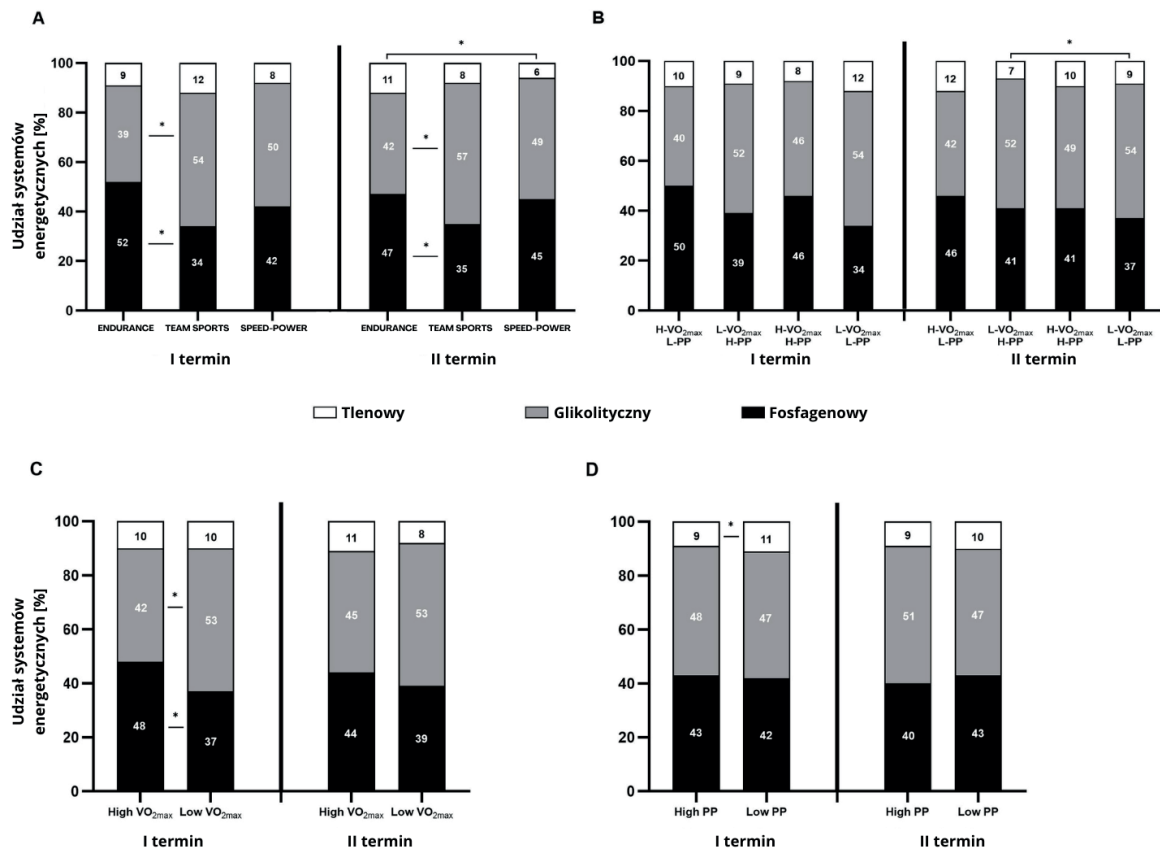
Rycina 4. Porównanie zmiennych mechanicznych między mężczyznami i kobietami w grupach wytrzymałościowej oraz szybkościowej (publikacja 2)

5.3. Różnice w udziale systemów energetycznych między grupami i terminami badań

W publikacji 1 wykazano, że procentowy udział poszczególnych systemów energetycznych różnił się istotnie w obrębie każdej z grup sportowych. We wszystkich grupach sportowych udział systemu tlenowego był najniższy. Udział systemu fosfagenowego nie różnił się istotnie od udziału systemu glikolitycznego w grupie szybkościowej, u zawodników z wysokim $\dot{V}O_2\max$ oraz u zawodników z wysoką mocą szczytową (rycina 5, panele A–D).

Istotne różnice międzygrupowe zaobserwowano w procentowym udziale systemów fosfagenowego i glikolitycznego między grupą wytrzymałościową a grupą sportów zespołowych (rycina 5, panel A) oraz pomiędzy zawodnikami z wysokim i niskim $\dot{V}O_2\max$ (rycina 5, panel C). Udział systemu tlenowego różnicował istotnie grupę wytrzymałościową i grupę szybkościową w drugim terminie badań (rycina 5, panel A), a także zawodników z wysoką i niską wartością PP (rycina 5, panel D).

Jedyną statystycznie istotną różnicę między pierwszym a drugim terminem badań stwierdzono w grupie sportów zespołowych, w której udział systemu tlenowego zmniejszył się o 2% (rycina 5, panel A).

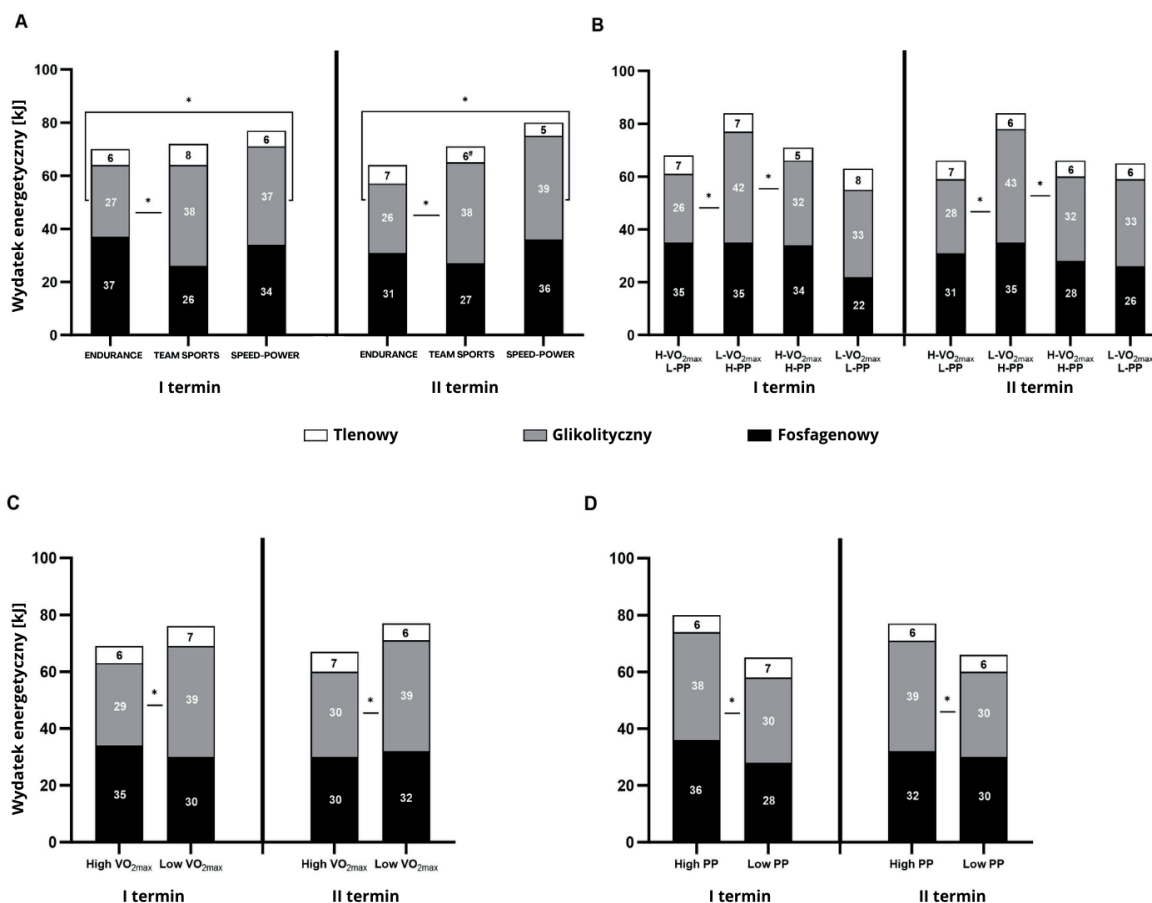


ENDURANCE – grupa wytrzymałościowa; TEAM SPORTS – grupa sportów zespołowych; SPEED-POWER – grupa szybkościowa; H-VO_{2max} / High VO_{2max} – wysoki pułap tlenowy; L-VO_{2max} / Low VO_{2max} – niski pułap tlenowy; H-PP / High PP – wysoka moc szczytowa; L-PP / Low PP – niska moc szczytowa

* istotna różnica pomiędzy grupami

Rycina 5. Udział systemów energetycznych w grupach sportowych (panel A), w grupach podzielonych według kombinacji poziomów $\dot{V}O_{2max}$ i PP (panel B), w grupach podzielonych według poziomu $\dot{V}O_{2max}$ (panel C) oraz w grupach podzielonych według poziomu PP (panel D) (publikacja 1)

Wydatek energetyczny (kJ) dla systemu glikolitycznego różnił się istotnie we wszystkich grupach sportowych. Zarówno w pierwszym, jak i w drugim terminie grupa szybkościowa prezentowała najwyższe, a grupa wytrzymałościowa najniższe wartości w obrębie tego systemu (rycina 6, panel A). Zaobserwowano również istotne różnice w systemie glikolitycznym (kJ) pomiędzy grupą z wysokim $\dot{V}O_{2max}$ i niskim PP a grupą z niskim $\dot{V}O_{2max}$ i wysokim PP oraz grupą z wysokim $\dot{V}O_{2max}$ i wysokim PP (rycina 6, panel B). Dodatkowo, poziomy $\dot{V}O_{2max}$ i PP rozpatrywane odrębnie wiązały się z wydatkiem energetycznym dla systemu glikolitycznego (rycina 6, panele C i D). Szczegółowe wyniki oraz informacje na temat różnic wewnątrzgrupowych, międzygrupowych i między terminami badań są zawarte w tabelach uzupełniających 1–4 w publikacji 1.



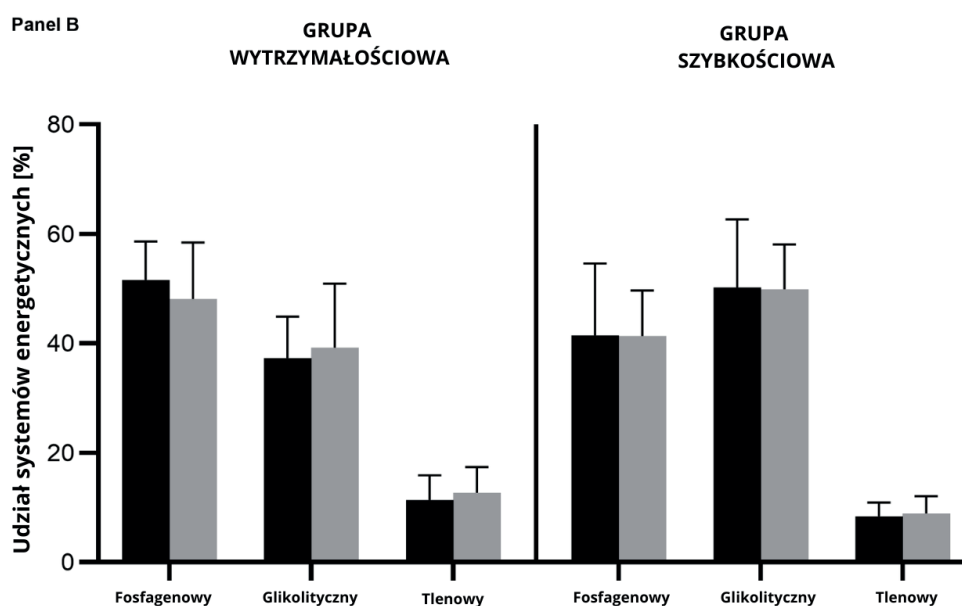
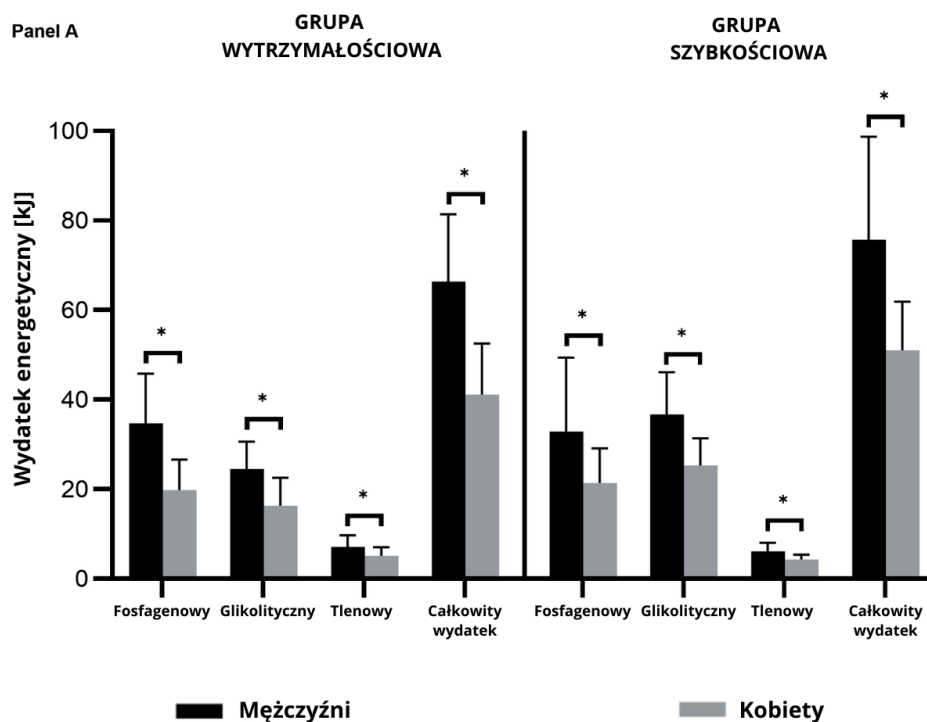
ENDURANCE – grupa wytrzymałościowa; TEAM SPORTS – grupa sportów zespołowych; SPEED-POWER – grupa szybkościowa, H-VO_{2max} / High VO_{2max} – wysoki pułap tlenowy; L-VO_{2max} / Low VO_{2max} – niski pułap tlenowy; H-PP / High PP – wysoka moc szczytowa; L-PP / Low PP – niska moc szczytowa
 * istotna różnica pomiędzy grupami

Rycina 6. Wydatek energetyczny w grupach sportowych (panel A), w grupach podzielonych według kombinacji poziomów VO_{2max} i PP (panel B), w grupach podzielonych według poziomu VO_{2max} (panel C) oraz w grupach podzielonych według poziomu PP (panel D) (publikacja 1)

Wyniki te wskazują na istotny wpływ profilu fizjologicznego i cech wydolnościowych na zróżnicowanie wydatku energetycznego w systemie glikolitycznym, co może odzwierciedlać adaptacje metaboliczne specyficzne dla różnych dyscyplin sportowych oraz poziomów wytrenowania.

5.4. Różnice w udziale systemów energetycznych między płciami

W publikacji 2 wskazano istotne różnice między mężczyznami a kobietami w wydatku energetycznym (kJ) dla wszystkich systemów: fosfagenowego, glikolitycznego, tlenowego oraz w całkowitym wydatku energetycznym. W obu grupach mężczyźni wykazywali istotnie większy wydatek energetyczny niż kobiety (rycyna 7, panel A). Natomiast procentowy udział systemów energetycznych był bardzo podobny u mężczyzn i kobiet – nie stwierdzono istotnych różnic dla żadnego z trzech systemów energetycznych (rycyna 7, panel B). Szczegółowe wartości zostały przedstawione w tabelach 2 i 3 publikacji 2.

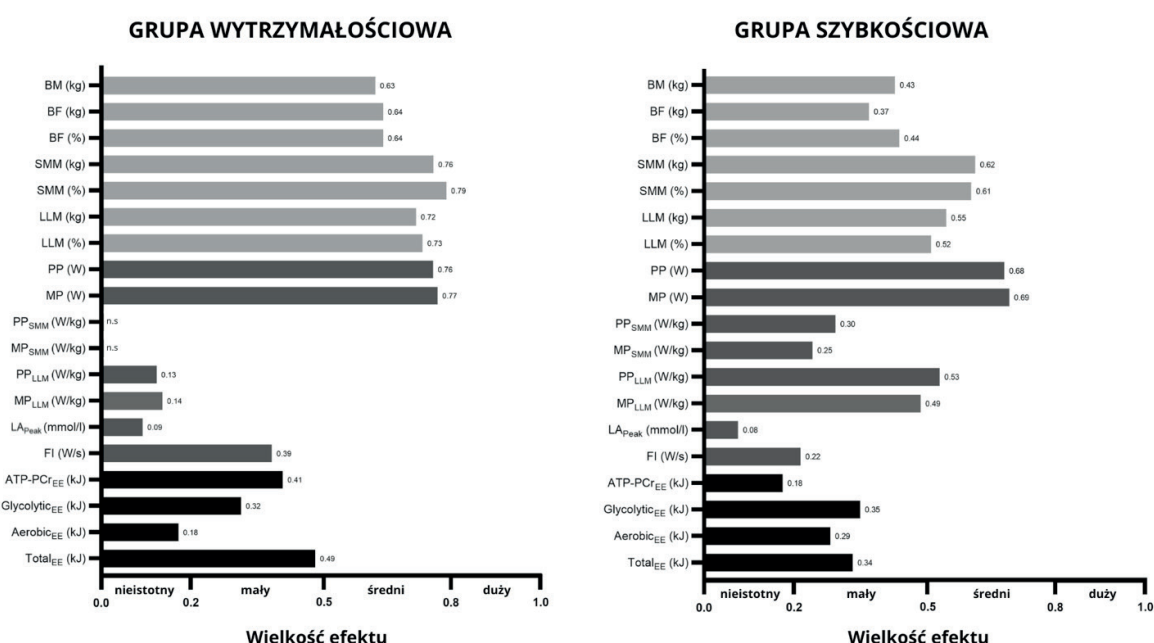


* istotna różnica międzypłciowa

Rycina 7. Wydatek energetyczny dla poszczególnych systemów (panel A) oraz udział procentowy systemów energetycznych (panel B) podczas 15-sekundowego testu o mocy maksymalnej u kobiet i mężczyzn w grupach wytrzymałościowej i szybkościowej (publikacja 2)

Na rycinie 8 przedstawiono profile różnic międzypłciowych dla zmiennych somatycznych, mechanicznych oraz wydatku energetycznego w grupach wytrzymałościowej i szybkościowej. Wyniki zostały wyrażone jako wielkość efektu d Cohena w skali: nieistotny (0–0,2), mały (0,2–0,5), średni (0,5–0,8) lub duży (>0,8). Wielkość efektu we wszystkich zmiennych somatycznych, tj. SMM i LLM, była nieznacznie większa w grupie

wytrzymałościowej niż w grupie szybkościowej. W przypadku zmiennych mechanicznych bezwzględnych (PP i MP) wielkość efektu różnic międzypłciowych była na podobnym (średnim) poziomie w obu grupach sportowych. W przypadku zmiennych mechanicznych względnych (w przeliczeniu na kilogram SMM) wielkość efektu w grupie szybkościowej była na średnim poziomie dla PP_{LLM} , małym dla MP_{LLM} , PP_{SMM} i MP_{SMM} . W grupie wytrzymałościowej PP_{SMM} i MP_{SMM} nie osiągnęły istotności statystycznej (kolejno: $p = 0,130$ i $0,103$). Pomimo istotności statystycznej różnic międzypłciowych dla PP_{LLM} i MP_{LLM} (odpowiednio $p = 0,039$ i $p = 0,037$), wielkość efektu w grupie wytrzymałościowej była mała i znacznie niższa niż w grupie szybkościowej. Wielkość efektu LA_{PEAK} w obu grupach okazała się nieistotna. Wydatek energetyczny dla poszczególnych systemów oraz całkowity wydatek energetyczny (kJ) charakteryzowały się małym efektem różnic międzypłciowych w obu grupach, a dla systemu tlenowego w grupie wytrzymałościowej i systemu fosfagenowego w grupie szybkościowej był to efekt nieistotny.



BM – masa ciała; BF – zawartość tkanki tłuszczowej; SMM – masa mięśni szkieletowych; LLM – masa ciała szczupłego kończyn dolnych; PP – moc szczytowa; MP – moc średnia; PP_{SMM} – moc szczytowa na kilogram masy mięśniowej; MP_{SMM} – moc średnia na kilogram masy mięśniowej; PP_{LLM} – moc szczytowa na kilogram masy ciała szczupłego kończyn dolnych; MP_{LLM} – moc średnia na kilogram masy ciała szczupłego kończyn dolnych; LA_{PEAK} – maksymalne stężenie mleczanu; FI – wskaźnik zmęczenia; ATP-PCr_{EE} – wydatek energetyczny dla systemu fosfagenowego; Glycolytic_{EE} – wydatek energetyczny dla systemu glikolitycznego; Aerobic_{EE} – wydatek energetyczny dla systemu tlenowego; Total_{EE} – całkowity wydatek energetyczny

Rycina 8. Profile wielkości efektów dla różnic w składzie ciała, zmiennych mechanicznych oraz wydatku energetycznym między mężczyznami i kobietami w grupach wytrzymałościowej oraz szybkościowej (publikacja 2)

W obu grupach sportowych zmienne somatyczne znacząco różnicowały kobiety i mężczyzn, osiągając zazwyczaj średnią wielkość efektu (przeciętnie wyższą w grupie wytrzymałościowej). Zmienne mechaniczne (wartości bezwzględne) wykazały podobną, tzn. średnią, wielkość efektu w obu grupach, natomiast wielkość efektu dla wartości względnych różnicowała płcie jedynie w grupie szybkościowej (mały lub średni efekt). W odniesieniu do wydatku energetycznego (kJ) w obu grupach sportowych dominowała mała lub nieistotna wielkość efektu dla różnic międzypłciowych.

6. DYSKUSJA

6.1. Publikacja 1

Hipoteza 1. *Charakter specjalności sportowej obciążeń wiąże się z różnymi proporcjami udziału systemów energetycznych tlenowych i beztlenowych w krótkotrwałym wysiłku o mocy maksymalnej. Sportowcy uprawiający dyscypliny szybkościowe charakteryzują się większym udziałem systemów anaerobowych, szczególnie fosfagenowego, niż sportowcy dyscyplin wytrzymałościowych.*

Paradoksalnie, nie potwierdzono, że grupa szybkościowa wykorzystuje metabolizm beztlenowy w większej proporcji (procentowej) w krótkotrwałym wysiłku o mocy maksymalnej niż grupa wytrzymałościowa, jak zakładano. Ta obserwacja może wpływać na istniejące przekonania i stereotypy, że sportowcy z adaptacją wytrzymałościową nie wykorzystują systemu fosfagenowego w takiej proporcji jak zawodnicy o adaptacji szybkościowej czy mieszanej. Zaobserwowano, że grupa wytrzymałościowa wykazała znacznie wyższy relatywny udział systemu fosfagenowego w porównaniu z grupami sportów zespołowych i szybkościową. Dotychczas opublikowano wyniki tylko jednego badania dotyczącego udziału systemów energetycznych u sportowców wytrzymałościowych wykonujących wysiłek sprinterski. W badaniu przeprowadzonym przez Graniera i in. (1995) porównano sprinterów i biegaczy średniodystansowych w 30-sekundowym teście Wingate. Stosunek systemów beztlenowego do tlenowego oszacowano na 55 : 45% dla biegaczy wytrzymałościowych i 72 : 28% dla sprinterów, podczas gdy u sportowców szybkościowych i wytrzymałościowych analizowanych w niniejszej dysertacji łączny udział w produkcji energii z metabolizmu beztlenowego wynosił ok. 91%. W przeciwieństwie do badań prezentowanych tutaj Granier i in. (1995) nie wykazali istotnych różnic w udziale systemów energetycznych między grupami sportowców. Ta rozbieżność może wynikać m.in. z dłuższego czasu trwania zastosowanego przez nich testu oraz odmiennych metod obliczania udziału systemów energetycznych, z jedynie dwoma głównymi systemami. Shimoyama i in. (2003) badali pływaków wytrzymałościowych i sprinterów (specjalizujących się w dystansach 100 m i 200 m) podczas ciągłego oraz 10-sekundowego pływania interwałowego z różnym czasem regeneracji. Stwierdzono, że relatywny udział systemu beztlenowego był znacząco wyższy u sportowców wytrzymałościowych niż u sprinterów. Wyniki te są zgodne z badaniami Jansson i in. (1990), w których wykazano, że sportowcy z wyższą wydolnością tlenową mogą odznaczać się lepszą zdolnością do resyntezy fosfokreatyny podczas ćwiczeń interwałowych. Sugeruje to, że sportowcy z niższą wydolnością tlenową w większym stopniu korzystają z beztlenowej resyntezy ATP poprzez glikolizę. Zarówno wcześniejsze doniesienia, jak i prezentowane w tej dysertacji mogą wskazywać, że sportowcy wytrzymałościowi mają tendencję do wykorzystywania systemu fosfagenowego w większej proporcji niż glikolitycznego podczas krótkotrwałych wysiłków o mocy maksymalnej. Trening wytrzymałościowy zwiększa mięśniową gęstość kapilar, gęstość mitochondriów w jednostce objętości włókien mięśniowych oraz aktywność enzymów oksydacyjnych, zmniejszając tym samym zakres udziału glikolizy podczas wysiłków o wysokiej intensywności (Green i in. 1984). Uzyskane wyniki mogą świadczyć o tym, że istnieje potencjalne powiązanie z poziomem $\dot{V}O_{2max}$, procentowy udział

systemu fosfagenowego dominował bowiem w grupie z wysokim $\dot{V}O_2\text{max}$, a glikolitycznego w grupie z niskim $\dot{V}O_2\text{max}$. Również w przypadku wydatku energetycznego (kJ) w ramach systemu glikolitycznego były widoczne różnice między grupami o wysokim i niskim $\dot{V}O_2\text{max}$. Zauważono istotnie wyższy udział systemu glikolitycznego wśród zawodników z niższym $\dot{V}O_2\text{max}$.

Udział procentowy systemu glikolitycznego był wyższy u sportowców z grup szybkościowej i mieszanej (odpowiednio ~50% i ~54%) niż w grupie wytrzymałościowej (~38%). Jednym z wyjaśnień tego może być fakt, że sportowcy z grup szybkościowej oraz mieszanej odznaczają się większą zdolnością do produkcji mleczanu pod wpływem wysiłku (Draper i Wood 2005; Granier i in. 1995; Torok i in. 1995) z powodu większej zawartości włókien mięśniowych szybkokurczliwych, powiązanej z wyższymi stężeniami mleczanu (Froese i Houston 1987), wskazującymi na zdolność do produkcji energii poprzez glikolizę (Beneke i in. 2002; Di Prampero i Ferretti 1999). Można założyć, że ze względu na niższą zdolność do produkcji i wykorzystania mleczanu w procesie glikolizy sportowcy wytrzymałościowi polegają bardziej na resyntezie ATP poprzez system fosfagenowy podczas wysiłku o mocy maksymalnej, w trakcie którego system tlenowy, będący ich największym atutem, jest aktywowany jedynie w minimalnym stopniu. Gdy szlaki glikolityczne są mniej rozwinięte, a system tlenowy nie może być w pełni wykorzystany, system fosfagenowy do pewnego stopnia przejmuje ich funkcję jako łatwiej dostępne i tym samym bardziej skuteczne źródło energii podczas krótkotrwałego wysiłku o mocy maksymalnej. Zawodnicy szybkościowi posiadają większą ilość włókien szybkokurczliwych, korzystnych dla krótkich, intensywnych wysiłków. W przeciwieństwie do nich sportowcy wytrzymałościowi charakteryzują się przewagą włókien wolnokurczliwych, które są bardziej efektywne podczas długotrwałych aktywności o niskiej intensywności (Costill i in. 1976; Jansson i in. 1990; Saltin i Gollnick 1983). Ponadto szybkokurczliwe jednostki motoryczne w „białych” mięśniach szkieletowych są przystosowane do intensywnej, krótkotrwałej aktywności, wykorzystującej głównie system glikolityczny w celu produkcji ATP. W konsekwencji podczas intensywnego wysiłku ubytek glikogenu we włóknach szybkokurczliwych jest większy niż we włóknach wolnokurczliwych (Saltin i Gollnick 1983).

Podsumowując, sportowcy z długotrwałą adaptacją o charakterze wytrzymałościowym w większym stopniu (w większej proporcji) polegają na resyntezie ATP poprzez system fosfagenowy niż glikolizę podczas krótkotrwałego wysiłku o mocy maksymalnej. Grupy o adaptacji mieszanej i wytrzymałościowej wykazały rozbieżności w udziale systemów fosfagenowego i glikolitycznego. System glikolityczny dominował w grupie sportów zespołowych, podczas gdy udział obu systemów był podobny u sportowców szybkościowych. Wydaje się, że te dwa składniki metabolizmu beztlenowego są lepiej zrównoważone w grupie szybkościowej, co może być związane z długoterminową, specyficzną adaptacją obejmującą wysiłki sprinterskie o czasie trwania podobnym jak w zastosowanym teście. Grupa zawodników sportów zespołowych składała się z piłkarzy, których wysiłek meczowy polega na wielokrotnym powtarzaniu intensywnych wysiłków przeplatanych przerwami o nieprzewidywalnym czasie trwania (Dolci i in. 2020). Jednak 90% przyspieszeń to wysiłki trwające poniżej 5 sekund (Andrzejewski i in. 2013). W związku z tym zawodnicy sportów drużynowych, zaadaptowani do tego typu bodźców, częściej wykorzystują system glikolityczny w celu wytwarzania energii do aktywności mięśni szkieletowych. Trening zawodników w dyscyplinach wytrzymałościowych opiera się na długotrwałych wysiłkach poniżej maksymalnej intensywności, dlatego resynthese ATP poprzez system glikolityczny jest mniej rozwinięta, a system fosfagenowy stanowi źródło rezerwowe podczas krótkotrwałego wysiłku o mocy maksymalnej, gdy jest zbyt mało czasu na pełne uruchomienie systemu tlenowego.

Hipoteza 2. Udział systemów energetycznych w krótkotrwałym wysiłku o mocy maksymalnej u sportowców zmienia się w odpowiedzi na trwający proces treningowy. Specyficzne adaptacje zależą od fazy treningowej oraz rodzaju uprawianej dyscypliny sportowej.

Zaprezentowane wyniki nie wykazały, że u sportowców wyczynowych proporcje systemów energetycznych zmieniają się w trakcie bieżącego treningu. Niezależnie od przyjętego podziału uczestników badania wszystkie grupy utrzymywały podobne proporcje systemów energetycznych pomiędzy pierwszym a drugim terminem badań w podokresie przygotowania ogólnego rocznego cyklu. Można przypuszczać, że po latach specyficznego treningu wyczynowego i osiągnięciu wysokiego poziomu wytrenowania systemy energetyczne są już ukształtowane i nie reagują na standardowe bodźce treningowe.

Zaobserwowano jedynie 2-procentowy spadek udziału systemu tlenowego w grupie piłkarzy amatorów, ale żadne istotne zmiany nie zostały odnotowane u sportowców na poziomie krajowym i międzynarodowym. Inne badania wskazują, że długotrwały trening prowadzi do specyficznych adaptacji, stabilizujących odpowiedzi metaboliczne i fizjologiczne z powodu kilku czynników: ograniczeń genetycznych (Costa i in. 2012), długoterminowej specyficznej adaptacji do treningu (Mujika i Padilla 2001), optymalizacji typów włókien mięśniowych w zależności od dyscypliny sportowej (Ross i Leveritt 2001; Zierath i Hawley 2004) oraz zmian w aktywności enzymatycznej (Harmer i in. 2000; Hawley, 2002). Na przykład sportowcy wytrzymałościowi utrzymują swoją maksymalną wydolność tlenową i efektywność metaboliczną na względnie stałym poziomie nawet przy zmianach intensywności lub czasu trwania treningu (Barbieri i in. 2024). U sprinterów na najwyższym poziomie zaobserwowano jedynie niewielkie różnice w poziomie wydolności beztlenowej, bez znaczących zmian w prędkości biegu, wysokości skoku oraz maksymalnej mocy (Loturco i in. 2023). Profil energetyczny sportowca może być tym mniej podatny na zmiany, im dłużej trwa kariera sportowa i związane z nią kumulujące się systematyczne bodźce treningowe. Niewykluczone, że u osób niewytrenowanych, o niższym poziomie wyjściowym sprawności fizycznej i adaptacji, udział systemów energetycznych zmieniałby się znacząco wraz z zastosowaniem silnych bodźców treningowych. Ten aspekt wymaga dalszych badań.

Zaobserwowany brak istotnych zmian w proporcjach systemów energetycznych może również wynikać z charakteru analizowanej fazy treningowej, tj. podokresu przygotowania ogólnego. Zawodnicy większości dyscyplin sportowych skupiają się wówczas na wszechstronnej sprawności fizycznej, sile i wytrzymałości, z mniejszym naciskiem na specjalistyczne obciążenia treningowe. W szczególności stosowane są obciążenia wytrzymałościowe i siłowe, a nie ćwiczenia szybkościowo-siłowe, które stanowią podstawę dla testów mocy maksymalnej. Brak specyficznych bodźców treningowych mógł być zatem powodem niezmiennego udziału systemów energetycznych wśród wysoko wytrenowanych sportowców wytrzymałościowych i szybkościowych w prezentowanym badaniu. W poprzednich badaniach wykazano jednakże, iż poziom biomarkerów we krwi związanych z metabolizmem energetycznym (np. hipoksantyna, amoniak oraz enzym fosforybozylotransferaza hipoksantynowo-guaninowa) u wysoko wytrenowanych sportowców zmieniał się znacząco już w podokresie przygotowania ogólnego (Pospieszna i in. 2019; Włodarczyk i in. 2020; Zieliński i Kusy 2015). Wydaje się mało prawdopodobne, by wielotygodniowy i regularny trening analizowany w badaniach opisanych w niniejszej rozprawie nie spowodował żadnych adaptacji metabolicznych, niezależnie od rodzaju obciążenia. A zatem to raczej specyficzna wieloletnia adaptacja, a nie charakter podokresu treningowego decyduje o braku istotnych zmian w udziale systemów energetycznych.

6.2. Publikacja 2

Hipoteza 3. Istnieją różnice międzypłciowe w udziale systemów energetycznych podczas krótkotrwałego wysiłku o mocy maksymalnej, które determinowane są specjalnością sportową.

Zaobserwowano znaczące różnice międzypłciowe w wartościach bezwzględnych (kJ) produkcji energii w ramach wszystkich systemów w grupach sportowych o odmiennych specjalizacjach – wytrzymałościowej i szybkościowej (rycina 7, panel A). Niemniej jednak procentowy udział trzech systemów energetycznych nie różnił się między mężczyznami a kobietami w żadnej z grup sportowych (rycina 7, panel B). Uzyskane wyniki są zgodne z badaniami Tortu i in. (2024a, 2024b) oraz Duffielda i in. (2004), którzy wykazali znaczące różnice między płciami w całkowitym wydatku energetycznym, ale nie w procentowym udziale systemów energetycznych. Z jednej strony, mężczyźni posiadają większą zdolność do produkcji niezbędnego ATP podczas sprintu o wysokiej intensywności, co może skutkować zwiększonym udziałem energii pochodzącej z systemu fosfagenowego (Perez-Gomez i in. 2008). Jak wynika z poprzednich doniesień, różnice międzypłciowe są również widoczne w pojemności anaerobowej oraz aktywności enzymów glikolitycznych, takich jak fosfofruktokinaza (PFK), której aktywność u mężczyzn jest o ok. 15–29% wyższa, jak i dehydrogenazy mleczanowej (LDH) (Green i in. 1984; Jaworowski i in. 2002; Komi i Karlsson 1978; Simoneau i Bouchard 1989). Z drugiej strony, udowodniono, że różnice międzypłciowe w aktywności LDH i PFK mogą zanikać po normalizacji na przekrój poprzeczny mięśni (Jaworowski i in. 2002). Prawdopodobnie różnice w wydatku energetycznym sportowców rozpatrywanych w tej dysertacji wynikają głównie z różnic w masie ich mięśni szkieletowych, o czym świadczy fakt, że efekt płci zanikł po wprowadzeniu SMM jako kowariantu. W badaniach przeprowadzonych przez Marrę i in. (2021) wykazano, że uwzględnienie SMM powoduje zmniejszenie różnic międzypłciowych w wydatku energetycznym, co wspiera tezę, że to SMM, a nie płeć sama w sobie jest krytycznym czynnikiem determinującym zapotrzebowanie i wydatek energetyczny. Massini i in. (2021) nie wykazali różnic między mężczyznami a kobietami w udziale systemów energetycznych na dystansach 50 m i 100 m w pływaniu. Jest to również zgodne z wynikami badań Almeidy i in. (2020), którzy zasugerowali, że procentowy udział energetyczny systemów podczas krótkich i średnich dystansów w pływaniu nie różni się między płciami w przeliczeniu na jednostkę masy ciała. Hallam i Amorim (2022) sugerują, że różnice międzypłciowe są większe przy niższych poziomach wydolności. Taką tezę wspierają Yang i in. (2022), którzy wykazali znaczące różnice międzypłciowe wśród rekreacyjnie aktywnych osób podczas stopniowanego testu na bieżni, ale nie wśród sportowców. Sugeruje to, że różnice międzypłciowe obserwowane we wcześniejszych badaniach (Green i in. 1984; Murphy i in. 1986) są związane z brakiem silnej, specyficznej adaptacji treningowej, podczas gdy wysoki status treningowy w sporcie wyczynowym niweluje te różnice.

Dodatkowo, w niniejszym badaniu wielkość różnic między płciami w wydatku energetycznym (kJ) dla systemu fosfagenowego była większa w grupie wytrzymałościowej niż w grupie szybkościowej. Można to przypisać specyfice treningu, który w grupie szybkościowej wymaga podobnego zaangażowania tego szlaku metabolicznego u obu płci, co skutkuje mniejszymi różnicami bezwzględnej produkcji energii w tym kluczowym dla sprintu systemie.

Specyfika dyscypliny sportu może również skutkować różnicami w zakresie dominacji i aktywacji jednostek motorycznych szybko kurczliwych. W przypadku grupy szybkościowej wysiłki o maksymalnej intensywności wymagają rekrutacji szybko kurczliwych jed-

nostek motorycznych w zbliżonym stopniu zarówno u kobiet, jak i u mężczyzn. Może to prowadzić do redukcji różnic międzypłciowych w wydatku energetycznym w tej grupie, ze względu na porównywalne zaangażowanie kluczowego systemu fosfagenowego. W badaniu Esbjörnsson-Liljedahl i in. (1999) nie stwierdzono znaczących różnic płciowych w redukcji ATP, fosfokreatyny i glikogenu we włóknach typu II, sugerując podobny poziom rekrutacji tych włókien podczas sprintu u obu płci. Z kolei sportowcy wytrzymałościowi w mniejszym stopniu polegają na systemie fosfagenowym w swoim reżimie treningowym i rywalizacji, co prowadzi do większego zróżnicowania. Analogicznie wielkość różnic międzypłciowych dla wydatku energetycznego w systemie tlenowym była mniejsza w grupie wytrzymałościowej, gdzie z kolei wydolność tlenowa jest kluczowym czynnikiem sukcesu sportowego. Obie grupy sportowe wykazały niemal równe wielkości efektu dla różnic międzypłciowych w zakresie wydatku energetycznego w ramach systemu glikolitycznego. Jednakże – pomimo istotnych różnic – wielkości efektów w wydatku energetycznym były małe lub nieistotne w obu grupach.

Możliwe, że długoterminowa adaptacja do silnych bodźców treningowych prowadzi do zmniejszania się różnic międzypłciowych w udziale systemów energetycznych. W populacji ogólnej płeć może odgrywać większą rolę w udziale systemów energetycznych z powodu większej zmienności wśród osób bez specyficznej adaptacji (Yang i in. 2022). Pomimo różnic w zakresie zmiennych somatycznych i mechanicznych sportowcy obu płci ze specyficznymi adaptacjami wykazują równe proporcje udziału systemów energetycznych. Dlatego też – z praktycznego punktu widzenia – stosowanie w procesie treningowym obciążeń o tym samym charakterze powinno przynosić równoważne efekty metaboliczne u sportowców wyczynowych obu płci w tej samej specjalności sportowej. Wydaje się, że specjalizacja sportowa, wraz z powiązanymi z nią predyspozycjami i adaptacjami metabolicznymi, silniej determinuje procentowy udział systemów energetycznych niż sama płeć biologiczna sportowca.

Podsumowując, jeśli sportowcy płci męskiej i żeńskiej prezentują ten sam poziom sportowy, powinniśmy oczekiwać tego samego procentowego udziału systemów energetycznych podczas krótkotrwałego wysiłku o mocy maksymalnej. Ewidentne różnice między płciami w bezwzględnym wydatku energetycznym podczas takiego wysiłku wynikają głównie z różnic w masie mięśni szkieletowych. Dane uzyskane w niniejszych badaniach są ograniczone do grup sportowych (wytrzymałościowej i szybkościowej) podczas fazy przygotowania ogólnego rocznego cyklu treningowego – w związku z tym wyników tych nie można odnosić do osób niewytrenowanych.

7. WNIOSKI

Udział systemów energetycznych podczas krótkotrwałego wysiłku o mocy maksymalnej jest związany ze specjalizacją sportową i wynikającym z niej profilem metabolicznym, przy czym poziom wydolności tlenowej stanowi istotny czynnik dyskryminujący.

Udział systemów energetycznych nie zmienia się znacząco w odpowiedzi na proces treningowy u zawodników z utrwaloną adaptacją treningową. Niniejsze badania sugerują, że to specyficzne długoterminowe adaptacje treningowe są odpowiedzialne za udział systemów energetycznych podczas krótkiego wysiłku o mocy maksymalnej u sportowców wyczynowych, a wpływ bieżących bodźców treningowych jest ograniczony.

Proporcje procentowe udziału systemów energetycznych są podobne wśród kobiet i mężczyzn o tej samej specjalizacji sportowej. Dlatego też, pomimo ewidentnych różnic w bezwzględnych wydatkach energetycznych, relatywny efekt metaboliczny w udziale systemów energetycznych jest podobny u sportowców płci męskiej i żeńskiej. Wynika stąd, że te same proporcje udziału systemów energetycznych podczas wysiłku mogą być uzyskiwane na bazie innych predyspozycji strukturalnych i funkcjonalnych uwarunkowanych płcią. Przy tym wielkość i profil różnic międzypłciowych w zakresie charakterystyk somatycznych i mechanicznych związanych z wydajnością w krótkotrwałym wysiłku o mocy maksymalnej są zróżnicowane pomiędzy specjalnościami sportowymi.

8. IMPLIKACJE PRAKTYCZNE

Profil udziału systemów energetycznych uzyskany podczas specyficznego 15-sekundowego maksymalnego wysiłku może służyć jako dodatkowe narzędzie diagnostyczne do oceny predyspozycji do określonej dyscypliny sportowej, najlepiej odpowiadającej zdolnościom metabolicznym danej osoby. Wyniki te mogą dostarczyć trenerom i naukowcom podstaw do fizjologicznej klasyfikacji sportowców, co pozwala na wybór odpowiedniej dyscypliny na wczesnym lub późniejszym etapie treningu. Ponadto, poprzez powtarzane testowanie konkretnych zawodników trenerzy zdołają poznać ich profil energetyczny, co umożliwi określenie optymalnych proporcji systemów energetycznych w rocznym cyklu treningowym zarówno w teście maksymalnego wysiłku, jak i podczas wysiłków specyficznych dla danej dyscypliny sportowej. Dodatkowo nie da się wykluczyć, że profil energetyczny przez całą karierę sportową jest stosunkowo stały, a jego modyfikowalność niewielka, może więc stanowić podstawę selekcji do sportu.

Uzyskane wyniki sugerują ponadto, że strategie treningowe ukierunkowane na metabolizm energetyczny podczas krótkotrwałych wysiłków o mocy maksymalnej powinny uwzględniać specyficzne wymagania danej dyscypliny sportu oraz skład ciała (szczególnie masę mięśniową), zamiast opierać się na uogólnieniach dotyczących płci. Mimo że całkowity wydatek energetyczny, skład ciała i parametry mechaniczne kobiet i mężczyzn różnią się istotnie, procentowy udział systemów energetycznych podczas krótkotrwałych wysiłków o mocy maksymalnej u mężczyzn i kobiet w danej specjalności sportowej jest niemal identyczny.

Przyszłe badania powinny również uwzględnić osoby niewytrenowane oraz sportowców w kolejnych fazach rocznego cyklu treningowego (podokres przygotowania specjalnego, okres startowy) w celu zbadania potencjalnych zmian w udziale systemów energetycznych. Może to ułatwić identyfikację profilu metabolicznego i jego zmian u sportowca, umożliwiając wybór lub korektę specjalności sportowej zgodnie z predyspozycjami oraz precyzyjniejsze planowanie treningu.