

mgr Jacek Trinschek

Rozprawa doktorska

**Maksymalny pobór tlenu w relacji do masy
mięśniowej u sportowców wyczynowych
w rocznym cyklu treningowym**



Akademia Wychowania Fizycznego
im. Eugeniusza Piaseckiego w Poznaniu

Promotor

prof. AWF dr hab. Krzysztof Kusy

Poznan University of Physical Education

Jacek Trinschek MSc

Doctoral dissertation

**Maximal oxygen uptake adjusted for
skeletal muscle mass in competitive athletes
during a one-year training cycle**



Supervisor

Assoc. Prof. Dr Habil. Krzysztof Kusy

Poznań 2022

Spis treści / Contents

I. AUTOREFERAT.....	7
1. WSTĘP.....	7
2. CEL BADAŃ I HIPOTEZY	10
3. METODY BADAWCZE	11
3.1 Uczestnicy badań.....	11
3.2 Schemat badań.....	11
3.3 Pomiary składu ciała.....	12
3.4 Próba wysiłkowa.....	13
3.5 Pobieranie i analiza krwi.....	13
3.6 Analiza statystyczna	13
4. WYNIKI.....	14
4.1 Skład ciała w grupach sportowych w rocznym cyklu.....	14
4.2 Wskaźniki maksymalnego poboru tlenu – porównanie grup sportowych i podokresów.....	15
4.3 Maksymalny pobór tlenu kobiet i mężczyzn	15
4.4 Skład ciała kobiet i mężczyzn.....	15
4.5 Wskaźniki krążeniowo-oddechowe i hematologiczne kobiet i mężczyzn.....	17
4.6 Wielkość różnic międzypłciowych.....	17
5. DYSKUSJA	18
5.1 Główne ustalenia	18
5.2 Hipoteza 1.....	19
5.3 Hipoteza 2.....	20
5.4 Hipoteza 3.....	21
5.4.1 Skład ciała.....	21
5.4.2 Czynniki krążeniowo-oddechowe	22
5.4.3 Zdolność krwi do transportu tlenu.....	23
5.5 Hipoteza 4.....	23
5.6 Mocne strony i ograniczenia badań	25
6. WNIOSKI	26
6.1 Implikacje praktyczne.....	26

II. DISSERTATION SUMMARY	28
1. INTRODUCTION.....	28
2. AIMS AND HYPOTHESES.....	31
3. METHODS.....	31
3.1 Participants	31
3.2 Study design	32
3.3 Body Composition and Skeletal Muscle Mass	32
3.4 Maximum Oxygen Uptake	33
3.4 Hematological parameters	33
3.5 Statistical Analysis	33
4. RESULTS.....	34
4.1 Body composition in athletic groups in one-year cycle	34
4.2 Maximum oxygen uptake indicators: Comparison within athletic groups and training phases.	35
4.3 Maximum oxygen uptake in female and male athletes	36
4.4 Body composition in female and male athletes.....	36
4.5 Cardiopulmonary and hematological parameters in female and male athletes	36
4.6 Size of the sex differences.....	36
5. DISCUSSION	38
5.1 Main findings	38
5.2 Hypothesis 1.....	38
5.3 Hypothesis 2.....	39
5.4 Hypothesis 3.....	40
5.4.1 Body composition	40
5.4.2 Cardiopulmonary factors.....	41
5.4.3 Oxygen-carrying capacity of the blood.....	41
5.5 Hypothesis 4.....	42
5.6 Strengths and limitations.....	44
6. CONCLUSIONS.....	45
6.1 Practical implications.....	45
III. Pómiennictwo / References	47
IV. Streszczenie / Abstract	50
V. Publikacje i oświadczenia współautorów / Publications and co-authors' declarations	52

I. AUTOREFERAT

Niniejsza rozprawa doktorska została przygotowana w formie cyklu publikacji pod wspólnym tytułem: „Maksymalny pobór tlenu w relacji do masy mięśniowej u sportowców wyczynowych w rocznym cyklu treningowym”, na który składają się dwa artykuły opublikowane w ramach projektu naukowego finansowanego z grantu OPUS 14 (nr 2017/27/B/NZ7/02828) Narodowego Centrum Nauki:

1. Trinschek J, Zieliński J, Kusy K. *Maximal oxygen uptake adjusted for skeletal muscle mass in competitive speed-power and endurance male athletes: changes in a one-year training cycle*. International Journal of Environmental Research and Public Health, 2020, 17(17): 6226. doi: 10.3390/ijerph17176226.; PMID: 32867179; PMCID: PMC7504314.; Impact Factor – 3.390, Punktacja MEiN – 140 pkt.

2. Trinschek J, Zieliński J, Zarębska EA, Kusy K. *Male and female athletes matched for maximum oxygen uptake per skeletal muscle mass: Equal but still different*. Journal of Sports Medicine and Physical Fitness, 2022, Online First, Mar 01. doi: 10.23736/S0022-4707.22.13605-4.; PMID: 35230070.; Impact Factor – 1.637, Punktacja MEiN – 40 pkt.

1. WSTĘP

Maksymalny pobór tlenu ($\dot{V}O_2\max$) jest powszechnie stosowanym wskaźnikiem maksymalnej wydolności tlenowej. Określa on największą objętość tlenu, jaką organizm jest w stanie wykorzystać w jednostce czasu, czyli najwyższe możliwe tempo poboru tlenu u danej osoby [Bassett i Howley 2000, Hill i wsp. 1924, Ranković i wsp. 2010, Sadowska i wsp. 2017, Wilmore i wsp. 2004]. Poziom $\dot{V}O_2\max$ jest wyrażany standardowo w wartościach absolutnych (ml/min) lub względem całkowitej masy ciała (ml/min/kg). Rzadziej można spotkać $\dot{V}O_2\max$ określony w mililitrach na kilogram masy ciała szczupłego (LBM) na minutę [Cureton 1981, Diaz-Canestro i wsp. 2021, Montero i wsp. 2018, Proctor i Joyner 1997, Sparling i Cureton 1983, Wells i Plowman 1983], a jedynie sporadycznie w przeliczeniu na kilogram masy mięśni szkieletowych (SMM) [Beekley i wsp. 2006, Proctor i Joyner 1997, Sanada i wsp. 2005]. Mała powszechność wskaźnika $\dot{V}O_2\max/SMM$ w praktyce sportowej wynika z jednej strony z trudności metodologicznych i technicznych w dokładnym oszacowaniu SMM, a z drugiej z braku wiedzy na temat informacji, jaką może nieść dla trenera i zawodnika taki sposób przedstawienia tego ważnego parametru fizjologicznego.

Masa mięśniowa, która jest głównym składnikiem beztłuszczowej masy ciała [Kim i wsp. 2002], ma zasadnicze znaczenie dla wyników sportowych [Andreato i wsp. 2010, Delaney i wsp. 2016, González-Mendoza i wsp. 2019, Martín-Matillas i wsp. 2014, Proctor i Joyner 1997]. Poprzez regularny trening mięśnie adaptują się do wysiłków i są w stanie pobierać większą ilość tlenu w jednostce czasu [Beekley i wsp. 2006, Farinatti i wsp. 2011, Proctor i Joyner 1997, Sanada i wsp. 2004]. Zawodnicy trenujący sporty wytrzymałościowe charakteryzują się większą ilością wolnokurczliwych włókien mięśniowych, większą gęstością i rozmiarami mitochondriów oraz lepszą kapilaryzacją mięśni, umożliwiającą wydajniejszy przepływ krwi w mięśniach [Andersen i Henriksson 1977, Holloszy i Coyle 1984, Torok i wsp. 1995, Zwaard i wsp. 2018]. Adaptacje w zakresie specyficznych mechanizmów biochemicznych i molekularnych przyczyniają się do modyfikacji aktywności metabolicznej tkanki tłuszczowej oraz wzrostu aktywności enzymów mitochondrialnych, w tym enzymów szlaku utleniania kwasów tłuszczowych, cyklu cytrynianowego i łańcucha oddechowego [Andersen i Henriksson 1977, Holloszy i Coyle 1984].

Do tej pory tylko w kilku badaniach podejmowano próby oceny $\dot{V}O_2\max$ w powiązaniu z SMM, wykorzystując najbardziej zaawansowane metody jej szacowania, takie jak rezonans magnetyczny czy absorpcjometria promieniowania rentgenowskiego o podwójnej energii [Beekley i wsp. 2006, Proctor i Joyner 1997, Sanada i wsp. 2005]. Beekley i wsp. [2006] wykazali silną zależność pomiędzy absolutnymi wartościami SMM (kg) i $\dot{V}O_2\max$ (l/min) u sportowców wyczynowych. Zauważyli, że powyżej pewnego poziomu SMM (~45 kg) zależność ta słabła, a pułap zdolności aerobowych sportowców osiągał plateau. Sugerowali oni, że aby lepiej porównać $\dot{V}O_2\max$ wśród zawodników różniących się zawartością tkanki tłuszczowej i masą ciała należy wyrazić $\dot{V}O_2\max$ w przeliczeniu na SMM, co pozwoli uzyskać dokładniejszą informację o maksymalnej wydolności tlenowej. Sanada i wsp. [2004] wykazali silną korelację między SMM a poziomem $\dot{V}O_2\max$ u pływaków na poziomie amatorskim. Według nich maksymalna wydolność tlenowa w przeliczeniu na SMM może być bardziej odpowiednim wskaźnikiem niż całkowita masa ciała w ocenie wydolności tlenowej, ponieważ różnice lub zmiany całkowitej masy ciała mogą mieć znaczny wpływ na uzyskiwane wartości $\dot{V}O_2\max$. Proctor i Joyner [1997] wykazali, że zmniejszenie wydolności aerobowej na kilogram SMM wiązało się także ze zmniejszeniem $\dot{V}O_2\max$ w przeliczeniu na kilogram całkowitej masy ciała. Sformułowano pogląd, że u wysoko wytrenowanych sportowców, w celu uzyskania dokładniejszych i bardziej wiarygodnych informacji o zmianach wydolności tlenowej, należy brać pod uwagę nie tylko standardowe miary $\dot{V}O_2\max$, ale także pobór tlenu w przeliczeniu na SMM [Beekley i wsp. 2006]. Powszechnie stosowane odniesienie $\dot{V}O_2\max$ do masy ciała nie zawsze w pełni odzwierciedla status treningowy zawodnika i związane z tym mechanizmy

adaptacyjne. Nie jest bowiem jasne, czy wzrost lub spadek $\dot{V}O_{2max}$ wynika ze zmiany całkowitej masy ciała lub jego komponentów, np. masy tkanki tłuszczowej, czy też z faktycznych zmian adaptacyjnych kształtujących mechanizmy warunkujące $\dot{V}O_{2max}$, w tym w mięśniach szkieletowych, które są głównym odbiorcą tlenu podczas wysiłku [Basset i Howley 2000].

Maksymalny pobór tlenu u człowieka jest ograniczony przez cztery główne grupy czynników fizjologicznych: pojemność dyfuzyjną płuc, pojemnością minutową serca, zdolność krwi do przenoszenia tlenu oraz właściwości mięśni szkieletowych [Basset i Howley 2000, Shete i wsp. 2014]. Czynniki te determinują również różnice międzypłciowe w poziomie $\dot{V}O_{2max}$. Ponadto dwa zasadnicze komponenty ciała, czyli masa mięśni oraz tkanki tłuszczowej, w istotny sposób przyczyniają się do różnic międzypłciowych w wartościach $\dot{V}O_{2max}$ uzyskiwanych podczas testów wysiłkowych [Diaz-Canestro i wsp. 2021, Diaz-Canestro i wsp. 2022, Montero i wsp. 2018, Sparling i Cureton 1983, Wells i Plowman 1983]. Generalnie sportowcy płci męskiej charakteryzują się większą absolutną masą mięśni szkieletowych i przez to większym poborem tlenu, ale mniejszą zawartością tkanki tłuszczowej niż kobiety uprawiające tę samą dyscyplinę sportu na podobnym poziomie. Już ten powszechnie znany aspekt dymorfizmu płciowego sam w sobie skutkuje „niekorzystnym przelicznikiem” poboru tlenu u kobiet, niezależnie od innych czynników różnicujących wydolność tlenową obu płci.

Co ważne, Proctor i Joyner [1997] zaobserwowali niemal identyczny poziom $\dot{V}O_{2max}$ w przeliczeniu na SMM u mężczyzn i kobiet trenujących wytrzymałościowo. Sugeruje to, że w tym samym wieku oraz przy podobnym profilu i poziomie wytrenowania różnice międzypłciowe w poziomie $\dot{V}O_{2max}$ nie są zależne od czynników związanych z właściwościami mięśni szkieletowych, których potencjał poboru tlenu wydaje się bardzo zbliżony u obu płci. Stąd badania kobiet i mężczyzn o wysokim poziomie wytrenowania i takiej samej wartości $\dot{V}O_{2max}/SMM$ (jako wskaźnika „tlenowej wydajności” mięśni szkieletowych) mogą rzucić dodatkowe światło na wpływ masy mięśniowej i pozostałych czynników na $\dot{V}O_{2max}$. Jednak dotychczasowe wyniki badań nad różnicami międzypłciowymi w zakresie $\dot{V}O_{2max}$ i warunkującymi je czynnikami nie są w pełni zadowalające ze względu na brak precyzyjnych kryteriów doboru zawodniczek i zawodników [Cureton 1981, Cureton i wsp. 1986, Sparling i Cureton 1983, Wells i Plowman 1983]. W celu dokonania trafniejszych i dokładniejszych porównań bardziej właściwy wydaje się dobór celowy, bazujący na niemal jednakowym $\dot{V}O_{2max}/SMM$ obu płci jako podstawowym kryterium. Jako kryteria włączenia do badań porównywanych kobiet i mężczyzn stosowano dotąd zazwyczaj profil i staż treningowy oraz $\dot{V}O_{2max}$ wyrażony w standardowych miarach [Cureton 1981, Diaz-Canestro

i wsp. 2021, Montero i wsp. 2018, Sparling i Cureton 1983, Wells i Plowman 1983], a tylko sporadycznie $\dot{V}O_2\text{max}$ w przeliczeniu na masę mięśniową [Beekley i wsp. 2006, Proctor i Joyner 1997, Sanada i wsp. 2004]. Jak się wydaje, nie porównywano dotychczas wyczynowych sportowców płci żeńskiej i męskiej przy użyciu $\dot{V}O_2\text{max}$ w przeliczeniu na SMM. Taka próba może dostarczyć bardziej precyzyjnych informacji o wielkości różnic międzypłciowych w zakresie głównych czynników ograniczających $\dot{V}O_2\text{max}$, w tym tych związanych z SMM. Ponadto przeciwstawienie wyczynowych sportowców szybkościowo-siłowych i wytrzymałościowych, a więc reprezentujących odmienne profile treningowe i związane z nimi adaptacje fizjologiczne może zilustrować, w jakim stopniu różnice między płciami w zakresie czynników ograniczających $\dot{V}O_2\text{max}$ są uniwersalne, a w jakim zależą od specyfiki uprawianej dyscypliny sportowej.

W tej dysertacji, w związku z wyżej nakreślonymi problemami badawczymi, (1) analizowano zmiany $\dot{V}O_2\text{max}/\text{SMM}$ u sportowców wyczynowych odmiennych specjalności w rocznym cyklu treningowym oraz (2) podjęto próbę porównania czynników ograniczających $\dot{V}O_2\text{max}$ u kobiet i mężczyzn uprawiających sport wyczynowo z uwzględnieniem masy mięśni szkieletowych. Dla uzyskania jak najlepszej jakości pomiarów zastosowano metodę absorpcjometrii promieniowania rentgenowskiego o dwóch energiach (DXA, ang. *dual x-ray absorptiometry*), która charakteryzuje się bardzo wysoką trafnością i rzetelnością.

2. CEL BADAŃ I HIPOTEZY

Celem badań była ocena poziomu i zmian maksymalnego poboru tlenu w przeliczeniu na jednostkę masy mięśniowej u sportowców wyczynowych odmiennych specjalności w rocznym cyklu treningowym (publikacja 1) oraz ocena wielkości różnic międzypłciowych w zakresie głównych czynników ograniczających $\dot{V}O_2\text{max}$ z uwzględnieniem masy mięśni szkieletowych (publikacja 2).

Hipotezy badawcze:

1. $\dot{V}O_2\text{max}$ w przeliczeniu na SMM zmienia się w rocznym cyklu treningowym według innego wzorca niż $\dot{V}O_2\text{max}$ w przeliczeniu na całkowitą masę ciała (publikacja 1).
2. Wielkość różnic w poziomie maksymalnej wydolności tlenowej między wyczynowymi zawodnikami sportów wytrzymałościowych i szybkościowo-siłowych oraz grupą kontrolną jest zależna od rodzaju zastosowanego wskaźnika (przeliczenie na całkowitą masę ciała vs. przeliczenie na SMM) (publikacja 1).

3. Zawodniczki oraz zawodnicy o bardzo zbliżonym $\dot{V}O_2\max$ w przeliczeniu na SMM, reprezentujący podobny staż i stan wytrenowania oraz specjalizację sportową, różnią się poziomem głównych czynników ograniczających $\dot{V}O_2\max$ (publikacja 2).
4. Profil różnic międzypłciowych w czynnikach ograniczających $\dot{V}O_2\max$ jest zależny od rodzaju adaptacji treningowej związanej ze specjalizacją sportową (publikacja 2).

3. METODY BADAWCZE

3.1 Uczestnicy badań

Projekt uzyskał zgodę Komisji Bioetycznej przy Uniwersytecie Medycznym im. Karola Marcinkowskiego w Poznaniu (Uchwała nr 1252/18 z dnia 6.12.2018). Uczestnicy zostali poinformowani o celu i ryzyku badań oraz udzielili pisemnej zgody. W badaniach opisanych w publikacji 1 uczestniczyły dwie grupy sportowców wyczynowych: sprinterzy (n=12; wiek 24.7 ± 3.3 lat; staż treningowy 7.4 ± 2.5 lat) oraz zawodnicy uprawiający biegi długodystansowe i triathlon (n=10; wiek 25.3 ± 5.3 ; staż treningowy 8.0 ± 2.4 lat). Większość zawodników w czasie realizacji badań wchodziła w skład kadry narodowej. Do badania włączono także grupę kontrolną, którą stanowili mężczyźni rekreacyjnie aktywni fizycznie bez wcześniejszych doświadczeń w sporcie wyczynowym (n=10; wiek 29.0 ± 4.5 lat). W badaniach opisanych w publikacji 2 dokonano celowego doboru zawodniczek i zawodników. Wstępnym warunkiem był wysoki poziom sportowy, tzn. sukcesy na poziomie minimum krajowym lub międzynarodowym. W kolejnym etapie wykonano pomiary składu ciała oraz ustalono poziom $\dot{V}O_2\max$. Po uzyskaniu tych danych w puli 70 sportowców wytrzymałościowych i 50 sprinterów dobrano pary kobiet i mężczyzn o jak najbliższej wartości $\dot{V}O_2\max/SMM$ (różnica nie większa niż 5 ml/min/kg SMM). Sportowcy, dla których nie udało się znaleźć pary o odpowiednio bliskim $\dot{V}O_2\max/SMM$ zostali wykluczeni z dalszej analizy. Ostatecznie zakwalifikowano 46 sportowców: 26 w grupie wytrzymałościowej (13 mężczyzn w wieku 28.0 ± 3.0 lat i 13 kobiet w wieku 21.3 ± 3.0 lat) oraz 20 w grupie sprinterskiej (10 mężczyzn w wieku 23.9 ± 3.8 lat i 10 kobiet w wieku 21.9 ± 3.3 lat).

3.2 Schemat badań

Badania obejmowały dwa główne aspekty: pomiar składu ciała w celu określenia SMM oraz ustalenie $\dot{V}O_2\max$ w teście wysiłkowym do odmowy. Zebrano szereg danych krążeniowo-oddechowych, somatycznych i hematologicznych. Pomiary te wykonano w czterech terminach, które związane były z podokresami rocznego cyklu treningowego badanych zawodników: (i)

początek podokresu przygotowania ogólnego, (ii) początek przygotowania specjalnego, (iii) początek podokresu przedstartowego (publikacje 1 i 2) oraz (iv) początek okresu startowego (publikacja 1). Przed każdą sesją pomiarową zalecono uczestnikom unikanie intensywnych i długotrwałych zajęć treningowych co najmniej 24–48 godzin przed badaniem. W dniu badań, w godzinach porannych, w pierwszej kolejności przeprowadzano na czczo ocenę składu ciała. Testy wysiłkowe wykonywano w godzinach porannych lub przedpołudniowych, do 2–3 godzin po lekkim posiłku. Podczas wszystkich badań temperatura powietrza w laboratorium wynosiła 20–21°C.

3.3 Pomiary składu ciała

Masa oraz wysokość ciała zostały zmierzone za pomocą stacji pomiarowej SECA 285 (SECA, Hamburg, Germany). Skład ciała ustalono metodą DXA za pomocą urządzenia Lunar Prodigy Pro (GE Healthcare, Madison, WI, USA), zgodnie ze standardami zaproponowanymi przez Nana i wsp. [2015]. Do dalszej analizy użyto absolutnej (kg) i względnej (%) masy tkanki tłuszczowej i masy ciała szczupłego – dla całego ciała oraz jego regionów (kończyny dolne i górne, tułów oraz obszary androidalny i gynoidalny). Masę mięśni szkieletowych obliczono zgodnie ze wzorem opracowanym przez Kim i wsp. [2002]:

$$\text{SMM} = (1.13 \cdot \text{ALST}) - (0.02 \cdot \text{wiek}) + 0.61 \cdot \text{płeć} + 0.97, \text{ gdzie}$$

SMM – masa mięśniowa w kg,

ALST (ang. *appendicular lean soft tissue*) – suma mas ciała szczupłego kończyn górnych oraz kończyn dolnych w kg,

płeć: 0 – kobieta, 1 – mężczyzna.

$$\text{ALST} = \text{LBM}_{\text{legs}} + \text{LBM}_{\text{arms}}, \text{ gdzie}$$

LBM_{legs} (ang. *lean body mass of legs*) – masa ciała szczupłego kończyn dolnych,

LBM_{arms} (ang. *lean body mass of arms*) – masa ciała szczupłego kończyn górnych.

Wyliczono także wskaźnik względnego umięśnienia (RSMI, ang. *relative skeletal muscle mass index*) według wzoru:

$$\text{RSMI} = \text{ALST} / h^2 \text{ [kg/m}^2\text{]}, \text{ gdzie}$$

ALST – jak wyżej,

h – wysokość ciała.

3.4 Próba wysiłkowa

Wszyscy badani wykonali test wysiłkowy o wzrastającej intensywności do odmowy na bieżni mechanicznej (H/P Cosmos Pulsar Sports & Medical, Nussdorf-Traunstein, Germany) w celu określenia maksymalnego poboru tlenu. Początkowo badany stał na bieżni przez 3 min. Test polegał na zwiększaniu obciążenia (prędkości biegu) aż do wolicjonalnego wyczerpania zawodnika. Badanie rozpoczynało się od prędkości 4 km/h, po 3 minutach zwiększano prędkość do 8 km/h, a następnie prędkość zwiększano o 2 km/h co 3 minuty. Główne parametry krążeniowo-oddechowe mierzono w każdym cyklu oddechowym przy użyciu ergospirometru Cortex MetaLyzer 3B (Cortex Biophysik, Leipzig, Germany). Częstość skurczów serca (ud./min) mierzono w sposób ciągły za pomocą pulsometru Polar Bluetooth Smart H6 (Polar Electro Oy, Kempele, Finlandia). Maksymalny pobór tlenu uznawano za osiągnięty, jeśli spełnione były co najmniej trzy z następujących kryteriów: (i) plateau poboru tlenu pomimo wzrostu prędkości, (ii) stężenie mleczanu we krwi bezpośrednio po teście przekroczyło 9 mmol/l, (iii) wskaźnik wymiany oddechowej (RER) był większy od 1.10 oraz (iv) częstość akcji serca była powyżej 95% maksymalnej częstości akcji serca stwierdzonej na podstawie wcześniejszych pomiarów danego zawodnika [Edvardsen i wsp. 2014].

3.5 Pobieranie i analiza krwi

Przed wysiłkiem pobierano krew kapilarną z opuszki palca i analizowano za pomocą urządzenia Sysmex XS-1000i (Sysmex Corporation, Japan). Uzyskano dane dotyczące liczby krwinek czerwonych (RBC), stężenia hemoglobiny (HGB), wartości hematokrytu (HCT), średniej objętości krwinki (MCV), średniego stężenia masy hemoglobiny (MCH), średniego stężenia hemoglobiny (MCHC) oraz rozpiętości rozkładu objętości krwinek czerwonych (RDW-CV).

3.6 Analiza statystyczna

W pierwszej publikacji, w celu określenia zmian analizowanych determinantów $\dot{V}O_2\max$ w rocznym cyklu treningowym, przeprowadzono jednoczynnikową analizę wariancji (ANOVA) z powtarzanymi pomiarami w każdej z grup w trzech (sprinterzy) lub czterech (grupa wytrzymałościowa i kontrolna) kolejnych terminach badań oraz jednoczynnikową ANOVA w celu określenia różnic między trzema grupami w danym podokresie treningowym. Wielkość efektu wyrażono jako eta-kwadrat (η^2) i określono jako małą (0.01), średnią (0.06) lub dużą (0.14).

W drugiej publikacji średnie wartości zmiennych dla kobiet i mężczyzn porównano za pomocą testów *t* dla prób zależnych, ze względu na celowy dobór zawodników. Do oceny wielkości efektu różnic wykorzystano wskaźnik *d* Cohena, którego wartość określono jako małą (0.2–0.4), średnią (0.5–0.7), dużą (0.8–1.3) lub bardzo dużą (≥ 1.4). W obu pracach istotność statystyczną ustalono na poziomie $p < 0.05$. Wszystkie analizy przeprowadzono przy użyciu oprogramowania Statistica 13.0 (StatSoft, Tulsa, Oklahoma, USA).

4. WYNIKI

4.1 Skład ciała w grupach sportowych w rocznym cyklu

Szczegółowe dane dotyczące składu ciała (średnie, odchylenia standardowe, istotności różnic i wielkości efektów) znajdują się w Tabeli A1 w publikacji 1 na str. 9. Sprinterzy charakteryzowali się istotnie większą całkowitą masą ciała niż zawodnicy sportów wytrzymałościowych w trzech podokresach treningowych: ogólnym, specjalnym i przedstartowym. U sprinterów masa ciała zwiększała się od podokresu ogólnego, przez podokres przygotowania specjalnego, do podokresu przedstartowego, podczas gdy u sportowców wytrzymałościowych i w grupie kontrolnej nie stwierdzono istotnych zmian.

Absolutna i procentowa masa tkanki tłuszczowej była podobna u sprinterów i sportowców dyscyplin wytrzymałościowych w kolejnych podokresach treningowych: ogólnym, specjalnym i przedstartowym. Wprawdzie nieco niższe wartości dało się zauważyć u sprinterów, jednak różnice pozostawały nieistotne statystycznie. Obie grupy sportowe miały istotnie niższą absolutną i procentową masę tkanki tłuszczowej niż grupa kontrolna niemal we wszystkich terminach, z wyjątkiem podokresu przygotowania ogólnego (nieistotna różnica między sportowcami wytrzymałościowymi a grupą kontrolną). U sprinterów i sportowców wytrzymałościowych absolutna i procentowa zawartość tkanki tłuszczowej była istotnie wyższa w podokresie przygotowania ogólnego niż w kolejnych podokresach treningowych. W grupie kontrolnej nie wykryto istotnych zmian zawartości tkanki tłuszczowej, chociaż istniała pewna tendencja do jej obniżania w ostatnim terminie badań.

Sprinterzy mieli istotnie wyższą zarówno absolutną, jak i procentową zawartość SMM niż sportowcy wytrzymałościowi i osoby z grupy kontrolnej we wszystkich podokresach treningowych. Nie stwierdzono istotnych różnic w SMM między zawodnikami uprawiającymi sporty wytrzymałościowe a grupą kontrolną. U sprinterów absolutna zawartość SMM znacząco wzrosła z podokresu przygotowania ogólnego do podokresu specjalnego i przedstartowego. W trakcie analizowanego cyklu treningowego nie zaobserwowano istotnych zmian w procentowej zawartości masy mięśniowej w żadnej z trzech grup.

4.2 *Wskaźniki maksymalnego poboru tlenu – porównanie grup sportowych i podokresów*

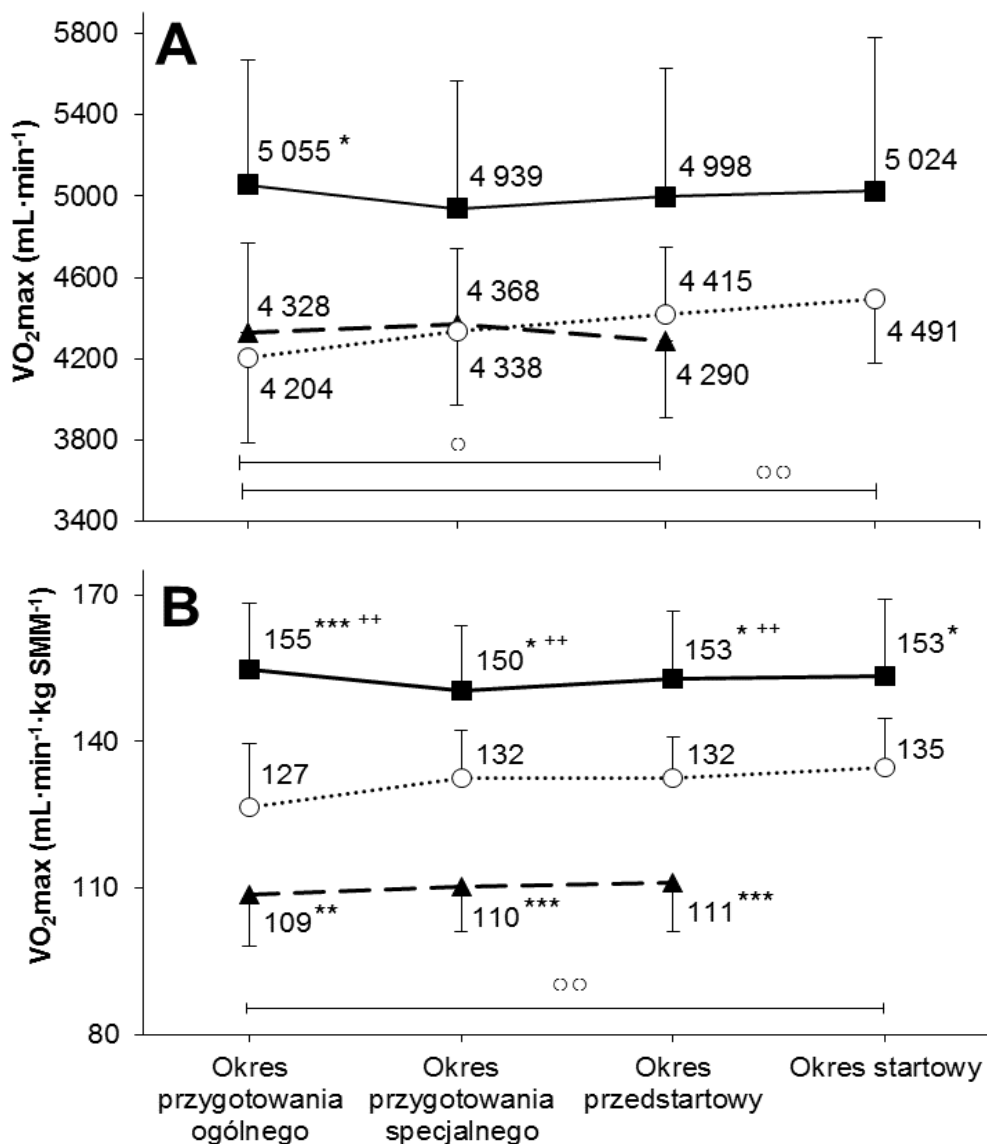
Szczegółowe dane dotyczące zmian $\dot{V}O_2\text{max}$ znajdują się w Tabeli A2 w publikacji 1 na str. 11. W rocznym cyklu treningowym znaczący wzrost wszystkich wskaźników $\dot{V}O_2\text{max}$ (absolutnych, w przeliczeniu na całkowitą masę ciała oraz SMM) zaobserwowano tylko w grupie kontrolnej między podokresem przygotowania ogólnego a przedstartowym i startowym. U sprinterów i w grupie wytrzymałościowej żaden ze wskaźników $\dot{V}O_2\text{max}$ nie zmienił się istotnie statystycznie w kolejnych terminach badań. Jednak rodzaj zastosowanego wskaźnika warunkował występowanie różnic między sportowcami szybkościowo-siłowymi, wytrzymałościowymi a grupą kontrolną. W przypadku absolutnej wartości $\dot{V}O_2\text{max}$ (ml/min) jedyna istotna różnica występowała między sportowcami wytrzymałościowymi a grupą kontrolną w podokresie przygotowania ogólnego (Rycina 1, Panel A, poniżej). W przypadku $\dot{V}O_2\text{max}$ w przeliczeniu na całkowitą masę ciała zaobserwowano wyraźniejsze różnice, tj. sportowcy wytrzymałościowi różnili się istotnie od zawodników szybkościowo-siłowych i grupy kontrolnej we wszystkich podokresach treningowych. Natomiast sprinterzy i grupa kontrolna nie różnili się istotnie tym wskaźnikiem. Po przeliczeniu $\dot{V}O_2\text{max}$ na kilogram SMM pojawiły się istotne różnice między sprinterami a grupą kontrolną. W rezultacie grupa kontrolna miała wyższe wartości $\dot{V}O_2\text{max}$ w przeliczeniu na SMM niż sprinterzy we wszystkich podokresach treningowych (Rycina 1, Panel B, poniżej).

4.3 *Maksymalny pobór tlenu kobiet i mężczyzn*

Zgodnie z głównym założeniem badania i wynikającym stąd doborem celowym, nie było istotnych różnic w $\dot{V}O_2\text{max}$ w przeliczeniu na SMM między kobietami i mężczyznami w grupach wytrzymałościowych i sprinterskich. $\dot{V}O_2\text{max}$ przeliczony na całkowitą masę ciała był znacząco niższy u kobiet niż u mężczyzn w grupie wytrzymałościowej. W grupie sprintu różnica ta nie osiągnęła istotności statystycznej. Absolutna wartość $\dot{V}O_2\text{max}$ była niższa u kobiet w obu grupach sportowych. Niezależnie od specjalizacji sportowej, prędkość biegu przy $\dot{V}O_2\text{max}$ była istotnie niższa u sportowców płci żeńskiej niż męskiej. Szczegółowe wyniki znajdują się w Tabeli 1 w publikacji 2.

4.4 *Skład ciała kobiet i mężczyzn*

Kobiety miały przeciętnie niższą wysokość ciała, BMI i RSMI niż mężczyźni w obu grupach sportowych. Całkowita masa ciała i wszystkie wskaźniki odnoszące się do SMM przybierały wyższe wartości u mężczyzn w obu grupach sportowych. Absolutna i procentowa zawartość całkowitej i regionalnej tkanki tłuszczowej była wyższa u kobiet niż u mężczyzn, niezależnie od uprawianej dyscypliny. Wyjątek stanowiła absolutna masa tkanki tłuszczowej



Rycina 1. Zmiany maksymalnego poboru tlenu ($VO_2\max$) pomiędzy podokresami treningowymi w rocznym cyklu. Panel A – wartości absolutne, Panel B – w przeliczeniu na kilogram masy mięśni szkieletowych (SMM). *Legenda:* ■— długodystansowcy, ▲--- sprinterzy, ○····· grupa kontrolna

° $p < 0.05$, °° $p < 0.01$ – istotnie różne od podokresu przygotowania ogólnego w grupie kontrolnej;

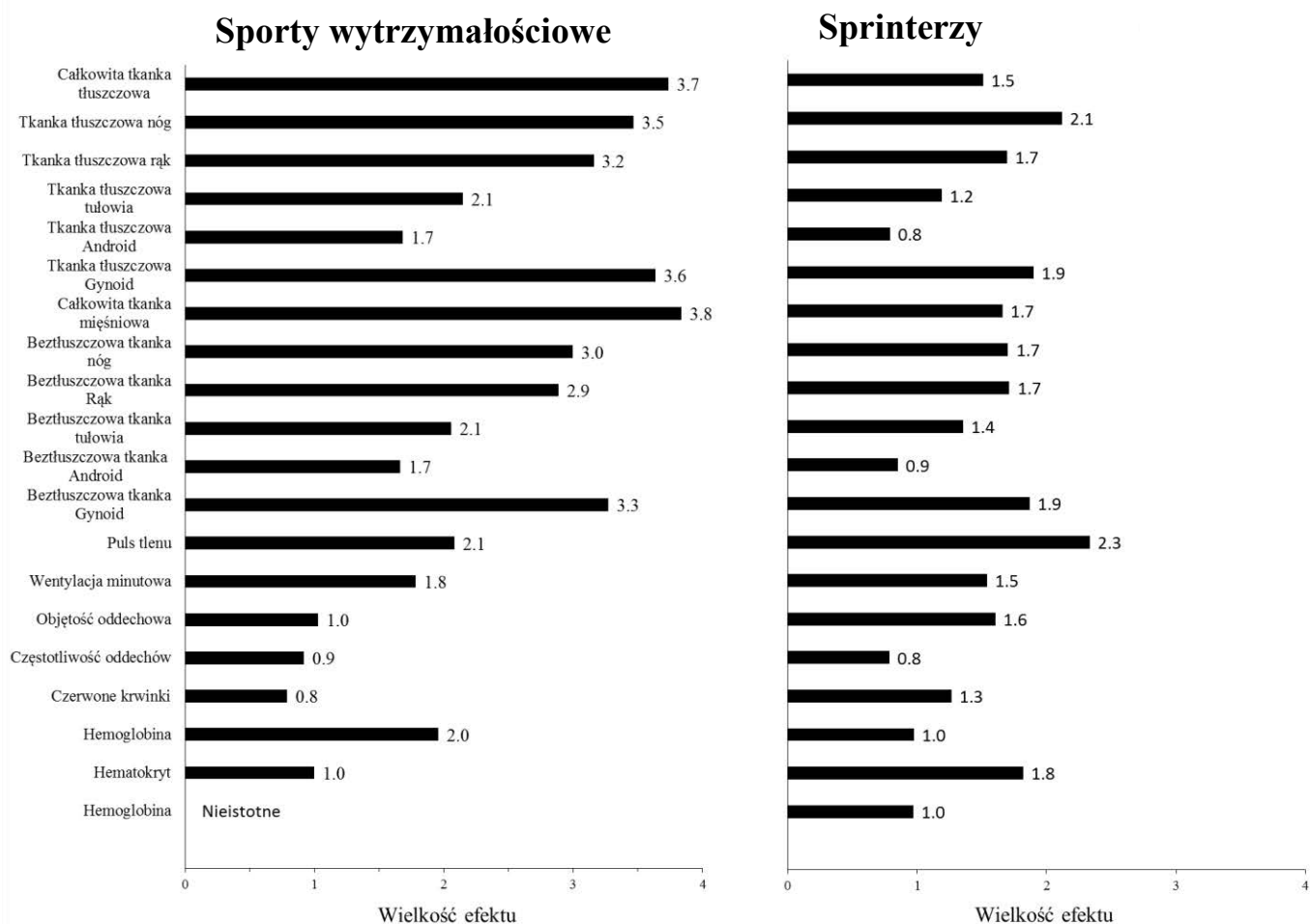
++ $p < 0.01$ – istotnie różne od grupy sprintu w tym samym podokresie treningowym;

* $p < 0.05$, ** $p < 0.01$, *** $p < 0.001$ – istotnie różne od grupy kontrolnej w tym samym podokresie treningowym

w grupie sprinterskiej, w której zaobserwowano nieistotne różnice. Szczegółowe wyniki znajdują się w Tabelach 1 i 2 w publikacji 2.

4.5 Wskaźniki krążeniowo-oddechowe i hematologiczne kobiet i mężczyzn

W obu grupach sportowych kobiety miały istotnie niższe wartości maksymalnego pulsu tlenowego, wentylacji minutowej, objętości oddechowej, częstości oddechów, liczby czerwonych krwinek, stężenia HGB i HCT niż mężczyźni. Maksymalna częstość akcji serca oraz MCV, MCH, MCHC i RDW-CV były podobne u kobiet i mężczyzn, z wyjątkiem MCH u sprinterów, gdzie wskaźnik ten był wyższy u kobiet niż u mężczyzn. Szczegółowe wyniki znajdują się w Tabeli 3 w publikacji 2.



Rycina 2. Wielkość różnic w czynnikach ograniczających maksymalny pobór tlenu między sportowcami płci męskiej i żeńskiej. Różnice wyrażono jako wielkość efektu *d* Cohena, gdzie wartości 0.2, 0.5, 0.8 i 1.4 wyznaczają granice, odpowiednio, małej, średniej, dużej lub bardzo dużej wielkości efektu.

4.6 Wielkość różnic międzypłciowych

Wielkość efektu statystycznego różnic między płciami była dla zdecydowanej większości analizowanych zmiennych duża (*d* Cohena > 0.8) lub bardzo duża (*d* Cohena > 1.4). Wielkość efektu zależała po części od specjalizacji sportowej i rodzaju czynnika ograniczającego $\dot{V}O_2\max$ (Rycina 2, powyżej). U sportowców wytrzymałościowych największe wielkości efektu zaobserwowano dla większości czynników związanych ze

składem ciała, szczególnie całkowitą masą tkanki tłuszczowej ($d=3.7$) i całkowitą masą mięśniową ($d=3.8$). W grupie sprinterów efekty dla poszczególnych komponentów ciała były także duże, ale około dwukrotnie mniejsze niż w grupie wytrzymałościowej (odpowiednio $d=1.5$ i 1.7). Generalnie różnice w składzie ciała były silniej zaznaczone u sportowców trenujących wytrzymałościowo niż u sprinterów. Jeśli chodzi o czynniki związane z wydolnością krążeniowo-oddechową i transportem tlenu, wielkości efektów dla różnic międzypłciowych były porównywalne między grupą wytrzymałościową i sprinterską (odpowiednio $d=0.9-2.1$ vs $d=0.8-2.3$). W zakresie wskaźników krążeniowo-oddechowych największe wielkości efektu zaobserwowano dla maksymalnego pulsu tlenowego (grupa wytrzymałościowa $d=2.1$ vs. sprinterzy $d=2.3$), wentylacji minutowej (odpowiednio, $d=1.8$ vs. 1.5) i objętości oddechowej ($d=1.0$ vs. 1.6), a w przypadku wskaźników hematologicznych dla hemoglobiny ($d=2.0$ vs. 1.0) i hematokrytu ($d=1.0$ vs. 1.8).

5. DYSKUSJA

5.1 Główne ustalenia

W prezentowanej dysertacji po raz pierwszy analizowano zmiany $\dot{V}O_2\max$ w przeliczeniu na SMM u wyczynowych sportowców szybkościowo-siłowych i wytrzymałościowych w rocznym cyklu treningowym. Także po raz pierwszy określono wielkość różnic międzypłciowych w zakresie głównych czynników determinujących $\dot{V}O_2\max$ u wysoko wytrenowanych kobiet i mężczyzn dobranych według ścisłego kryterium bardzo zbliżonej wartości $\dot{V}O_2\max$ w przeliczeniu na kg SMM.

Główne ustalenia wynikające z badań są następujące: (1) Profil zmian $\dot{V}O_2\max$ w przeliczeniu na SMM w rocznym cyklu treningowym nie różnił się od zmian $\dot{V}O_2\max$ w przeliczeniu na całkowitą masę ciała. (2) Wielkość różnic między grupami zależała od użytej miary $\dot{V}O_2\max$, tzn. istotne różnice między sprinterami i grupą kontrolną pojawiły się, gdy użyto wartości $\dot{V}O_2\max$ przeliczonych na SMM, przy braku różnic w przypadku standardowych miar $\dot{V}O_2\max$. (3) Mężczyźni i kobiety o takim samym $\dot{V}O_2\max$ /SMM różnili się istotnie pod względem głównych czynników ograniczających maksymalny pobór tlenu. (4) Profil różnic międzypłciowych w zakresie czynników ograniczających $\dot{V}O_2\max$ zależał w pewnym stopniu od rodzaju adaptacji treningowej (dyscypliny sportu).

5.2 Hipoteza 1

$\dot{V}O_2max$ w przeliczeniu na masę mięśni szkieletowych zmienia się w rocznym cyklu treningowym według innego wzorca niż $\dot{V}O_2max$ w przeliczeniu na całkowitą masę ciała.

Ta hipoteza nie została potwierdzona. U sprinterów, sportowców wytrzymałościowych oraz w grupie kontrolnej przebieg okresowych zmian w rocznym cyklu treningowym był bardzo podobny, niezależnie od zastosowanej miary $\dot{V}O_2max$. U sportowców wytrzymałościowych wysoki poziom $\dot{V}O_2max$ jest związany z wieloletnim i intensywnym treningiem. Analizując uzyskane wyniki, zauważyć można, że zmiany w poziomie $\dot{V}O_2max$ zawodników wytrzymałościowych na przestrzeni całego roku są niewielkie i nieistotne. Wydaje się, że żaden wskaźnik maksymalnej wydolności tlenowej, czy to w oparciu o masę ciała, czy o SMM, nie jest odpowiednio czuły, aby diagnozować zmiany stanu wytrenowania u zawodników wyczynowych reprezentujących sport wytrzymałościowy. Pomimo redukcji absolutnej i procentowej zawartości tkanki tłuszczowej w badanym okresie nie zaobserwowano wzrostu poziomu $\dot{V}O_2max$. Można to tłumaczyć tym, że istotne mechanizmy warunkujące $\dot{V}O_2max$, np. adaptacja mięśni do treningu wytrzymałościowego, aktywność enzymów mitochondrialnych, kapilaryzacja mięśni lub czynniki centralne i obwodowe [Andersen i Henriksson 1977, Holloszy i Coyle 1984, Joyner 2017], uzyskały swój optymalny poziom i nie mogły być znacząco poprawione w tej wysoko wytrenowanej grupie sportowej.

Również u sprinterów, pomimo zmian w składzie ciała w postaci znacznego spadku zawartości masy tkanki tłuszczowej, nie zaobserwowano zmian poziomu $\dot{V}O_2max$ w kolejnych fazach treningowych. Może to wynikać ze specyficznych wymagań treningowych i wydolnościowych. Sprint jest wysiłkiem o wysokiej intensywności i zawodnicy w celu maksymalizacji zdolności szybkościowych koncentrują się na zwiększeniu dynamicznych przejawów siły mięśniowej i mocy, których bardzo wysoki poziom jest charakterystyczny dla sprinterów, a nie poprawie wydolności tlenowej [Haugen i wsp. 2019, Loturco i wsp. 2019], choć pewien optymalny poziom tej ostatniej jest korzystny. Należy zaznaczyć, że mięśnie szkieletowe u sprinterów charakteryzują się stosunkowo niską gęstością kapilar i mitochondriów, co skutkuje mniejszą ekstrakcją tlenu z krwi podczas wysiłku i w konsekwencji niższym $\dot{V}O_2max$ [Torok i wsp. 1995, Zwaard i wsp. 2018]. Ta grupa sportowców koncentruje się na treningu wspomagającym beztlenowe procesy metaboliczne, które są głównym źródłem energii dla aktywności mięśni. Taki typ treningu wiąże się z niską zawartością enzymów tlenowych w mięśniach [Bompa i Haff 2009, Ross i Leveritt 2001]. Istotny może być również fakt, że absolutna SMM opisywanych w tej dysertacji sprinterów (~40 kg) był blisko górnej granicy zasugerowanej przez Beekleya [2006] i wynoszącej ~45 kg,

po przekroczeniu której wartość $\dot{V}O_2\text{max}$ zazwyczaj osiąga plateau lub nawet ulega zmniejszeniu.

W grupie kontrolnej, inaczej niż u sportowców wyczynowych, zaobserwowano istotne zmiany wskaźników $\dot{V}O_2\text{max}$ pomiędzy kolejnymi badaniami, pomimo braku istotnych zmian zawartości głównych komponentów ciała. Wydaje się, że centralne i obwodowe adaptacje wspierające $\dot{V}O_2\text{max}$ nie były zmaksymalizowane u osób aktywnych rekreacyjnie tak jak u sportowców wytrzymałościowych oraz trenujących sprint. Dlatego grupa kontrolna, ze względu na stosunkowo niski poziom wyjściowy $\dot{V}O_2\text{max}$, mogła silniej zareagować na bodźce treningowe, nawet jeśli ich obciążenia treningowe były łagodniejsze niż u sportowców wyczynowych [Zwaard i wsp. 2018].

5.3 Hipoteza 2

Wielkość różnic w poziomie maksymalnej wydolności tlenowej między zawodnikami sportów wytrzymałościowych i szybkościowo-siłowych oraz grupą kontrolną jest zależna od rodzaju zastosowanego wskaźnika (przeliczenie na całkowitą masę ciała vs. SMM).

Ta hipoteza uzyskała potwierdzenie. Już w kilku wcześniejszych badaniach nad związkiem pomiędzy SMM a $\dot{V}O_2\text{max}$ sugerowano, że $\dot{V}O_2\text{max}/\text{SMM}$ może być bardziej istotnym wskaźnikiem w ocenie wydolności tlenowej niż standardowe miary [Proctor i Joyner 1997, Sanada i wsp. 2005]. Ponadto Beekley i wsp. [2006] zasugerowali termin "tlenowa jakość mięśni" (ang. *aerobic muscle quality*), zdefiniowany właśnie jako maksymalna ilość pobieranego tlenu przypadająca na 1 kg SMM. Takie narzędzie pozwalałoby na trafniejsze porównania poziomu $\dot{V}O_2\text{max}$ pomiędzy osobami o różnej masie ciała i zawartości tkanki tłuszczowej lub zawodnikami reprezentującymi odmienne dyscypliny sportowe i poziom wytrenowania.

Na potwierdzenie tez wysuwanych przez innych autorów, w tej dysertacji zaobserwowano w grupie kontrolnej wyższe $\dot{V}O_2\text{max}$ w przeliczeniu na SMM niż w grupie sprinterów – przy braku różnic pomiędzy tymi grupami w wartościach absolutnych $\dot{V}O_2\text{max}$ i przeliczonych na całkowitą masę ciała. Na taki stan rzeczy mogło mieć wpływ kilka czynników. Po pierwsze, u sprinterów w rocznym cyklu istotnie wzrastała SMM, podczas gdy w grupie kontrolnej pozostawała ona zasadniczo niezmienną. Po drugie, grupa kontrolna składała się z mężczyzn aktywnych rekreacyjnie, których aktywność była ukierunkowana na trening wytrzymałościowy, modyfikujący centralne (pojemność dyfuzyjna płuc, maksymalna objętość wyrzutowa i pojemność minutowa serca, zdolność krwi do przenoszenia tlenu) oraz obwodowe (właściwości mięśni szkieletowych) czynniki determinujące $\dot{V}O_2\text{max}$ [Bassett i wsp. 2000, Jacobs i wsp. 2011]. Mięśnie szkieletowe poddane treningowi

wytrzymałościowemu korzystają z zasobów energetycznych tkanki tłuszczowej w większym stopniu (oszczędzając w ten sposób glikogen mięśniowy i glukozę z krwi) i produkują mniej mleczanu podczas wysiłku. Ponadto większa ilość mitochondriów pozwala na wykorzystanie większej ilości tlenu z krwi przez aktywne mięśnie [Bassett i wsp. 2000, Jacobs i wsp. 2011]. Takie typowe adaptacje, występujące u osób stosujących wysiłki wytrzymałościowe, mogą tłumaczyć istotne różnice w $\dot{V}O_2\text{max}/\text{SMM}$, które pojawiły się między grupą kontrolną a sprinterami, mimo że nie były one wykrywalne przy zastosowaniu standardowych miar $\dot{V}O_2\text{max}$.

Podsumowując wyniki publikacji 1 można stwierdzić, że zarówno u sportowców wyczynowych odmiennych specjalizacji (sprint vs. wytrzymałość), jak i u osób aktywnych rekreacyjnie profile rocznych zmian $\dot{V}O_2\text{max}$ przeliczonego na SMM w porównaniu do $\dot{V}O_2\text{max}$ przeliczonego na całkowitą masę ciała nie różnią się znacząco od siebie. Jednak przeliczenie $\dot{V}O_2\text{max}$ na SMM pozwala ujawnić różnice w maksymalnej wydolności tlenowej pomiędzy grupami o odmiennym poziomie sportowym i innej adaptacji treningowej.

5.4 Hipoteza 3

Zawodniczki oraz zawodnicy o bardzo zbliżonym $\dot{V}O_2\text{max}$ w przeliczeniu na SMM, reprezentujący podobny staż i stan wytrenowania oraz specjalizację sportową, różnią się poziomem głównych czynników ograniczających $\dot{V}O_2\text{max}$.

5.4.1 Skład ciała

W tym zakresie hipoteza została potwierdzona. Analizując wyniki, można zaobserwować, że absolutna i procentowa zawartość mięśni szkieletowych i tkanki tłuszczowej bardzo silnie różnicowały sportowców płci męskiej i żeńskiej dopasowanych pod względem $\dot{V}O_2\text{max}/\text{SMM}$. Zarówno w grupie wytrzymałościowej, jak i sprinterskiej wzorzec różnic w składzie ciała był podobny do tych opisanych w poprzednich badaniach [Cureton i Sparling 1980, Thorland i wsp. 1981, Sandbakk i wsp. 2018]. Kobiety standardowo charakteryzują się znacząco niższą zawartością beztłuszczowej masy ciała i masy mięśniowej, a wyższą całkowitą i lokalną zawartością tkanki tłuszczowej. Wydaje się przy tym, że dzięki zastosowanym w prezentowanych tu badaniach kryteriom doboru grup, opierającym się nie tylko na doświadczeniu zawodniczym i treningowym, ale przede wszystkim na jednakowym $\dot{V}O_2\text{max}/\text{SMM}$, można uzyskiwać wielkości różnic międzypłciowych w składzie ciała bliższe rzeczywistości niż w dotychczasowych badaniach.

Pomimo jednakowych wartości $\dot{V}O_2\text{max}$ w przeliczeniu na kilogram SMM dla obu płci, podstawową konsekwencją metaboliczną wyższej procentowej zawartości tkanki tłuszczowej

w organizmie kobiet jest zwiększone zapotrzebowanie na energię do biegu, bez zwiększenia zdolności do produkcji energii [Cureton i Sparling 1980]. W konsekwencji badane zawodniczki osiągały $\dot{V}O_2\max$ przy prędkości niższej o ~10% lub ~2 km/h niż mężczyźni. Pozostaje to w zgodzie z badaniem Cureton i Sparling [1980], w którym mężczyźni byli obciążani ciężarem zewnętrznym w celu zasymulowania masy tkanki tłuszczowej typowej dla kobiet. Interwencja ta zmniejszyła różnice między płciami w wartościach $\dot{V}O_2\max$ na całkowitą masę ciała o 65%, jednak różnice w $\dot{V}O_2\max$ na 1 kg masy beztłuszczowej i wydajność biegu zmniejszyły się odpowiednio tylko o 38% i 30–32%. Również Diaz-Canestro i wsp. [2021] postulowali, że większa zawartość mniej aktywnej metabolicznie tkanki tłuszczowej u sportsmenek jest dodatkowym ograniczeniem dla układu sercowo-naczyniowego podczas wysiłków o charakterze aerobowym.

5.4.2 Czynniki krążeniowo-oddechowe

Ten aspekt hipotezy został zasadniczo potwierdzony, z wyjątkiem jednego parametru. Analizując wyniki badań własnych i innych autorów zauważyć można, że różnice w $\dot{V}O_2\max$ u sportowców płci męskiej i żeńskiej nie są związane z maksymalną częstością skurczów serca [Costill i wsp. 1976, Cureton i wsp. 1986, Hutchinson i wsp. 1991, Sandbakk i wsp. 2018]. Jednak maksymalny puls tlenowy ($\dot{V}O_2\max/HR\max$), będący pośrednim wskaźnikiem objętości wyrzutowej serca, różnił się istotnie między płciami, zwłaszcza w grupie sprinterskiej. Można to tłumaczyć generalnie większymi wymiarami komór oraz grubszyścianami serca u mężczyzn, co przyczynia się do uzyskiwania wyższego poziomu $\dot{V}O_2\max$ [Costill i wsp. 1976, Cureton i wsp. 1986, Hutchinson i wsp. 1991, Sandbakk i wsp. 2018]. W obu grupach sportowych mężczyźni charakteryzowali się także wyższą maksymalną wentylacją minutową, która wynikała z większej objętości oddechowej i częstotliwości oddechów. Większa objętość oddechowa jest związana z większymi rozmiarami płuc i większą średnicą dróg oddechowych u mężczyzn [Costill i wsp. 1976, Thorland i wsp. 1981, Wonisch i wsp. 2003]. Wyższa częstotliwość oddychania może być tłumaczona faktem, że mężczyźni później osiągają fazę plateau objętości oddechowej [Sheel i wsp. 2008], po którym dalszy wzrost wentylacji minutowej jest osiągany głównie poprzez zwiększenie częstości oddechów. Ponadto u mężczyzn kontynuacja biegu przez dłuższy czas powoduje większe absolutne zużycie tlenu i produkcję dwutlenku węgla, a tym samym większe wymagania wentylacyjne [Sheel i wsp. 2008]. Podobne różnice międzypłciowe w zakresie czynników krążeniowo-oddechowych wykazali inni autorzy, zwłaszcza w zakresie maksymalnej wentylacji minutowej u osób trenujących wytrzymałościowo [Guenette i wsp. 2007] oraz w grupach dobranych na podstawie $\dot{V}O_2\max$ w przeliczeniu na masę beztłuszczową [Hutchinson i wsp. 1991].

5.4.3 Zdolność krwi do transportu tlenu

Potwierdzono, że różnice międzypłciowe w zakresie zdolności do transportu tlenu są wciąż widoczne u kobiet i mężczyzn o zbliżonym poziomie $\dot{V}O_2\text{max}/\text{SMM}$. Wyniki dotyczące różnic międzypłciowych w zakresie transportu tlenu były podobne do przedstawionych w innych pracach, w których autorzy dobierali badane grupy za pomocą kryteriów takich jak jednakowy staż treningowy oraz doświadczenie startowe lub zbliżony $\dot{V}O_2\text{max}$ w przeliczeniu na masę beztłuszczową [Cureton i wsp. 1986, Hutchinson i wsp. 1991, Rietjens i wsp. 2002]. Jednak wyniki naszych badań potwierdzają także tezę, że różnice płciowe w parametrach hematologicznych odpowiadają jedynie za niewielką część różnic międzypłciowych w $\dot{V}O_2\text{max}$ [Cureton i wsp. 1986, Hutchinson i wsp. 1991, Rietjens i wsp. 2002]. Niedawny przegląd badań dotyczących kobiet transpłciowych w sporcie [Hilton i Lundberg 2021] sugeruje, że choć wyższe stężenie hemoglobiny jest zależne od poziomu testosteronu – który osiąga wyższe wartości u mężczyzn i pośrednio wspiera wydolność tlenową – nie jest to główny czynnik odpowiadający za hematologiczne podłoże różnic w $\dot{V}O_2\text{max}$. Wydaje się, że czynniki związane z większą objętością krwi u mężczyzn, zwiększonym obciążeniem wstępnym serca, większą objętością wyrzutową i maksymalnym rzutem serca – prowadzące łącznie do zwiększonej zdolności dostarczania tlenu – są bardziej kluczowe dla różnic międzypłciowych w $\dot{V}O_2\text{max}$ niż zdolność transportowania tlenu przez krew [Cureton i wsp. 1986, Diaz-Canestro i Montero 2019, Hilton i Lundberg 2021, Hutchinson i wsp. 1991, Ransdell i Wells 1991, Rietjens i wsp. 2002].

5.5 Hipoteza 4

Profil różnic międzypłciowych w czynnikach ograniczających $\dot{V}O_2\text{max}$ jest zależny od rodzaju adaptacji treningowej związanej ze specjalizacją sportową.

Wyniki prezentowanych badań sugerują, że znaczne różnice między płciami w zakresie czynników ograniczających $\dot{V}O_2\text{max}$ występują niezależnie od specjalizacji sportowej. Jednak wydaje się, że wielkości tych różnic są w pewien sposób zależne od specyfiki i wymogów adaptacyjnych danej dyscypliny. Różnice międzypłciowe w zakresie składu ciała były większe u sportowców wytrzymałościowych niż sprinterów. Wielkości różnic w czynnikach krążeniowo-oddechowych były podobne w obu grupach sportowych. Różnice dotyczące parametrów krwi okazały się niejednoznaczne.

W sportach wytrzymałościowych siła różnic międzypłciowych w zawartości SMM i tkanki tłuszczowej była niemal dwukrotnie większa niż w grupie sprinterskiej, gdzie kobiety uzyskiwały procentowe wartości bliższe męskim. Mniejsze różnice w grupie sprinterskiej mogą wynikać ze specyfiki i celów treningowych tej dyscypliny, która nastawiona jest m.in. na

zbudowanie stosunkowo dużej masy mięśniowej, a przez to poprawę generowanej siły i mocy, oraz zminimalizowanie zawartości tkanki tłuszczowej, która z uwagi na bardzo krótki czas wysiłku nie stanowi głównego źródła energii do aktywności mięśniowej, a raczej „zbędny balast” [Bompa i Haff 2009, Loturco i wsp. 2017, Ross i Leveritt 2001]. Stąd sprinterki, w celu maksymalizacji wyników sportowych, zbliżają się do męskiego wzorca zawartości mięśni i tkanki tłuszczowej bardziej niż biegaczki długodystansowe lub triatlonistki względem swoich męskich odpowiedników. Z kolei uprawianie długich dystansów wiąże się ze stosunkowo małą SMM i specyficznymi adaptacjami metabolicznymi mięśniach, stąd sportswomenki wytrzymałościowe nie akcentują rozwoju SMM tak jak sprinterki. Ponadto sporty wytrzymałościowe są związane z metabolizmem tlenowym, dla którego zapleczem energetycznym są w dużym stopniu zasoby tkanki tłuszczowej i uwalniane z niej w dłuższym czasie substraty. Dlatego nie ma potrzeby nadmiernej redukcji zawartości tkanki tłuszczowej u biegaczek lub triatlonistek i rozdzwięk pomiędzy żeńskim a męskim składem ciała pozostaje większy niż w sprincie. Należy jednak zauważyć, że większa SMM predysponuje do magazynowania większych zapasów glikogenu mięśniowego, co ma wpływ na poprawę wydolności i wyniku w sportach wytrzymałościowych [Chesley i wsp. 1996, Green i wsp. 1992, Holloszy i Coyle 1984], stąd pewien wzrost SMM u sportswomenek wytrzymałościowych mógłby być także korzystny.

Różnice związane z czynnikami krążeniowo-oddechowymi były podobne w grupie wytrzymałościowej i trenującej sprint niemal dla wszystkich analizowanych zmiennych. Wyjątek stanowiła objętość oddechowa, która silniej różnicowała kobiety i mężczyzn w grupie trenującej sprint. Podobnie jak masa mięśniowa w grupie sprinterskiej była istotna dla wyniku sportowego i mniej różnicowała płcie, tak objętość oddechowa, będąca ważnym aspektem w wysiłku wytrzymałościowym, mniej różniła się w grupie wytrzymałościowej. Mniejsze różnice w objętości oddechowej między kobietami a mężczyznami w grupie wytrzymałościowej mogą wynikać z lepszej adaptacji treningowej płuc oraz mięśni oddechowych [Hackett 2020]. Tu także specyficzny trening, rozwijający mechanizmy krążeniowo-oddechowe, może powodować „wyrównywanie się” objętości oddechowej między płciami.

Nie w pełni jednoznaczny obraz dały wskaźniki związane z transportem tlenu we krwi. Zakładając – analogicznie do składu ciała, czynności serca i czynności oddechowej – że różnice międzypłciowe są mniejsze w przypadku parametrów fizjologicznych istotnych dla wyniku sportowego, w zasadzie wszystkie wskaźniki hematologiczne powinny być mniej zróżnicowane międzypłciowo w grupie wytrzymałościowej niż sprinterskiej. I jest tak dla ilości erytrocytów, hematokrytu, średniej objętości krwinki, średniego stężenia masy hemoglobiny, średniego stężenia hemoglobiny czy rozpiętości rozkładu objętości krwinek czerwonych.

Jednak stężenie hemoglobiny, niewątpliwie istotne dla sportowców wytrzymałościowych, bardziej różnicuje płcie w grupie wytrzymałościowej niż u sprinterów. Cechą charakterystyczną treningu wytrzymałościowego jest rozwijanie adaptacji związanych z transportem tlenu we krwi [Bassett i Howley 2000], więc poziom hemoglobiny u kobiet i mężczyzn powinien różnić się mniej niż w przypadku sprinterów. Warto jednak zauważyć, że w naszych badaniach poziom hemoglobiny był bardzo podobny w grupie wytrzymałościowej i sprinterskiej w obrębie tej samej płci, więc ten parametr nie był specyficzny dla specjalizacji sportowej. Nie jest to spostrzeżenie zaskakujące. Z wcześniejszych badań wynika bowiem, że często sportowcy wytrzymałościowi (i nie tylko) charakteryzują się wartościami parametrów hematologicznych blisko dolnych granic norm populacyjnych lub nawet poniżej [Broadbent 2011, Malczewska i wsp. 2001, Rietjens i wsp. 2002], szczególnie w okresach intensywnego treningu [Banfi i wsp. 2011, Ciekot-Sołtysiak i wsp. 2017], a właśnie w takim krytycznym momencie (podokres przedstartowy) były wykonane porównania kobiet i mężczyzn na potrzeby tej dysertacji. Uzyskany obraz hematologiczny może być spowodowany m.in. znanym zjawiskiem anemii sportowej [Green i wsp. 1991, Haymes i Lamanca 1989, Hunding i wsp. 1981, O'Toole i wsp. 1988, Rietjens i wsp. 2002].

Podsumowując publikację 2, można stwierdzić, że między kobietami i mężczyznami uprawiającymi sport wyczynowy i jednocześnie charakteryzującymi się taką samą maksymalną wydolnością tlenową w przeliczeniu na SMM nadal występują znaczące różnice w zakresie głównych czynników ograniczających $\dot{V}O_2\max$. Wielkości i profile różnic międzypłciowych są do pewnego stopnia charakterystyczne dla danej specjalizacji sportowej i związanych z nią fizjologicznych adaptacji organizmu.

5.6 *Mocne strony i ograniczenia badań*

Mocną stroną zrealizowanych badań było zastosowanie metody DXA, która jest obecnie najbardziej trafną i użyteczną metodą dokładnej oceny SMM u sportowców wyczynowych. Jest to metoda porównywalna z pomiarami za pomocą rezonansu magnetycznego lub tomografii komputerowej, ale nie generująca problemów związanych z dostępnością, kosztami czy ryzykiem wynikającym z dawki promieniowania rentgenowskiego. Do analiz włączono wysoko wytrenowanych sportowców, którzy stanowili grupy reprezentatywne pod względem odmiennych specjalizacji sportowych i adaptacji fizjologicznych. Wcześniejsze badania obejmowały jedynie grupy trenujące wytrzymałościowo lub osoby niezwiązane z sportem wyczynowym. Prezentowane badania po raz pierwszy obejmują wyczynowych sprinterów w kontekście $\dot{V}O_2\max$, poszerzając spektrum analizy badanego problemu.

Zrealizowane badania zawierają pewne ograniczenia. W publikacji numer 1, zawodnicy trenujący sprint byli badani tylko w trzech podokresach treningowych rocznego cyklu treningowego, ponieważ test wytrzymałościowy w okresie startowym mógłby mieć niekorzystny wpływ na ich przygotowanie do nadchodzących zawodów. Wydaje się jednak, że w tej grupie zarówno skład ciała, jak i $\dot{V}O_2\text{max}$ nie zmieniłyby się już znacząco pomiędzy podokresem przedstartowym i startowym, stąd wpływ na sformułowane wnioski wydaje się ograniczony. Wyniki publikacji 1 ograniczają się do wysoko wytrenowanych sportowców płci męskiej. Wzorec zmian w rocznym cyklu u wyczynowych sportswomenek oraz porównanie z nietrenującymi kobietami wymaga odrębnych badań. Ponadto w publikacji 2 nie analizowano czynników związanych z morfologicznymi i biochemicznymi właściwościami mięśni szkieletowych, nie uwzględniono też zawartości wody jako ważnego komponentu ciała i dominującego składnika tkanki mięśniowej.

6. WNIOSKI

1. U sportowców wyczynowych profil zmian $\dot{V}O_2\text{max}$ w przeliczeniu na masę mięśniową w rocznym cyklu treningowym nie różni się od profilu zmian $\dot{V}O_2\text{max}$ wyrażonego w standardowych miarach.
2. Przeliczenie $\dot{V}O_2\text{max}$ na masę mięśniową pozwala na wykrycie istotnych różnic w maksymalnej wydolności tlenowej między osobami o odmiennej specjalizacji treningowej i poziomie sportowym, podczas gdy różnice te zacierają się przy zastosowaniu standardowych miar poboru tlenu.
3. U sportowców płci męskiej i żeńskiej o tej samej maksymalnej wydolności tlenowej w przeliczeniu na masę mięśniową nadal występują znaczące różnice międzypłciowe w zakresie czynników ograniczających $\dot{V}O_2\text{max}$.
4. Wielkość różnic międzypłciowych w zakresie czynników ograniczających $\dot{V}O_2\text{max}$ jest częściowo związana ze specyfiką treningu i fizjologicznymi adaptacjami typowymi dla specjalizacji sportowej.

6.1 Implikacje praktyczne

Okazuje się, że wskaźnik $\dot{V}O_2\text{max}$ w przeliczeniu na SMM może ujawnić istotne różnice w maksymalnej wydolności aerobowej między grupami o odmiennej specjalizacji sportowej lub statusie treningowym. Może to być więc narzędzie przydatne w naborze lub selekcji sportowej w celu bardziej precyzyjnego rozróżniania grup lub osób w zakresie

potencjału maksymalnej wydolności tlenowej. Natomiast u sportowców wyczynowych z dłuższym stażem stosowanie $\dot{V}O_2\text{max}$ w przeliczeniu na SMM jako wskaźnika "tlenowej jakości mięśni" nie wydaje się uzasadnione i potrzebne, ponieważ wzorzec zmian tego wskaźnika w rocznym cyklu jest zbieżny ze standardowymi miarami $\dot{V}O_2\text{max}$ i przede wszystkim nie ulega znaczącym zmianom u wysokowytrenowanych zawodników. U zaawansowanych wyczynowych sportowców wytrzymałościowych należy stosować bardziej sensytywne miary wytrenowania w kontekście wydolności tlenowej.

Prezentowane badania wykazały, że znaczne różnice między płciami w zakresie czynników ograniczających $\dot{V}O_2\text{max}$ występują niezależnie od specjalizacji sportowej, ale ich wielkość może się wiązać z profilem treningowym. W praktyce sportowej nie ma możliwości, z przyczyn czysto biologicznych, radykalnej modyfikacji określonych czynników ograniczających $\dot{V}O_2\text{max}$ w celu poprawy osiągnięć sportowych kobiet względem męskich rezultatów. Czynnikiem ograniczającym $\dot{V}O_2\text{max}$, który najsilniej różnicuje kobiety i mężczyzn jest skład ciała, zwłaszcza masa tkanki tłuszczowej. Ten komponent może u człowieka ulegać modyfikacji w bardzo szerokim zakresie, można by więc przyjąć, że zdecydowana redukcja ilości tkanki tłuszczowej u sportswomenek wywarłaby pozytywny wpływ na wydolność aerobową i wynik sportowy. Jednak ryzykowną dolną granicą jest tu fizjologiczne minimum wynoszące 12–13% [[American Council on Exercise 2003](#)]. Z kolei inne czynniki wpływające na $\dot{V}O_2\text{max}$ wydają się być mniej modyfikowalne, ponieważ są silnie zależne od absolutnych wymiarów ciała (np. pojemność płuc, objętość wyrzutowa serca) lub pozostają z natury w dość wąskich zakresach fizjologicznych. Dlatego wydaje się, że trenerzy powinni w większym stopniu polegać na wczesnej selekcji do sportu wyczynowego, choćby przy użyciu wskaźników takich jak $\dot{V}O_2\text{max}/\text{SMM}$, skupiając się na wrodzonych cechach osobniczych, niż stosować u zawodniczek niebezpieczne interwencje treningowe, żywieniowe lub farmakologiczne, w zamierzeniach „korygujące” genetycznie uwarunkowane mechanizmy fizjologiczne.

II. DISSERTATION SUMMARY

This doctoral dissertation is based on a series of studies under the common title: “Maximal oxygen uptake adjusted for skeletal muscle mass in competitive athletes during a one-year training cycle”. The dissertation consists of the following two scientific articles prepared within the framework of a research project funded by the National Science Centre Poland under grant OPUS 14 number 2017/27/B/NZ7/02828:

1. Trinschek J, Zieliński J, Kusy K. *Maximal oxygen uptake adjusted for skeletal muscle mass in competitive speed-power and endurance male athletes: changes in a one-year training cycle*. International Journal of Environmental Research and Public Health, 2020, 17(17): 6226. doi: 10.3390/ijerph17176226.; PMID: 32867179; PMCID: PMC7504314.; Impact Factor – 3.390, Punktacja MEiN – 140 points.

2. Trinschek J, Zieliński J, Zarębska EA, Kusy K. *Male and female athletes matched for maximum oxygen uptake per skeletal muscle mass: Equal but still different*. Journal of Sports Medicine and Physical Fitness, 2022, online first, Mar 1. doi: 10.23736/S0022-4707.22.13605-4.; PMID: 35230070.; Impact Factor – 1.637, Punktacja MEiN – 40 points.

1. INTRODUCTION

Maximal oxygen uptake ($\dot{V}O_{2\max}$) is a widely used indicator of human aerobic capacity and is defined as the maximum oxygen volume consumed per unit of time, i.e. the highest possible rate of oxygen uptake in an individual [Bassett and Howley 2000, Hill et al. 1924, Ranković et al. 2010, Sadowska et al. 2017, Wilmore et al. 2004]. Conventionally, $\dot{V}O_{2\max}$ is expressed as an absolute rate of oxygen uptake per unit of time (ml/min) or as a weight-adjusted rate (ml/min/kg). Expressing $\dot{V}O_{2\max}$ per kilogram of lean body mass (LBM) per minute is less common [Cureton 1981, Diaz-Canestro et al. 2021, Montero et al. 2018, Proctor et al. Joyner 1997, Sparling et al. Cureton 1983, Wells et al. Plowman 1983] and only occasionally per kilogram of skeletal muscle mass (SMM) [Beekley et al. 2006, Proctor et al. Joyner 1997, Sanada et al. 2005]. The low popularity of using the $\dot{V}O_{2\max}$ /SMM in competitive athletes can be due to problems with accurate SMM estimation or insufficient knowledge among coaches and athletes about the information this indicator can provide.

Skeletal muscle mass is the main component of fat-free body mass in humans [Kim et al. 2002], critical to athletic performance [Andreato et al. 2010, Delaney et al. 2016, González-Mendoza et al. 2019, Martín-Matillas et al. 2014, Proctor et al. Joyner 1997]. Through regular

training, muscles adapt to exercise and can consume more oxygen per unit of time [Beekley et al. 2006, Farinatti et al. 2011, Proctor and Joyner 1997, Sanada et al. 2004]. Skeletal muscles in endurance athletes are characterized by higher amount of slow-twitch fibers, higher mitochondrial size and density resulting in better blood flow in the muscles. [Andersen and Henriksson 1977, Holloszy and Coyle 1984, Torok et al. 1995, Zwaard et al. 2018]. Adaptations of specific biochemical and molecular mechanisms contribute to modifications in metabolic activity of fat tissue and mitochondrial enzymatic activity, including enzymes of fatty acid oxidation, citrate cycle and respiratory chain [Andersen and Henriksson 1977, Holloszy and Coyle 1984].

To date, only a few studies have attempted to estimate SMM-adjusted $\dot{V}O_2\text{max}$, using the most advanced methods of SMM assessment, such as magnetic resonance or dual-energy X-ray absorptiometry [Beekley et al. 2006, Proctor et al. Joyner 1997, Sanada et al. 2005]. Beekley et al. [2006] demonstrated a strong relationship between SMM (kg) and $\dot{V}O_2\text{max}$ (l/min) in professional athletes. They noticed that above a certain level of SMM (~45 kg) the relationship between $\dot{V}O_2$ uptake and SMM was weakening and aerobic capacity of athletes reached a plateau. They suggested that in highly trained athletes with different levels of body fat and body mass, SMM-adjusted $\dot{V}O_2\text{max}$ should be taken into account to obtain more accurate and reliable information on the maximum aerobic capacity. Sanada et al. [2004] revealed that $\dot{V}O_2\text{max}$ was closely correlated with SMM in amateur swimmers. According to them, maximal aerobic capacity per SMM may be a more appropriate indicator than weight, because differences or changes in total body mass may significantly affect obtained $\dot{V}O_2\text{max}$ values. Proctor and Joyner (1997) demonstrated that reduced aerobic capacity per kilogram SMM was connected with reduced whole body $\dot{V}O_2\text{max}$. A view has been formulated that in highly trained athletes, to obtain more accurate and reliable information on changes in aerobic capacity, not only standard measures of $\dot{V}O_2\text{max}$ should be considered, but also SMM-adjusted $\dot{V}O_2\text{max}$ [Beekley et al. 2006]. The widely used weight-adjusted $\dot{V}O_2\text{max}$ not always fully reflects the training status of the athlete and related adaptation mechanisms. Indeed, it is not clear whether an increase or decrease in $\dot{V}O_2\text{max}$ is due to change in total body mass (or its components, such as fat mass) or to actual adaptive changes determining $\dot{V}O_2\text{max}$, including skeletal muscles which are the major oxygen recipients during exercise [Basset and Howley 2000].

In humans, $\dot{V}O_2\text{max}$ is limited by four main sets of physiological factors: pulmonary diffusing capacity, maximal cardiac output, oxygen-carrying capacity of the blood, and skeletal muscle characteristics [Basset and Howley 2000, Shete et al. 2014]. These factors also determine sex differences in $\dot{V}O_2\text{max}$. Moreover, two major body components, i.e. skeletal

muscle and fat mass, significantly contribute to the sex differences in $\dot{V}O_2\text{max}$ levels achieved during exercise testing [Diaz-Canestro et al. 2021, Diaz-Canestro et al. 2022, Montero et al. 2018, Sparling and Cureton 1983, Wells and Plowman 1983]. In general, male athletes have higher absolute SMM and thus higher oxygen uptake, but lower body fat content than women participating in the same sport discipline at a similar level. This well-known aspect of sexual dimorphism alone results in an 'unfavorable conversion ratio' of oxygen uptake in women, regardless of other factors differentiating aerobic capacity between the two sexes.

Importantly, Proctor and Joyner [1997] observed almost identical $\dot{V}O_2\text{max}$ per kg SMM in endurance-trained men and women. This suggests that, at the same age and with similar training profile and status, sex differences in $\dot{V}O_2\text{max}$ are not dependent on factors related to the properties of the skeletal muscle, the latter having very similar potential of oxygen uptake in both sexes. Hence, studies including highly trained men and women with the same $\dot{V}O_2\text{max}/\text{SMM}$ value (as an indicator of skeletal muscle 'aerobic capacity'), may shed additional light on the effects of SMM and other factors on $\dot{V}O_2\text{max}$. However, the results of studies on sex differences in $\dot{V}O_2\text{max}$ and contributing factors obtained so far are not fully satisfactory due to the lack of precise criteria for the selection of athletes [Cureton 1981, Cureton et al. 1986, Sparling and Cureton 1983, Wells and Plowman 1983]. For more relevant and accurate comparisons, a purposive sampling should be used based on almost equal $\dot{V}O_2\text{max}/\text{SMM}$ in both sexes as the primary criterion. So far, the inclusion criteria for male and female comparisons were usually training profile and history accompanied by $\dot{V}O_2\text{max}$ expressed in a standard measure [Cureton 1981, Diaz-Canestro et al. 2021, Montero et al. 2018, Sparling and Cureton 1983, Wells and Plowman 1983] and only occasionally $\dot{V}O_2\text{max}$ per SMM was taken into account [Beekley et al. 2006, Proctor and Joyner 1997, Sanada et al. 2004]. It seems that female and male professional athletes were not compared using SMM-adjusted $\dot{V}O_2\text{max}$. Such an attempt would allow obtaining more precise information on the size of sex differences in the main factors limiting $\dot{V}O_2\text{max}$ including those related to the SMM. Moreover, contrasting speed and endurance athletes, representing different training profiles and associated physiological adaptations, may illustrate to what extent gender differences in factors limiting $\dot{V}O_2\text{max}$ are universal or sports discipline-dependent.

In view of the research problems outlined above, this dissertation addresses (1) the changes in $\dot{V}O_2\text{max}/\text{SMM}$ in competitive athletes of different specializations in one-year training cycle and (2) comparison of factors limiting $\dot{V}O_2\text{max}$ between men and women participating in competitive sports in relation to skeletal muscle mass. To obtain the best possible quality of measurements, the dual energy X-ray absorptiometry method was used, which has a very high precision and accuracy.

2. AIMS AND HYPOTHESES

The study aimed to assess the level and the changes in SMM-adjusted $\dot{V}O_2\text{max}$ in competitive highly trained athletes of different specializations in a one-year training cycle (publication 1) and to assess the size of sex differences in main factors limiting $\dot{V}O_2\text{max}$ taking into account SMM (publication 2).

Hypotheses:

1. SMM-adjusted $\dot{V}O_2\text{max}$ changes in a one-year training cycle according to a different pattern than weight-adjusted $\dot{V}O_2\text{max}$ (publication 1).
2. The size of the differences in $\dot{V}O_2\text{max}$ between endurance, speed-power, and recreational athletes depends on the measure of $\dot{V}O_2\text{max}$ used (SMM- vs weight-adjusted) (publication 1).
3. Male and female athletes with very similar $\dot{V}O_2\text{max}/\text{SMM}$, representing similar training history, training status, and sport specialisation, differ in the level of the main factors limiting $\dot{V}O_2\text{max}$ (publication 2).
4. The profile of sex differences in factors limiting $\dot{V}O_2\text{max}$ depends on sports specialization (publication 2).

3. METHODS

3.1 Participants

The project was approved by the Bioethics Committee at the Karol Marcinkowski Medical University in Poznań (Resolution No. 1252/18 of 6.12.2018). The participants were informed of the purpose and risks of the study and gave their written consent to participate. The study described in Publication 1 included 22 highly trained male athletes divided into two groups: sprinters ($n=12$; 24.7 ± 3.3 years, training history 7.4 ± 2.5 years) and endurance athletes ($n=10$; 25.3 ± 5.3 years, training history 8.0 ± 2.4 years). Most of the athletes were part of the national team at the time of the study. The control group consisted of 10 healthy and recreationally active men aged 29.0 ± 4.5 years, without previous experience in competitive sports. In the second study (Publication 2), a purposive sampling of athletes was performed. The prerequisite was a high sporting level, i.e. success at a minimum national or international level. Then, body composition and $\dot{V}O_2\text{max}$ were measured in 70 endurance- and 50 sprint-trained athletes. After obtaining the necessary data, male and female athletes were carefully matched in pairs with almost identical $\dot{V}O_2\text{max}$ per kilogram SMM (a difference of not more

than 5 ml/min/kg SMM). Athletes for whom a pair with sufficiently close $\dot{V}O_2\text{max}/\text{SMM}$ could not be found were excluded from further analysis. Eventually, 46 athletes were selected: 26 in the endurance group (13 men aged 28.0 ± 3.0 years and 13 women aged 21.3 ± 3.0 years) and 20 in the sprint group (10 men aged 23.9 ± 3.8 years and 10 women aged 21.9 ± 3.3 years).

3.2 Study design

Two main research tasks were performed: body composition measurement to determine SMM and an incremental running test to determine $\dot{V}O_2\text{max}$. Several cardiorespiratory, somatic, and haematological data were collected. All measurements were repeated four times in the following training phases of the one-year training cycle: (1) beginning of the general preparation phase, (2) beginning of the specific preparation phase, (3) beginning of the pre-competition phase, and (4) beginning of the competition phase. Participants were instructed to avoid high-intensity and long-duration training sessions 24–48 h before each examination. On the days of examination, fasting body composition assessment was performed in the morning. Then, exercise tests were performed up to 2–3 hours after a light meal. During all tests, the air temperature in the laboratory was 20–21°C.

3.3 Body Composition and Skeletal Muscle Mass

Body weight and height were measured using a SECA 285 measuring station (SECA, Hamburg, Germany). Body composition was determined by DXA using the Lunar Prodigy Pro device (GE Healthcare, Madison, WI, USA) according to the standards proposed by Nana et al. [2015]. The absolute (kg) and relative (%) fat mass and lean body mass – for the whole body and its regions (lower and upper limbs, trunk, and android and gynoid areas) – were used for further analysis. Skeletal muscle mass was calculated according to the formula developed by Kim et al. [2002]:

$$\text{SMM} = (1.13 \cdot \text{ALST}) - (0.02 \cdot \text{age}) + 0.61 \cdot \text{sex} + 0.97, \text{ where}$$

SMM – skeletal muscle mass in kg,

ALST – appendicular lean soft tissue, the sum of lean body mass of upper and lower limbs in kg,

sex: 0 – female, 1 – male.

$$\text{ALST} = \text{LBM}_{\text{legs}} + \text{LBM}_{\text{arms}}, \text{ where}$$

LBM_{legs} – lean body mass of lower limbs,

LBM_{arms} – lean body mass of upper limbs.

The relative skeletal muscle mass index was also calculated according to the formula:

$$\text{RSMI} = \text{ALST} / \text{H}^2 \text{ [kg/m}^2\text{]}, \text{ where}$$

ALST – *see above*,

H – height.

3.4 Maximum Oxygen Uptake

All athletes underwent an incremental running test on the h/p Cosmos Pulsar treadmill (Sports & Medical, Nussdorf-Traunstein, Germany) to determine $\dot{V}O_2\text{max}$. Initially, the participant remained standing on the treadmill for 3 min. The test consisted of increasing the load (running speed) until the athlete was volitionally exhausted. The test started at 4 km/h, after 3 minutes the speed was increased to 8 km/h, and then the speed was increased by 2 km/h every 3 minutes. Main cardiopulmonary parameters were measured during each respiratory cycle using the Cortex MetaLyzer 3B ergospirometer (Cortex Biophysik, Leipzig, Germany). Heart rate (beats/min) was measured continuously using a Polar Bluetooth Smart H6 heart rate monitor (Polar Electro Oy, Kempele, Finland). Maximal oxygen uptake was considered achieved if at least three of the following criteria were met: (i) oxygen uptake plateaued despite an increase in speed, (ii) blood lactate concentration immediately after the test exceeded 9 mmol/l, (iii) respiratory exchange ratio (RER) was greater than 1.10, and (iv) heart rate was above 95% of the maximum heart rate found from previous measurements of the athlete [Edvardsen et al. 2014].

3.4 Hematological parameters

Before exercise, capillary blood was collected from the fingertip and analyzed using a Sysmex XS-1000i (Sysmex Corporation, Japan). Data on red blood cell (RBC) count, hemoglobin concentration (HGB), hematocrit value (HCT), mean corpuscular volume (MCV), mean corpuscular hemoglobin (MCH), mean corpuscular hemoglobin concentration (MCHC), and red blood cell volume distribution width (RDW-CV) were obtained.

3.5 Statistical Analysis

In Publication 1, a one-way analysis of variance (ANOVA) with repeated measures was used to compare the change between 3 (sprinters) or 4 (endurance athletes and controls) examinations across the whole training cycle. Another one-way ANOVA was used to compare

differences between the three groups at each single training phase. The effect size for ANOVA was expressed as eta-square (η^2) and defined as small (0.01), medium (0.06), or large (0.14).

In publication 2, due to the purposive match in both athletic groups, the mean values of variables obtained from female and male athletes were compared using t-tests for dependent means. Cohen's *d* was calculated to assess the effect size of the differences and defined as small (0.2–0.4), intermediate (0.5–0.7), large (0.8–1.3), or very large (≥ 1.4). The statistical significance was set at $p < 0.05$ in both publications. All analyses were performed using the Statistica 13.0 software package (StatSoft, Tulsa, Oklahoma, USA).

4. RESULTS

4.1 *Body composition in athletic groups in one-year cycle*

Detailed data on body composition (means, standard deviations, significance of differences, and effect sizes) can be found in Table A1, Publication 1, page 9. Sprinters had significantly higher total body mass than endurance athletes in three training phases (general, specific, and pre-competition). In sprinters, body mass increased from general to specific and pre-competition phases, while no significant changes were revealed in endurance athletes and controls.

Absolute and percentage fat mass were similar in sprinters and endurance athletes in the following training phases: general, special and pre-competition. Although slightly lower values could be observed in sprinters, the differences remained statistically insignificant. Both athletic groups had significantly lower absolute and percentage fat mass than the control group in almost all training phases, except for the general preparation (non-significant difference between endurance athletes and the control group). In sprinters and endurance athletes, absolute and percent body fat mass were significantly higher in the general preparation than in subsequent training phases. No significant changes in fat mass were detected in the control group, although there was some tendency for fat mass to decrease in the last training phase.

Sprinters had significantly higher both absolute and percentage SMM than endurance athletes and controls in all training phases. There were no significant differences in SMM between endurance athletes and controls. In sprinters, absolute SMM significantly increased from the general to the specific and pre-competition phases. During the training cycle analyzed, there was no significant change in percentage SMM in none of the three groups.

4.2 Maximum oxygen uptake indicators: Comparison within athletic groups and training phases

Detailed changes in $\dot{V}O_{2\max}$ are shown in Table A2, Publication 1, page 11. Across the training cycle, a significant increase in $\dot{V}O_{2\max}$ indicators (absolute, total body mass-, and SMM-adjusted values) were only observed in controls between the general and pre-

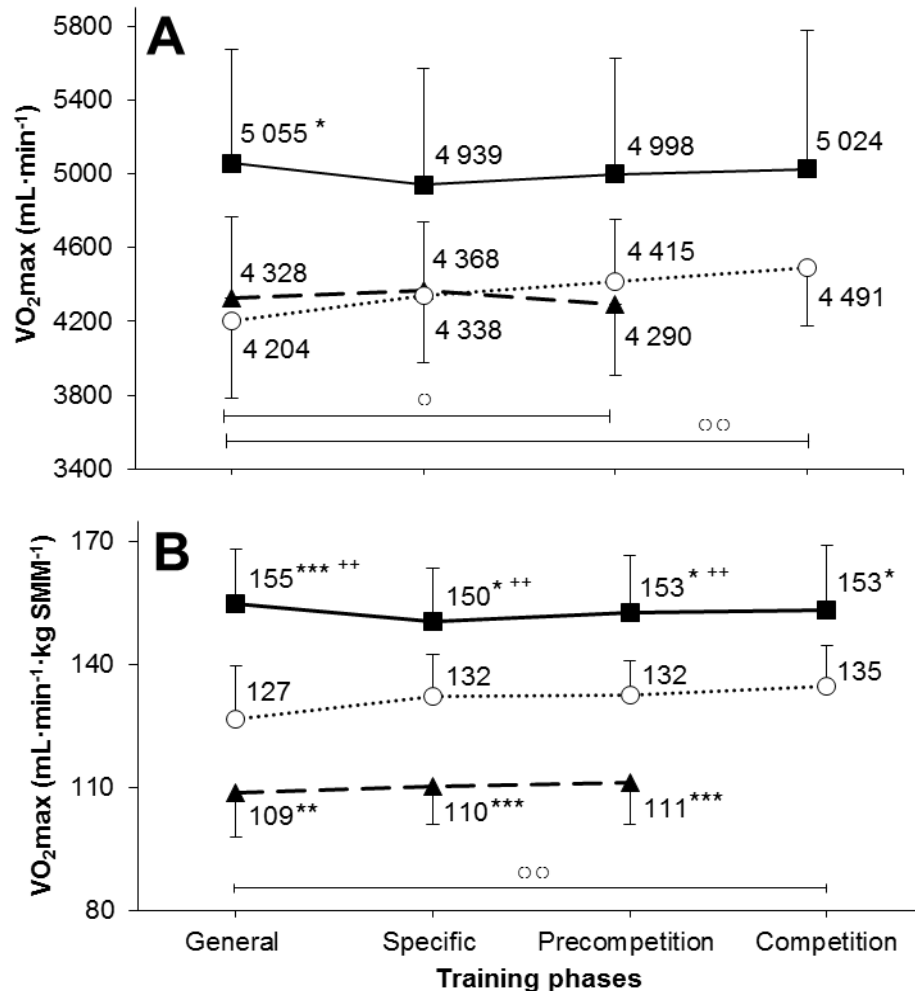


Figure 1. Changes in maximal oxygen uptake (absolute and relative values) between consecutive phases of the one-year training cycle. Panel A – absolute values, Panel B – per kilogram of skeletal muscle mass (SMM). Legend: ■— endurance athletes, ▲— sprinters, ○····· control group

○ $p < 0.05$, ○○ $p < 0.01$ – significant differences between training phases in the control group

++ $p < 0.001$ – significantly different from sprinters at the same training phase

* $p < 0.05$, ** $p < 0.001$, *** $p < 0.01$ – significantly different from controls at the same training phase

competition or competition phase. In sprinters and endurance runners, none of the above $\dot{V}O_{2\max}$ indicators changed significantly. However, depending on the $\dot{V}O_{2\max}$ measure used, the size of the difference between speed-power, endurance, and control group varied. For absolute $\dot{V}O_{2\max}$ (l/min), the only significant difference was between endurance athletes and controls in the general preparation phase (Figure 1, Panel A, below). More pronounced differences were observed for weight-adjusted $\dot{V}O_{2\max}$, i.e. endurance athletes significantly

differed from speed-power and control groups in all training phases. The sprint and control groups did not differ in weight-adjusted $\dot{V}O_{2\max}$. Significant differences between sprint and control group emerged for SMM-adjusted $\dot{V}O_{2\max}$. As a result, the control group had higher SMM-adjusted $\dot{V}O_{2\max}$ than sprinters in all training phases (Figure 1, Panel B, above).

4.3 *Maximum oxygen uptake in female and male athletes*

In line with the main assumption of this research and resulting purposive sampling, there were no significant differences in SMM-adjusted $\dot{V}O_{2\max}$ between female and male athletes in either the endurance or sprint group. The weight-adjusted $\dot{V}O_{2\max}$ was significantly lower in female than male athletes in the endurance, but not in the sprint group. The absolute $\dot{V}O_{2\max}$ was lower in female athletes in both athletic groups. Regardless of sport specialization, running velocity at $\dot{V}O_{2\max}$ was significantly higher in male than female athletes. Detailed results can be found in Table 1 in Publication 2.

4.4 *Body composition in female and male athletes*

In both athletic groups, females had lower height, BMI, and RSMI than males. Also, total body mass and all indices related to SMM had higher values in male than female athletes. Absolute and percentage total and regional fat content were higher in female than male athletes, regardless of sporting discipline. The exception was absolute fat mass (total, legs, arms, trunk, and android area) in the sprint group in which insignificant differences were observed. Detailed results can be found in Tables 1 and 2 in Publication 2.

4.5 *Cardiopulmonary and hematological parameters in female and male athletes*

In both athletic groups, female athletes had significantly lower values of maximal oxygen pulse, minute ventilation, tidal volume, breathing frequency, RBC count, HGB concentration, and HCT levels. Maximum heart rate, MCV, MCH, MCHC, and RDW-CV were similar between female and male athletes, except for sprinters' MCH that was higher in female than male athletes. Detailed results can be found in Table 3 in Publication 2.

4.6 *Size of the sex differences*

The effect size for sex differences was large (Cohen's $d > 0.8$) or very large (Cohen's $d > 1.4$) in most variables analysed. It partly depended on sport specialization and type of the factor limiting $\dot{V}O_{2\max}$ (Figure 2, below). In endurance athletes, the largest effect size was observed for most factors related to body composition, in particular total fat mass ($d = 3.7$) and total SMM ($d = 3.8$). In the sprint group, the effect size for body components was also large, but

about twice as small as in the endurance group ($d=1.5$ and 1.7 , respectively). In general, sex differences in body composition were larger in endurance- than sprint-trained athletes. As far as cardiorespiratory factors and oxygen-carrying capacity of the blood were concerned, the size of sex differences were quite similar between the endurance and sprint group ($d=0.9-2.1$ vs. $d=0.8-2.3$, respectively). For cardio-respiratory factors, the largest effect size was observed for maximal oxygen pulse (endurance group $d=2.1$ vs. sprinters $d=2.3$), minute ventilation ($d=1.8$ vs. 1.5 , respectively), and tidal volume ($d=1.0$ vs. 1.6 , respectively). Largest sex differences in hematological indices were noted for hemoglobin ($d=2.0$ vs. 1.0 , respectively) and hematocrit ($d=1.0$ vs. 1.8 , respectively).

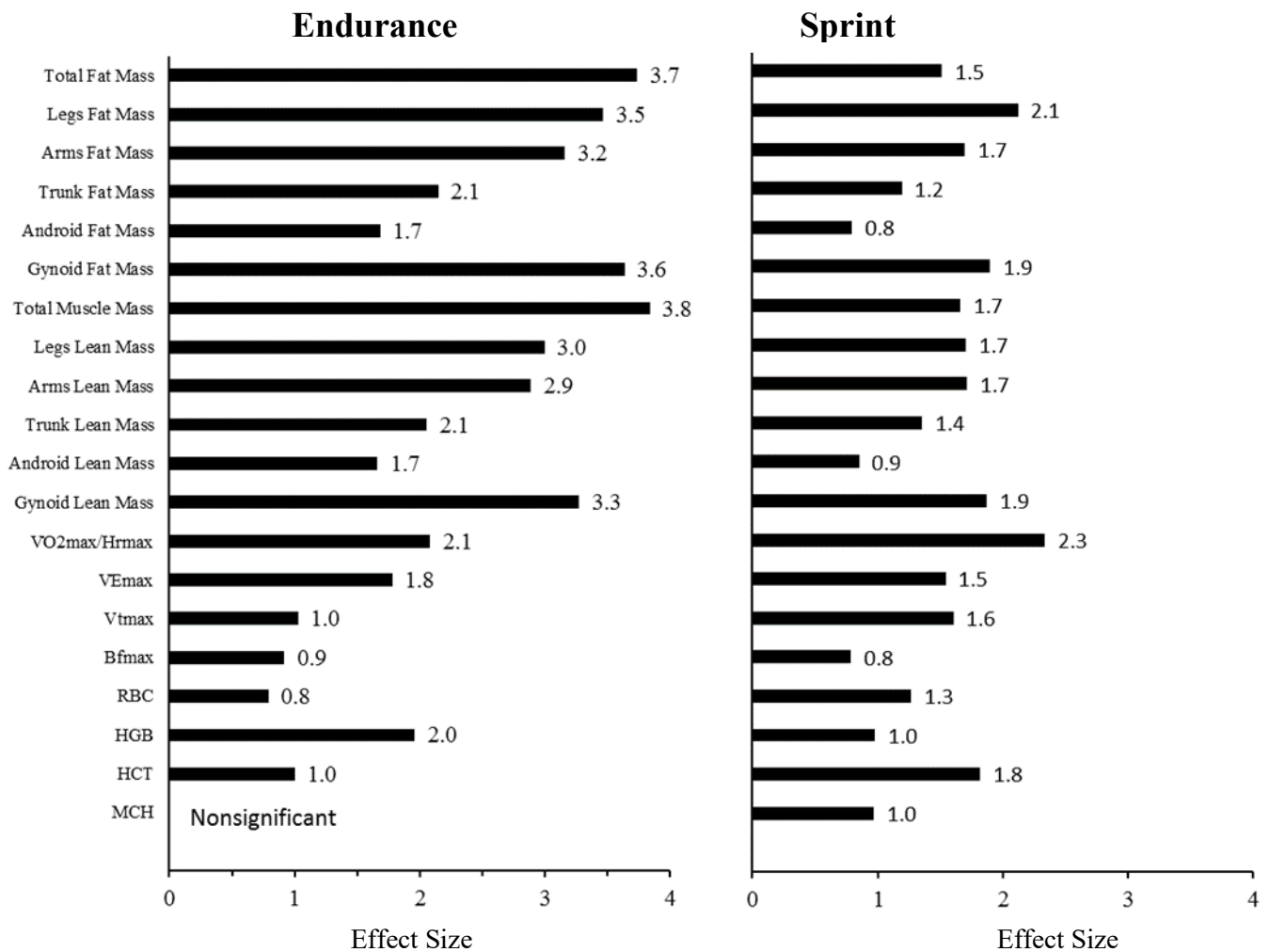


Figure 2. The size of the differences in factors limiting maximum oxygen uptake between male and female athletes. Values are expressed as Cohen's d effect size, considered small, medium, large, or very large if Cohen's d is 0.2, 0.5, 0.8, and 1.4, respectively

5. DISCUSSION

5.1 *Main findings*

This is the first attempt to analyze the changes in SMM-adjusted $\dot{V}O_{2\max}$ across a one-year training cycle in competitive speed-power and endurance athletes. This is also the first time to determine the size of sex differences in main factors limiting $\dot{V}O_{2\max}$ between female and male athletes matched according to the strict criterion of very close $\dot{V}O_{2\max}$ per kilogram SMM.

The major findings included: (i) the profile of change in SMM-adjusted $\dot{V}O_{2\max}$ in a one-year training cycle was not different from the change in weight-adjusted $\dot{V}O_{2\max}$; (2) the size of the between-group differences in $\dot{V}O_{2\max}$ depended on the $\dot{V}O_{2\max}$ measure used, i.e. significant differences between sprinters and controls emerged when SMM-adjusted $\dot{V}O_{2\max}$ values were used, without significant differences for standard $\dot{V}O_{2\max}$ measures; (3) male and female athletes with equal $\dot{V}O_{2\max}$ per 1 kg SMM significantly differed in main factors limiting $\dot{V}O_{2\max}$, and (4) the profiles of sex differences were partly related to the type of training adaptation (sporting discipline).

5.2 *Hypothesis 1*

SMM-adjusted $\dot{V}O_{2\max}$ changes in a one-year training cycle according to a different pattern than total body mass-adjusted $\dot{V}O_{2\max}$.

This hypothesis has been not confirmed. In controls, as well as in both athletic groups, the profile of change was very similar regardless of $\dot{V}O_{2\max}$ measure. In endurance athletes, high $\dot{V}O_{2\max}$ is associated with years of intense training. When analyzing the obtained results, one can notice that the changes in $\dot{V}O_{2\max}$ in endurance athletes throughout the year were small and not significant. It seems that no index of maximal aerobic capacity, whether it be a weight- or SMM-adjusted one, is not adequate to diagnose the training status in highly trained endurance athletes. Despite visible reductions in absolute and percentage fat mass in endurance athletes across the training phases, there was no increase in $\dot{V}O_{2\max}$. The likely explanation is that some determinants of $\dot{V}O_{2\max}$, e.g. muscle adaptation to endurance training, such as mitochondrial enzyme activity, muscle capillarization, or other central and peripheral factors [Andersen i Henriksson 1977, Holloszy i Coyle 1984, Joyner 2017], had been optimized and could not be substantially improved in this highly trained group.

In sprinters, despite changes in body composition (significant reduction in body fat) there were also no significant change in $\dot{V}O_{2\max}$ between consecutive training phases. It might result from specific training and physical capacity requirements. Sprint is an all-out high-

intensity exercise thus athletes focus on the development of dynamic strength and power necessary to maximize speed ability, not on improvements in aerobic capacity [Haugen et al. 2019, Loturco et al. 2019], even though an optimal level of the latter is beneficial. It must be stressed that skeletal muscles in sprinters have a relatively low capillary and mitochondrial density resulting in lower oxygen extraction from blood and lower $\dot{V}O_{2\max}$ [Torok et al. 1995, Zwaard et al. 2018]. Sprinters focus on training that supports anaerobic metabolism being the main energy source for muscle activity. Such type of training does not promote high activity of aerobic enzymes [Bompa and Haff 2009, Ross and Leveritt 2001]. It is also worth noting that the absolute SMM in sprinters analyzed in this dissertation (~40 kg) was close to the upper limit of ~45 kg beyond which $\dot{V}O_{2\max}$ usually reaches a plateau or even decreases as suggested by Beekley [2006].

In controls, unlike in athletes, significant changes in $\dot{V}O_{2\max}$ indicators between consecutive phases were observed, despite no significant change in main body components. It appears that central and peripheral adaptations supporting $\dot{V}O_{2\max}$ were not maximized in recreationally active individuals, contrary to endurance- and sprint-trained athletes. The control group responded more strongly to training stimuli because of their relatively low level of $\dot{V}O_{2\max}$ at the start of the one-year cycle under consideration, even if their training loads were milder than in competitive athletes [Zwaard i wsp. 2018].

5.3 Hypothesis 2

The size of the differences in $\dot{V}O_{2\max}$ between speed-power, endurance, and amateur athletes depends on the measure of $\dot{V}O_{2\max}$ used (SMM- vs total body mass-adjusted)

This hypothesis has been confirmed. In previous studies on the relationship between SMM and $\dot{V}O_{2\max}$, it was suggested that SMM-adjusted $\dot{V}O_{2\max}$ might be a more relevant measure than weight-adjusted $\dot{V}O_{2\max}$ for the evaluation of aerobic power [Proctor i Joyner 1997, Sanada i wsp. 2005]. Moreover, Beekley et al. [2006] developed the term *aerobic muscle quality*, meaning the amount of oxygen consumed per 1 kg of SMM. Such a tool could help to make more correct comparisons of $\dot{V}O_{2\max}$ between individuals differing in fat content and total body mass or individuals representing different sports and training status.

In support of the claims made by other authors, the results of this dissertation show higher $\dot{V}O_{2\max}$ per SMM in the control group than in the sprint group, while no significant differences in absolute and weight-adjusted $\dot{V}O_{2\max}$ were observed between these groups. Several factors could affect this phenomenon. First, sprinters' SMM significantly increased across the one-year cycle, while this body component remained in principle unchanged in controls. Second, the control group consisted of recreationally endurance-oriented active men. Endurance training

modifies central (pulmonary diffusing capacity, maximal cardiac output, the oxygen-carrying capacity of the blood) and peripheral (skeletal muscle characteristics) factors affecting $\dot{V}O_2\text{max}$ [Bassett et al. 2000, Jacobs et al. 2011]. Skeletal muscles exposed to endurance training use the energy resources from fat tissue to a greater extent (thus sparing muscle glycogen and blood glucose) and produce less lactate during exercise. Besides, more mitochondria allow more oxygen to be extracted from the blood by contracting muscles [Bassett et al. 2000, Jacobs et al. 2011]. These typical muscle adaptations in endurance-trained individuals can explain significant differences in SMM-adjusted $\dot{V}O_2\text{max}$ that emerged between sprinters and controls, even though they were not detectable using standard $\dot{V}O_2\text{max}$ measures.

To sum up, the results of Publication 1 show that in competitive athletes of different specializations (sprint vs. endurance) and recreationally active individuals the profiles of one-year changes in weight-adjusted and SMM-adjusted $\dot{V}O_2\text{max}$ are not different. However, adjusting $\dot{V}O_2\text{max}$ for SMM reveals differences in maximal aerobic capacity between groups differing in athletic levels and training adaptations.

5.4 Hypothesis 3

Male and female athletes with very similar $\dot{V}O_2\text{max}/\text{SMM}$, representing similar training history, training status and sport specialisation, differ in the level of the main factors limiting $\dot{V}O_2\text{max}$

5.4.1 Body composition

In this regard, the hypothesis has been confirmed. When analysing the results, one can observe that absolute and percentage SMM and fat mass content very strongly differentiated male and female athletes equated in terms of $\dot{V}O_2\text{max}/\text{SMM}$. In both the endurance and sprint group, the pattern of sex differences in body composition was similar to that reported in previous research [Cureton and Sparling 1980, Thorland et al. 1981, Sandbakk et al. 2018]. Female athletes have significantly lower fat-free and muscle mass content but substantially higher total and regional fat content. However, using the strict matching procedure based on equal $\dot{V}O_2\text{max}/\text{SMM}$, not solely on training experience, may result in sex differences in body composition that are closer to reality than in earlier studies.

Despite equal aerobic capacity per 1 kg SMM in male and female athletes, the primary metabolic consequence of higher body fat percentage in females is increased energy demand for running, without increasing their ability to produce energy [Cureton and Sparling 1980]. Consequently, females in this study reached their $\dot{V}O_2\text{max}$ at a speed lower by ~10% or ~2 km/h than males. This was consistent with the study by Cureton and Sparling [1980] who loaded

males with external weight to simulate fat content typical of females. The intervention reduced sex differences in weight-adjusted $\dot{V}O_{2\max}$ by 65%, but the differences in relative $\dot{V}O_{2\max}$ (per 1 kg fat-free mass) and running performance narrowed only by 38% and 30–32%, respectively. Also, Diaz-Canestro et al. [2021] postulated that a higher percentage of body fat (being the less metabolically active tissue) in female athletes is “a weight-bearing handicap of the female cardiovascular system to power whole-body aerobic work”.

5.4.2 *Cardiopulmonary factors*

This aspect of the hypothesis was confirmed, except for one parameter. When analysing the results of this dissertation and other studies, one can observe that the differences in $\dot{V}O_{2\max}$ between male and female athletes are not related to maximal heart rate [Costill et al. 1976, Cureton et al. 1986, Hutchinson et al. 1991, Sandbakk et al. 2018]. However, oxygen pulse ($\dot{V}O_{2\max}/HR_{\max}$), being an indirect indicator of cardiac stroke volume, differed significantly between sexes, especially in the sprint group. This can be explained by usually larger cardiac chamber dimensions and thicker walls in males, contributing to higher $\dot{V}O_{2\max}$ [Costill et al. 1976, Cureton et al. 1986, Hutchinson et al. 1991, Sandbakk et al. 2018]. In both athletic groups, males had higher maximum minute ventilation resulting from larger tidal volume and higher breathing rate. Larger tidal volume is related to larger lungs dimensions airways diameter [Costill et al. 1976, Thorland et al. 1981, Wonisch et al. 2003]. Higher breathing frequency in male athletes may be explained by reaching a plateau in tidal volume later than in females [Sheela et al. 2008]. After this point, a further increase in minute ventilation is achieved mainly by increasing the respiratory rate. In addition, longer running time in male athletes results in a higher absolute oxygen consumption and dioxide production and, therefore, higher ventilation requirements [Sheel et al. 2008]. Similarly, other researchers revealed significant sex differences in cardiorespiratory factors, especially in maximal minute ventilation in endurance-trained individuals [Guenette et al. 2007] and in groups matched using $\dot{V}O_{2\max}$ per 1 kg fat-free mass [Hutchinson et al. 1991].

5.4.3 *Oxygen-carrying capacity of the blood*

It was confirmed that sex differences in oxygen transport capacity were still visible in male and female with similar $\dot{V}O_{2\max}/SMM$ levels. The results regarding the sex differences in oxygen transport capacity were similar to those presented in other studies, in which the authors matched participants using criteria such as equal training and competition experience or equal $\dot{V}O_{2\max}$ per fat-free mass [Cureton et al. 1986, Hutchinson et al. 1991, Rietjens et al. 2002]. Our results support the view that sex differences in hematological parameters only

account for a small portion of the differences in $\dot{V}O_{2\max}$ [Cureton et al. 1986, Hutchinson et al. 1991, Rietjens et al. 2002]. A recent review on transgender women in sport [Hilton and Lundberg 2021] suggests that although higher hemoglobin concentration is dependent on testosterone levels – the latter reaching higher levels in males and indirectly supporting aerobic capacity – but this is not the main hematological factor contributing to sex differences in $\dot{V}O_{2\max}$. It seems that the factors associated with greater blood volume in males related to increased cardiac preload, larger stroke volume and maximal cardiac output – leading together to increased oxygen delivery capacity – are more crucial to sex differences in $\dot{V}O_{2\max}$ than oxygen transport capacity of the blood [Cureton et al. 1986, Diaz-Canestro and Montero 2019, Hilton and Lundberg 2021, Hutchinson et al. 1991, Ransdell and Wells 1991, Rietjens et al. 2002].

5.5 Hypothesis 4

The profile of sex differences in factors limiting $\dot{V}O_{2\max}$ depends on training adaptations related to sports specialization.

The obtained results suggest that significant sex differences in factors limiting $\dot{V}O_{2\max}$ occur independently of sport specialisation. However, it seems that the size of differences is somehow dependent on the specificity and adaptive requirements of a given sport discipline. The sex differences in body composition were greater in endurance athletes than sprinters. The magnitude of differences in cardiorespiratory factors were similar in both sports groups. The differences in blood parameters were ambiguous.

In endurance sports, the strength of sex differences in SMM and fat mass was almost twice as high as in the sprint group. Female sprinters had percentage SMM and fat mass closer to male values than female endurance athletes. Smaller differences in the sprint group may result from the specificity and training goals of the discipline aimed at building a relatively large muscle mass, improving developing strength and power, and minimizing fat mass. Due to the very short duration of sprint exercise, fat is a nonsignificant source of energy for muscle activity but rather a 'unnecessary ballast' [Bompa and Haff 2009, Loturco et al. 2017, Ross and Leveritt 2001]. For this reason, female sprinters, to maximize their athletic performance, approach the male pattern of SMM and fat mass more than female long-distance runners or triathletes in relation to their male counterparts. In contrast, long-distance running is associated with a relatively small SMM and specific metabolic muscle adaptations. Therefore, female endurance athletes do not emphasize SMM development as much as female sprinters do. Moreover, endurance sports are associated with aerobic metabolism, for which the energy is supplied to a great extent from fat tissue and its substrates released in a longer time. As a result,

there is no need for excessive fat reduction in female runners or triathletes and the gap between female and male body composition remains larger than in sprint disciplines. However, it should be noted that higher SMM predisposes to the storage of greater muscle glycogen amounts contributing to improvements in physical capacity and sport performance in endurance sports [Chesley et al. 1996, Green et al. 1992, Holloszy and Coyle 1984], hence some increases in SMM in female endurance athletes could be also beneficial.

The differences related to cardiorespiratory factors were similar between the endurance and sprint group for almost all analyzed variables. The exception was tidal volume, which differentiated more strongly between women and men in the sprint group. Muscle mass in the sprint group was important for athletic performance and different between males and females. Similarly, tidal volume, an important aspect of endurance exercise, differed less in the endurance group. Smaller differences in tidal volume between males and females in the endurance group may be due to better training-induced adaptation of the lungs and respiratory muscles [Hackett 2020]. Here again, specific training developing cardiopulmonary mechanisms may support an 'equalization' of tidal volume between the sexes.

The indicators related to blood oxygen transport did not provide a fully unambiguous picture. Assuming – by analogy to body composition, heart function, and respiratory function – that sex differences are smaller for physiological parameters relevant for athletic performance, all haematological indices should be less different between sexes in the endurance than sprint group. Indeed, this is the case for erythrocyte, haematocrit, mean corpuscular volume, mean haemoglobin mass concentration, mean haemoglobin concentration, or red cell volume distribution spread. However, haemoglobin concentration, being undoubtedly important for endurance athletes, differentiates the sexes more in the endurance than sprint group. A significant feature of endurance training is the development of adaptations related to oxygen transport in the blood [Bassett and Howley 2000], so hemoglobin levels in females and males should differ less than in sprinters. However, it is worth noting that in this dissertation haemoglobin levels were very similar between the endurance and sprint groups within the same sex, thus this parameter was not specific to sport specialisation. This observation is not surprising. Previous studies showed that endurance athletes (and not only) have often haematological parameters close to the lower limits of population norms or even below [Broadbent 2011, Malczewska et al. 2001, Rietjens et al. 2002], especially during periods of intense training [Banfi et al. 2011, Ciekot-Sołtysiak et al. 2017]. In this dissertation, the comparison was performed exactly at such a critical moment (pre-competition phase). The obtained haematological picture may be due to, among other things, the well-known

phenomenon of sports anaemia [Green et al. 1991, Haymes and Lamanca 1989, Hunding et al. 1981, O'Toole et al. 1988, Rietjens et al. 2002].

To summarize Publication 2, one can notice that significant differences in the main factors limiting $\dot{V}O_2\text{max}$ still exist between male and female athletes representing the same SMM-adjusted maximum aerobic capacity. The size and profile of the sex differences partly depend on sport specialization and associated physiological adaptations.

5.6 *Strengths and limitations*

The strength of this study was using the dual-energy X-ray absorptiometry method, which is currently the most accurate and useful methods to precisely estimate SMM in competitive athlete. This method is comparable to measurements using magnetic resonance imaging or computed tomography, but not posing problems with accessibility, costs, or risks associated with X-ray dose. In addition, the study included highly trained athletes who constituted two representative groups in terms of different sport specialisations and physiological adaptations. Previous studies only included endurance-trained groups or individuals not involved in competitive sport. The presented research for the first time included highly trained sprinters in the context of $\dot{V}O_2\text{max}$, broadening the spectrum of analysis of the studied problem.

The presented research has some limitations. In Publication 1, sprint-trained athletes were only tested in three training phases of the one-year training cycle. This was because the endurance test in the competition phase could have an adverse effect on sprinters' preparation for the upcoming competitions. However, we believe that both body composition and $\dot{V}O_2\text{max}$ would not significantly change from the pre-competition to competition period in this group, thus the impact on the main study results seems to be limited. The results from Publication 1 are limited to highly trained male athletes. The pattern of one-year changes in SMM-adjusted $\dot{V}O_2\text{max}$ in female athletes deserves separate exploration. Furthermore, factors related to the morphological and biochemical properties of the skeletal muscle were not analyzed in Publication 2. Also, body water content, an important component of the body and the main component of muscle tissue, was not taken into account.

6. CONCLUSIONS

1. In competitive athletes, the profile of one-year changes in SMM-adjusted $\dot{V}O_{2\max}$ was no different from the profile of changes in $\dot{V}O_{2\max}$ expressed as standard measures.
2. Adjusting $\dot{V}O_{2\max}$ for SMM allows detecting the differences in maximal aerobic capacity between groups of different training specialization and training status, while the differences disappear when using standard measures of oxygen uptake.
3. There are still significant differences in main factors limiting $\dot{V}O_{2\max}$ between male and female competitive athletes with equal aerobic capacity expressed as maximum oxygen uptake per kg SMM.
4. The profile of sex differences in factors limiting $\dot{V}O_{2\max}$ partly depends on sports specialization and related typical physiological adaptations.

6.1 Practical implications

It seems that the SMM-adjusted $\dot{V}O_{2\max}$ can reveal significant differences in maximal aerobic capacity between groups of different sports specialisation or training status. This measure can, therefore, be a useful tool in selection for competitive sport to more precisely distinguish groups or individuals in terms of 'real' maximal aerobic capacity. In contrast, in experienced endurance athletes, the use of the SMM-adjusted $\dot{V}O_{2\max}$ as an indicator of 'aerobic muscle quality' seems not to be justified or necessary, because the pattern of change across consecutive training phases is consistent with the standard measures of $\dot{V}O_{2\max}$ and, primarily, it does not change significantly in highly trained athletes. In advanced endurance athletes, more sensitive measures of training status should be used in the context of aerobic capacity.

The presented study showed that significant sex differences in factors limiting $\dot{V}O_{2\max}$ occur irrespective of sport specialisation, but their size may be related to sports specialization. In sports practice, it is not possible, for purely biological reasons, to substantially modify specific factors limiting $\dot{V}O_{2\max}$ to improve female athletic performance as compared to male achievements. The factor limiting $\dot{V}O_{2\max}$ that most strongly differentiates men and women is body composition, especially body fat mass. This component can be modified within a very wide range in humans, so it could be assumed that a significant reduction in fat mass in female athletes would exert a positive effect on aerobic capacity and athletic performance. However, the risky lower limit here is the physiological minimum of 10–13% [[American Council on](#)

[Exercise 2003](#)]. In contrast, other factors affecting $\dot{V}O_{2\max}$ appear to be less modifiable, because they are strongly dependent on absolute body dimensions (e.g. lung volume, cardiac stroke volume) or remain by their very nature within rather narrow physiological ranges. Therefore, it seems that coaches should rely more on early selection for competitive sport, e.g. using indices such as $\dot{V}O_{2\max}/SMM$, and focusing on innate individual characteristics, rather than apply risky exercise, nutritional, or pharmacological interventions to female athletes, intended to 'correct' genetically determined physiological mechanisms.

III. Pósmiennictwo / References

1. American Council on Exercise (2003) *ACE personal trainer manual*. 3rd Ed., Chapter 6, Page 188, Table 6.14.
2. Andersen P, Henriksson J (1977) Capillary supply of the quadriceps femoris muscle of man: Adaptive response to exercise. *J Physiol*, 270, 677–690.
3. Andreato L, Esteves J, Gomes T, Andreato T, Alcantara B, Almeida D, Franzói De Moraes S (2010) Morphological profile of Brazilian jiu-jitsu athletes from different competitive level. *Rev Bras Med Esporte*, 18, 46–50.
4. Banfi G, Lundby C, Robach P (2011) Seasonal variations of haematological parameters in athletes. *Eur J Appl Physiol*, 111, 9–16.
5. Bassett D, Howley E (2000) Limiting factors for maximum oxygen uptake and determinants of endurance performance. *Med Sci Sports Exerc*, 32, 70–84.
6. Beekley M, Abe T, Kondo M, Midorikawa T, Yamauchi T (2006) Comparison of normalized maximum aerobic capacity and body composition of sumo wrestlers to athletes in combat and other sports. *J Sports Sci Med*, 5, 13–20.
7. Bompa T, Haff G (2009) *Periodization: Theory and methodology of training*. Human Kinetics, Champaign IL.
8. Broadbent S (2011) Seasonal changes in haematology, lymphocyte transferrin receptors and intracellular iron in Ironman triathletes and untrained men. *Eur J Appl Physiol*, 111, 93–100.
9. Chesley A, Heigenhauser G, Spriet L (1996) Regulation of muscle glycogen phosphorylase activity following short-term endurance training. *Am J Physiol*, 270, E328–E335.
10. Ciekot-Sołtysiak M, Kusy K, Podgórski T, Zieliński J (2018) Training-induced annual changes in red blood cell profile in highly-trained endurance and speed-power athletes. *J Sports Med Phys Fitness*, 58, 1859–1866.
11. Costill D, Thomason H, Roberts E (1973) Fractional utilization of the aerobic capacity during distance running. *Med Sci Sports*, 5, 248–252.
12. Cureton K, Bishop P, Hutchinson P (1986) Sex difference in maximal oxygen uptake. *Eur J Appl Physiol*, 54, 656–660.
13. Cureton K, Sparling P (1980) Distance running performance and metabolic responses to running in men and women with excess weight experimentally equated. *Med Sci Sports Exerc*, 12, 288–294.
14. Cureton K (1981) Matching of male and female subjects using VO_2max . *Res Q Exerc Sport*, 52, 264–268.
15. Delaney J, Thornton H, Scott T, Ballard D, Duthie G, Wood L, Dascombe B (2016) Validity of skinfold-based measures for tracking changes in body composition in professional rugby league players. *Int J Sports Physiol Perform*, 11, 261–266.
16. Diaz-Canestro C, Montero D (2019) Sex dimorphism of VO_2max trainability: A systematic review and meta-analysis. *Sports Med*, 49, 1949–1956.
17. Diaz-Canestro C, Pentz B, Sehgal A, Montero D (2021) Sex dimorphism in cardiac and aerobic capacities: The influence of body composition. *Obesity (Silver Spring)*, 29, 1749–1759.
18. Diaz-Canestro C, Pentz B, Sehgal A, Montero D (2022) Sex differences in cardiorespiratory fitness are explained by blood volume and oxygen carrying capacity. *Cardiovasc Res*, 118, 334–343.
19. Edvardsen E, Hem E, Anderssen S (2014) End criteria for reaching maximal oxygen uptake must be strict and adjusted to sex and age: a cross-sectional study. *PLoS One*, 9, e85276.
20. Farinatti B, Neto C (2011) The effect of between-set rest intervals on the oxygen uptake during and after resistance exercise sessions performed with large- and small-muscle mass. *J Strength Cond Res*, 25, 3181–3190.

21. González-Mendoza R, Gaytán-González A, Jiménez-Alvarado J, Villegas-Balcázar M, Jáuregui-Ulloa E, Torres-Naranjo F, López-Taylor J (2019) Accuracy of anthropometric equations to estimate DXA-derived skeletal muscle mass in professional male soccer players. *J Sports Med*, 1, 4387636.
22. Green H, Helyar R, Ball-Burnett M, Kowalchuk N, Symon S, Farrance B (1992) Metabolic adaptations to training precede changes in muscle mitochondrial capacity. *J Appl Physiol*, 72, 484–491.
23. Guenette J, Witt J, McKenzie D, Road J, Sheel A (2007) Respiratory mechanics during exercise in endurance-trained men and women. *J Physiol*, 581, 1309–1322.
24. Hackett D (2020) Lung function and respiratory muscle adaptations of endurance- and strength-trained males. *Sports (Basel)*, 8, 160.
25. 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 Med Open*, 5, 44.
26. Hill A, Long C, Lupton H (1924) Muscular exercise, lactic acid and the supply and utilisation of oxygen: Parts VII–VIII. *Proc Roy Soc Lond B*, 97, 155–176.
27. Hilton E, Lundberg T (2021) Transgender women in the female category of sport: Perspectives on testosterone suppression and performance advantage. *Sports Med*, 51, 199–214.
28. Holloszy J, Coyle E (1984) Adaptations of skeletal muscle to endurance exercise and their metabolic consequences. *J Appl Physiol*, 56, 831–838.
29. Hutchinson P, Cureton K, Outz H, Wilson G (1991) Relationship of cardiac size to maximal oxygen uptake and body size in men and women. *Int J Sports Med*, 12, 369–373.
30. Jacobs R, Rasmussen P, Siebenmann C, Díaz V, Gassmann M, Pesta D, Gnaiger E, Nordsborg N, Robach P, Lundby C (2011) Determinants of time trial performance and maximal incremental exercise in highly trained endurance athletes. *J Appl Physiol*, 111, 1422–1430.
31. Joyner M (2017) Physiological limits to endurance exercise performance: influence of sex. *J Physiol*, 595, 2949–2954.
32. Kim J, Wang Z, Heymsfield S, Baumgartner R, Gallagher D (2002) Total-body skeletal muscle mass: estimation by a new dual-energy X-ray absorptiometry method. *Am J Clin Nutr*, 76, 378–83.
33. Loturco I, Kopal R, Kitamura K, Fernandes V, Moura N, Siqueira F, Cal Abad C, Pereira L (2019) Predictive factors of elite sprint performance: Influences of muscle mechanical properties and functional parameters. *J Strength Cond Res*, 33, 974–986.
34. Malczewska J, Szczepańska B, Stupnicki R, Sendeki W (2001) The assessment of frequency of iron deficiency in athletes from the transferrin receptor-ferritin index. *Int J Sport Nutr Exerc Metab*, 11, 42–52
35. Martín-Matillas M, Valadés D, Hernández-Hernández E, Olea-Serrano F, Sjöström M, Delgado-Fernández M, Ortega F (2014) Anthropometric, body composition and somatotype characteristics of elite female volleyball players from the highest Spanish league. *J Sports Sci*, 32, 137–148.
36. Montero D, Madsen K, Meinild-Lundby A, Edin F, Lundby C (2018) Sexual dimorphism of substrate utilization: Differences in skeletal muscle mitochondrial volume density and function. *Exp Physiol*, 103, 851–859.
37. Nana A, Slater G, Hopkins W, Burke L (2012) Effects of daily activities on DXA measurements of body composition in active people. *Med Sci Sports Exerc*, 44, 180–189.
38. Proctor D, Joyner M (1997) Skeletal muscle mass and the reduction of VO₂max in trained older subjects. *J Appl Physiol*, 82, 1411–1415.
39. Ranković G, Mutavdžić V, Toskić D, Preljević A, Kocić M, Nedin-Ranković G, Damjanović N (2021) Aerobic capacity as an indicator in different kinds of sports. *Bosn J Med Sci*, 10, 44–48.

40. Rietjens G, Kuipers H, Hartgens F, Keizer H (2002) Red blood cell profile of elite Olympic distance triathletes. A three-year follow-up. *Int J Sports Med*, 23, 391–396.
41. Ross A, Leveritt M (2001) Long-term metabolic and skeletal muscle adaptations to short-sprint training implications for sprint training and tapering. *Sports Med*, 31, 1063–1082.
42. Sadowska J, Gębczyński A, Konarzewski M (2017) Selection for high aerobic capacity has no protective effect against obesity in laboratory mice. *Physiol Behav*, 175, 130–136.
43. Sanada K, Kearns C, Kojima K, Abe T (2005) Peak oxygen uptake during running and arm cranking normalized to total and regional skeletal muscle mass measured by magnetic resonance imaging. *Eur J Appl Physiol*, 93, 687–693
44. Sandbakk Ø, Solli G, Holmberg H (2018) Sex differences in world-record performance: The influence of sport discipline and competition duration. *Int J Sports Physiol Perform*, 13, 2–8.
45. Sheel A, Guenette J (2008) Mechanics of breathing during exercise in men and women. *Exerc Sport Sci Rev*, 36, 128–134.
46. Shete A, Bute S, Deshmukh P (2014) A study of VO₂max and body fat percentage in female athletes. *J Clin Diagn Res*, 8, 1–3.
47. Sparling P, Cureton K (1983) Biological determinants of the sex difference in 12-min run performance. *Med Sci Sports Exerc*, 15, 218–23.
48. Thorland W, Johnson G, Fagot T, Tharp G, Hammer R (1981) Body composition and somatotype characteristics of junior Olympic athletes. *Med Sci Sports Exerc*, 13, 332–338.
49. Torok D, Duey W, Bassett D, Howley E, Mancuso P (1995) Cardiovascular responses to exercise in sprinters and distance runners. *Med Sci Sports Exerc*, 27, 1050–1056.
50. Wells C, Plowman S (1983) Sexual differences in athletic performance: biological or behavioral? *Phys Sportsmed*, 11, 52–63.
51. Wilmore J, Costill D (2004) Physiology of sport and exercise. *Human Kinetics*, Champaign, IL.
52. Wonisch M, Hofmann P, Pokan R, Kraxner W, Hödl R, Maier R (2003) Spiroergometry in cardiology – physiology and terminology. *Austrian J Cardiol*, 10, 383–390.
53. Zwaard S, Laarse W, Weide G, Bloemers F, Hofmijster M, Levels K, Noordhof D, Koning J, Ruiten C, Jaspers R (2018) Critical determinants of combined sprint and endurance performance: an integrative analysis from muscle fiber to the human body. *FASEB J*, 32, 2110–2123.

IV. STRESZCZENIE

Cele: Ocena poziomu i zmian maksymalnego poboru tlenu ($\dot{V}O_2\max$) w przeliczeniu na jednostkę masy mięśni szkieletowych (SMM) u sportowców wyczynowych odmiennych specjalności w rocznym cyklu treningowym oraz ocena wielkości różnic międzypłciowych w zakresie głównych czynników ograniczających $\dot{V}O_2\max$ z uwzględnieniem SMM.

Metody: W pierwszej publikacji przebadano sprinterów ($n=12$), zawodników reprezentujących sporty wytrzymałościowy ($n=10$) oraz grupę kontrolną ($n=10$). W drugiej publikacji przebadano 46 sportowców: 26 w grupie wytrzymałościowej (13 mężczyzn oraz 13 kobiet) i 20 w grupie sprinterskiej (10 mężczyzn oraz 10 kobiet). Z zawodnicy reprezentowali krajowy lub międzynarodowy poziom. Skład ciała i SMM ustalono na podstawie metody absorpcjometrii promieniowania rentgenowskiego o dwóch energiach. $\dot{V}O_2\max$ zmierzono podczas testu wysiłkowego do odmowy na bieżni mechanicznej. Oznaczono wskaźniki hematologiczne. Pomiarów dokonano w czterech podokresach treningowymi rocznego cyklu treningowego.

Wyniki: Profil zmian $\dot{V}O_2\max$ w przeliczeniu na SMM w rocznym cyklu treningowym nie różnił się od zmian $\dot{V}O_2\max$ w przeliczeniu na całkowitą masę ciała. Wielkość różnic między grupami zależała od użytej miary $\dot{V}O_2\max$, ponieważ istotne różnice między sprinterami i grupą kontrolną pojawiły się, gdy użyto wartości $\dot{V}O_2\max$ przeliczonych na SMM lub LBM, przy braku różnic w przypadku standardowych miar $\dot{V}O_2\max$. Mężczyźni i kobiety o takim samym $\dot{V}O_2\max/SMM$ różnili się istotnie pod względem głównych czynników fizjologicznych ograniczających maksymalny pobór tlenu. Profil różnic międzypłciowych w zakresie czynników ograniczających $\dot{V}O_2\max$ zależał w pewnym stopniu od rodzaju adaptacji treningowej (dyscypliny sportu).

Wnioski: (1) U sportowców wyczynowych profil zmian $\dot{V}O_2\max$ w przeliczeniu na SMM w rocznym cyklu treningowym nie różni się od profilu zmian $\dot{V}O_2\max$ wyrażonego w standardowych miarach. (2) Przeliczenie $\dot{V}O_2\max$ na SMM pozwala na wykrycie istotnych różnic w maksymalnej wydolności tlenowej między osobami o odmiennej specjalizacji treningowej i poziomie sportowym, podczas gdy różnice te zacierają się przy zastosowaniu standardowych miar poboru tlenu. (3) U sportowców płci męskiej i żeńskiej o tej samej maksymalnej wydolności tlenowej w przeliczeniu na masę mięśniową nadal występują znaczące różnice międzypłciowe w zakresie czynników ograniczających $\dot{V}O_2\max$. (4) Wielkość różnic międzypłciowych w zakresie czynników ograniczających $\dot{V}O_2\max$ jest częściowo związana ze specyfiką treningu i fizjologicznymi adaptacjami typowymi dla specjalizacji sportowej.

ABSTRACT

Study aims: To evaluate the level and changes of maximal oxygen uptake ($\dot{V}O_{2\max}$) per unit of skeletal muscle mass (SMM) in competitive athletes of different specializations during a one-year training cycle and to assess the magnitude of sex differences in the main factors limiting $\dot{V}O_{2\max}$ including SMM.

Methods: In the first publication, sprinters (n=12), endurance athletes (n=10) and a control group (n=10) were studied. In the second publication, 46 athletes were studied: 26 in the endurance group (13 men and 13 women) and 20 in the sprint group (10 men and 10 women). The athletes represented national or international level. Body composition and SMM were determined using the dual energy X-ray absorptiometry method. $\dot{V}O_{2\max}$ was measured during an incremental exercise test on a mechanical treadmill. Hematological indices were determined. All measurements were performed in four training phases of the annual training cycle.

Results: The profile of $\dot{V}O_{2\max}$ changes per SMM across the one-year training cycle did not differ from changes in $\dot{V}O_{2\max}$ per total body weight. The magnitude of differences between groups depended on the measure of $\dot{V}O_{2\max}$ used, as significant differences between sprinters and the control group occurred when $\dot{V}O_{2\max}$ per SMM were used, with no differences for standard measures of $\dot{V}O_{2\max}$. Men and women with the same $\dot{V}O_{2\max}$ /SMM differed significantly in the main physiological factors limiting maximal oxygen uptake. The profile of sex differences in the factors limiting $\dot{V}O_{2\max}$ depended to some extent on the type of training adaptation (sport discipline).

Conclusions: (1) In competitive athletes, the profile of changes in $\dot{V}O_{2\max}$ per SMM across a one-year training cycle is not different from the profile of changes in $\dot{V}O_{2\max}$ expressed in standard measures. (2) Expressing of $\dot{V}O_{2\max}$ per kg SMM allows detection of significant differences in maximal aerobic capacity between individuals of different training specialization and athletic level, whereas these differences disappear when standard measures of oxygen uptake are used. (3) Male and female athletes with the same maximal aerobic capacity per muscle mass still show significant differences in the factors limiting $\dot{V}O_{2\max}$. (4) The size of sex differences in factors limiting $\dot{V}O_{2\max}$ is partly related to training specificity and physiological adaptations typical of sport specialization.

V. Publikacje i oświadczenia współautorów / Publications and co-authors' declarations



Article

Maximal Oxygen Uptake Adjusted for Skeletal Muscle Mass in Competitive Speed-Power and Endurance Male Athletes: Changes in a One-Year Training Cycle

Jacek Trinschek, Jacek Zieliński and Krzysztof Kusy *

Department of Athletics, Strength and Conditioning, Faculty of Sport Sciences, Poznan University of Physical Education, ul. Królowej Jadwigi 27/39, 61-871 Poznań, Poland; jactri@wp.pl (J.T.); jacekzielinski@wp.pl (J.Z.)

* Correspondence: kusy@awf.poznan.pl; Tel.: +48-61-8355270

Received: 31 July 2020; Accepted: 25 August 2020; Published: 27 August 2020



Abstract: We compared the changes in maximum oxygen uptake ($\dot{V}O_{2\max}$) calculated per skeletal muscle mass (SMM) with conventional $\dot{V}O_{2\max}$ measures in a 1-year training cycle. We hypothesized that the pattern of changes would differ between SMM-adjusted and absolute or weight-adjusted values, and the differences between groups of distinct training specialization and status will depend on the measure used. Twelve sprinters (24.7 ± 3.3 years), 10 endurance runners (25.3 ± 5.3 years), and 10 recreationally trained controls (29 ± 4.5 years) performed a treadmill test until exhaustion to determine $\dot{V}O_{2\max}$. Their SMM was estimated based on the dual X-ray absorptiometry method and a regression equation. The significance of differences was assessed using analysis of variance ($p \leq 0.05$). The pattern of the longitudinal change was not different between $\dot{V}O_{2\max}/\text{SMM}$ and standard measures. Also, the significance of differences between sprinters and endurance athletes remained similar regardless of the $\dot{V}O_{2\max}$ measure. Sprinters and controls had similar absolute ($\sim 4.3 \text{ L}\cdot\text{min}^{-1}$) and total weight-adjusted (~ 52 vs. $\sim 56 \text{ mL}\cdot\text{min}^{-1}\cdot\text{kg}$) $\dot{V}O_{2\max}$, but they significantly differed in SMM-adjusted $\dot{V}O_{2\max}$ (~ 110 vs. $\sim 130 \text{ mL}\cdot\text{min}^{-1}\cdot\text{kg SMM}^{-1}$). In summary, SMM-adjusted $\dot{V}O_{2\max}$ is not more useful than standard measures to track longitudinal changes in competitive athletes. However, it allows to better distinguish between groups or individuals differing in training status. The results of our study are limited to male athletes.

Keywords: maximum aerobic capacity; total weight; lean body mass; fat mass; DXA method

1. Introduction

Maximal oxygen uptake ($\dot{V}O_{2\max}$) is a widely used indicator of human aerobic capacity defined as the maximum rate of oxygen consumption. Conventionally, $\dot{V}O_{2\max}$ is expressed as an absolute rate of oxygen uptake per unit of time ($\text{mL}\cdot\text{min}^{-1}$) or as a weight-adjusted rate ($\text{mL}\cdot\text{min}^{-1}\cdot\text{kg}^{-1}$) [1–4]. The latter is a standard measure in athletes of various sports disciplines. Skeletal muscle mass (SMM) is the largest component of the adipose tissue-free body mass in humans [5], essential for athletic performance. Despite many differences in training and competition specificity, available research indicates that SMM content in athletes ranges from 40% to 48% of total body mass [6–11].

The body of literature on $\dot{V}O_{2\max}$ in competitive athletes in the context of SMM is very scarce (unlike the relationships with total body mass). This can be due to problems with accurate SMM estimation. Of particular interest are, therefore, studies where authors used most advanced methods, e.g., magnetic resonance imaging or dual-energy X-ray absorptiometry (DXA) to estimate SMM. Proctor & Joyner [11] demonstrated that reduced aerobic capacity per kilogram of appendicular SMM in highly trained older men and women contributed to reduced whole body $\dot{V}O_{2\max}$. Sanada et al. [12]

revealed that absolute peak $\dot{V}O_2$ was closely associated with total and regional SMM regardless of the whole body or fat-free mass. Similarly, Beekley et al. [13] indicated a strong relationship between SMM (kg) and absolute $\dot{V}O_{2\max}$ ($L \cdot \text{min}^{-1}$) in high-performance athletes. However, they also noticed that above a certain SMM level (~ 45 kg), the relationship between $\dot{V}O_2$ uptake and SMM was weakening and aerobic abilities of athletes reached a “plateau”.

It is suggested that in highly trained athletes, not only standard measures of $\dot{V}O_2$ (per kg of total body mass) but also SMM-adjusted $\dot{V}O_{2\max}$, called “aerobic muscle quality”, should be taken into account to obtain more accurate and reliable information on the changes in the training status [13]. To our best knowledge, there are no scientific reports that have compared the changes in SMM-adjusted $\dot{V}O_{2\max}$ in high-performance athletes of different specializations over a long period. This study aimed to evaluate the changes in SMM-adjusted $\dot{V}O_{2\max}$ in competitive highly trained speed-power and endurance athletes in a 1-year training cycle. We hypothesized that (i) the profile of changes in $\dot{V}O_{2\max}$ per kg SMM would differ from that per kg total body mass and (ii) the size of the differences in $\dot{V}O_{2\max}$ between speed-power, endurance, and amateur male athletes would depend on the measure of $\dot{V}O_{2\max}$ used (SMM- vs. total weight-adjusted).

2. Materials and Methods

2.1. Subjects

The study included 22 highly trained male athletes divided into two groups differing in sport specialization. Sprinters ($n = 12$) specialized in the distances of 100 and 200 m, were 24.7 ± 3.3 (range 21–31) years old with a training history of 7.42 ± 2.5 years. Endurance athletes were long-distance runners and triathletes ($n = 10$) aged 25.3 ± 5.3 (range 15–35) years with a competitive sport history of 8.0 ± 2.4 years. Some athletes were members of the Polish national team. The control group consisted of 10 healthy recreationally active men aged 29 ± 4.5 (range 23–35) years without previous and current professional sports experience, representing the model of regular but not competitive physical activity. The controls were invited to participate in the study through announcements in local mass media. The project was approved by the Ethics Committee at the Poznan University of Medical Sciences (decision No 1252/18 issued on 6 December 2018) and has been performed according to the ethical standards laid down in the Declaration of Helsinki. The participants were fully informed of the purpose and risks of the study and gave their written consent to participate. Basic characteristics of the participants at the start of the study are presented in Table 1. Controls were older than athletes. Sprinters were taller and had higher relative skeletal muscle mass index than endurance athletes and controls.

Table 1. Basic characteristics of the athletic groups and controls.

	Sprint	Endurance	Controls	ANOVA <i>p</i> -Value	Effect Size η^2
Age (years)	24.7 ± 3.3 (22.1–26.2) *	25.3 ± 5.3 (22.3–28.2) *	29 ± 4.5 (26–32)	<0.001	0.22
Sports history (years)	7.4 ± 2.5 (5.8–9.0)	8.0 ± 2.4 (6.3–9.7)	–	0.120	0.30
Height (cm)	185.8 ± 5.0 (182.1–188.2) *	181.6 ± 6.1 (178.2–185)	178.1 ± 5.6 (174.3–181.9)	0.029	0.33
BMI ($\text{kg} \cdot \text{m}^{-2}$)	23.6 ± 1.0 (22.8–24.3)	22.8 ± 1.9 (21.8–23.9)	24.8 ± 2.0 (23.4–26.1)	0.080	0.24
RSMI (kg)	9.6 ± 0.6 # (9.1–10.0) #	8.5 ± 0.6 (8.1–8.9)	9.0 ± 0.6 (8.6–9.4)	0.007	0.42

Values are expressed as mean \pm SD (95% CI). Abbreviations: BMI = body mass index; RSMI = relative skeletal muscle mass index. * $p < 0.05$ —significantly different from the control group; # $p < 0.01$ —significantly different from endurance athletes.

2.2. Study Design

A repeated-measures design was used to follow the changes in $\dot{V}O_{2\max}$ and body composition across a 1-year training cycle. We aimed to find patterns of the longitudinal change and between-group differences depending on the $\dot{V}O_{2\max}$ measure, i.e., absolute, weight-, LBM-, and SMM-adjusted values. All measurements were repeated four times in the following training phases of the annual training cycle: (1) beginning of the general preparation period, (2) beginning of the specific preparation

period, (3) beginning of the pre-competition period, and (4) beginning of the competition period. Training units and workloads used in the training process were strictly planned by the national team coaches. The 12-week general preparation aimed to develop physiological foundation for performance. Training volume was high and the intensity was low but slowly increasing (the number of training sessions in triathletes, long-distance runners, and sprinters was 181, 122, and 80, respectively). During the specific preparation period, also lasting 12 weeks, training volume decreased, whereas the intensity increased substantially (the number of training sessions: 132, 96, and 61, respectively). In the pre-competition period (10 weeks), training volume further decreased and the intensity increased (the number of training sessions: 179, 120, and 87, respectively). The competition period was characterized by reduced training volume and emphasis was placed on increasing intensity and quality of work to achieve peak performance before upcoming competitions. Sprinters were examined three times, i.e., they did not perform the exercise test until exhaustion in the competition phase to avoid any adverse effect on sprint ability. The control group did not periodize their training during the year analyzed. During the whole study period, they did workouts three to seven times a week at relatively constant training volume and intensity.

2.3. Methodology

Participants were recommended to avoid high-intensity and long-duration training sessions 24–48 h before each examination. All tests were conducted at the Human Movement Laboratory “LaBthletics” of the Poznan University of Physical Education. The measurements were performed in the morning, 2 h after a light breakfast (bread and butter, water, without coffee or tea). Before each exercise test, body composition was assessed. Then, subjects performed an incremental treadmill test until exhaustion. During all examinations, the ambient temperature was kept at 20–21 °C.

2.3.1. Body Composition and Skeletal Muscle Mass

Weight and height were measured using the SECA 285 measuring station (SECA GmbH, Hamburg, Germany) with an accuracy of 0.05 kg and 1 mm, respectively. To evaluate body composition, the DXA method (Lunar Prodigy device, GE Healthcare, Chicago, IL, USA) was used. Before each measurement session, the device was calibrated using a phantom, according to the manufacturer guidelines. During the examination, subjects only wore their underwear without jewelry or other metal objects, to minimize measurement error. All DXA scans were performed and analyzed by the same trained technician using enCORE 16 SP1 software (GE Healthcare, Chicago, IL, USA). All measurements were done following the standardized protocol proposed by Nana et al. [14] and manufacturer’s instructions. Three main components of the total-body model were measured: lean body mass (LBM), fat mass, and bone mineral content (the latter not analyzed in this study). In the literature, the DXA technical errors of measurement (expressed as intra-assay coefficients of variation or %CV) have been reported to be 0.1% for total body mass, 0.4% for LBM, 1.9% for fat mass, and 0.7% for BMC (21). In our laboratory, %CV values in young athletic individuals aged 23 ± 2.1 years were 0.2%, 0.4%, 1.0%, and 0.5%, respectively. Also, we calculated %CV for appendicular lean soft tissue (ALST; the sum of upper and lower limb LBM) and obtained a value of 0.8%. The regression model proposed by Kim et al. [5] was used to calculate SMM (kg) = $1.13ALST - 0.02Age + 0.61Sex + 0.97$, where 0 and 1 denoted women or men, respectively. Also, the relative skeletal muscle mass index was calculated according to the formula: $RSMI = ALST/Height^2$ (kg·m⁻²).

2.3.2. Maximum Oxygen Uptake

All athletes underwent incremental running tests (h/p Cosmos Pulsar treadmill, Sports & Medical GmbH, Nussdorf-Traunstein, Germany) to determine $\dot{V}O_2\max$. The initial speed was set at 4 km·h⁻¹ and after 3 min increased to 8 km·h⁻¹. After that point, the speed of the moving strip was progressively increasing by 2 km·h⁻¹ every 3 min until voluntary exhaustion. Main cardiorespiratory variables (minute ventilation, $\dot{V}E$; oxygen uptake, $\dot{V}O_2$; carbon dioxide output, $\dot{V}CO_2$) were measured constantly

(breath by breath) using the MetaLyzer 3B ergospirometer and analyzed using the MetaSoft Studio 5.1.0 software package (Cortex Biophysik GmbH, Leipzig, Germany). Before each test, the system was calibrated according to the manufacturer's instructions. Maximal oxygen uptake was considered achieved if at least three of the following criteria were met: (i) a plateau in $\dot{V}O_2$ despite an increase in speed and minute ventilation; (ii) blood lactate concentration ≥ 9 mmol·L⁻¹; (iii) respiratory exchange ratio ≥ 1.10 ; and (iv) heart rate $\geq 95\%$ of the age-predicted maximum heart rate [15]. Heart rate was measured continuously with the Polar Bluetooth Smart H6 monitor (Polar Electro Oy, Kempele, Finland).

2.3.3. Statistical Analysis

Data were presented as means and standard deviations (SD), and confidence intervals of the mean (95% CI). The Shapiro–Wilk test was used to check the data for normality of distribution. The assumption on sphericity was tested using the Mauchly's test, verifying if variances of certain variables were identical and equal to respective co-variances. The one-way analysis of variance (ANOVA) with repeated measures was used to compare the change between three (sprinters) or four (endurance athletes and controls) examinations across the annual training cycle. The one-way ANOVA was used to compare differences between the groups at each single training phase. The post hoc Scheffe's test was applied to indicate between which particular examinations or groups there were significant differences. The effect size for ANOVA was expressed as η^2 and defined as small (0.01), medium (0.06), or large (0.14). The statistical significance was set at $p < 0.05$. All analyses were performed using the Statistica 13.0 software package (Tibco Software Inc., Palo Alto, CA, USA).

3. Results

3.1. Body Composition

Sprinters had significantly higher total body mass than endurance athletes in three training periods (general, specific and pre-competition) (Table A1). In sprinters, total mass increased from general to specific and pre-competition phases, whereas no significant longitudinal changes were revealed in endurance athletes and controls.

Absolute and percentage fat mass was similar in sprinters and endurance athletes in all examinations, although slightly lower values were noted in sprinters (insignificant differences) (Figure 1A,B; Table A1). Both sprint and endurance groups had significantly lower absolute and percentage fat mass than controls in almost all examinations, except for the general phase (a non-significant difference between endurance athletes and controls). In sprinters and endurance athletes, absolute and percentage fat mass was significantly higher in the general phase than in the subsequent training phases. No significant change was detected in controls, even though there was a certain trend towards lower values in the competition phase, however, accompanied by large standard deviation.

Sprinters had significantly higher absolute LBM than endurance athletes and controls in the general, specific, and pre-competition phases (Figure 1C; Table A1). Endurance athletes had higher percentage LBM than controls in all training phases, except for the general phase (Figure 1D). Absolute LBM in sprinters and percentage LBM in both sprinters and endurance runners significantly increased between the general and the subsequent training phases (Figure 1C,D). No significant change in LBM was shown in the control group, in spite of slightly increasing percentage values between third and fourth examination (Figure 1D).

Sprinters had significantly higher both absolute and percentage SMM than endurance athletes and controls in all training phases (Figure 1E,F; Table A1). There were no significant differences in SMM between endurance athletes and controls. In sprinters (but not endurance athletes and controls), absolute SMM significantly increased from the general to the specific and pre-competition phases (Figure 1E). During the annual training cycle, there was no significant change in percentage SMM in any of the three groups (Figure 1F).

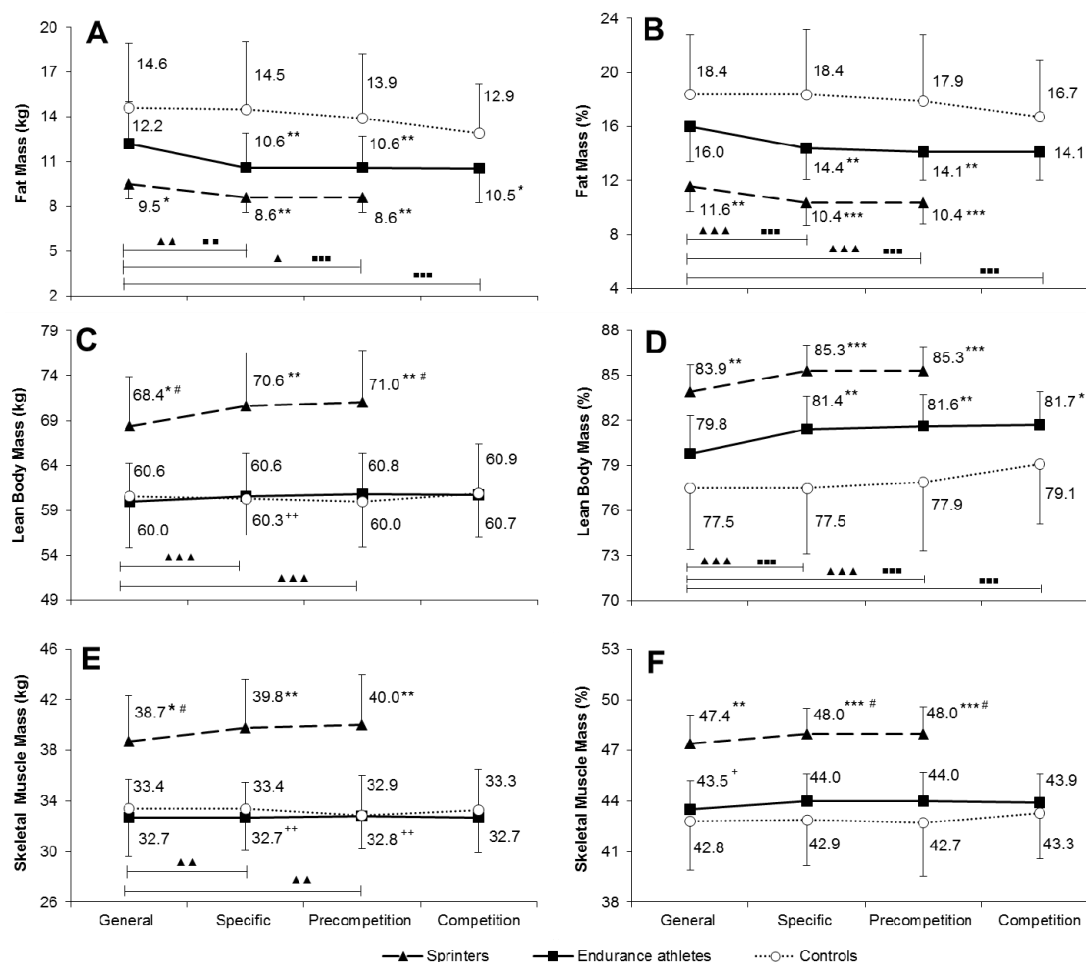


Figure 1. Changes in body composition expressed in absolute and percentage values between consecutive phases of the annual training cycle in athletic groups and controls. Panels (A,B)—fat mass; Panels (C,D)—lean body mass; Panels (E,F)—skeletal muscle mass. ▲ $p < 0.05$, ▲▲ $p < 0.01$, ▲▲▲ $p < 0.001$ —significantly different from the general preparation phase in sprinters; ■■ $p < 0.01$, ■■■ $p < 0.001$ —significantly different from the general preparation phase in endurance athletes; + $p < 0.05$, ++ $p < 0.01$ —significantly different from sprinters at the same training phase; # $p < 0.01$ —significantly different from endurance athletes at the same training phase; * $p < 0.05$, ** $p < 0.01$, *** $p < 0.001$ —significantly different from controls at the same training phase.

3.2. Maximal Oxygen Uptake

Across the annual training cycle, a significant increase in all $\dot{V}O_2\text{max}$ indicators (absolute, per total body mass, per LBM, or per SMM) was only observed in controls between the general and pre-competition or competition phase. In sprinters and endurance runners, none of the $\dot{V}O_2\text{max}$ measures changed significantly (Figure 2A–D; Table A2).

Depending on the $\dot{V}O_2\text{max}$ indicator used, the significance of the difference between speed-power, endurance, and amateur athletes varied. For absolute $\dot{V}O_2\text{max}$ ($\text{mL}\cdot\text{min}^{-1}$), the only significant difference was between endurance athletes and controls in the general preparation phase (Figure 2A, Table A2). For weight-adjusted $\dot{V}O_2\text{max}$, more pronounced differences were observed, i.e., endurance athletes significantly differed from speed-power and control groups in all training periods (Figure 2B; Table A2), however, sprinters and controls were not significantly different. Finally, when $\dot{V}O_2\text{max}$ was adjusted for LBM and SMM, there emerged significant differences between sprinters and controls in addition to previous differences for weight-adjusted $\dot{V}O_2\text{max}$ between endurance athletes and the other two groups. Consequently, the control group had higher LBM- and SMM-adjusted $\dot{V}O_2\text{max}$ than sprinters in all training phases (Figure 2C,D; Table A2).

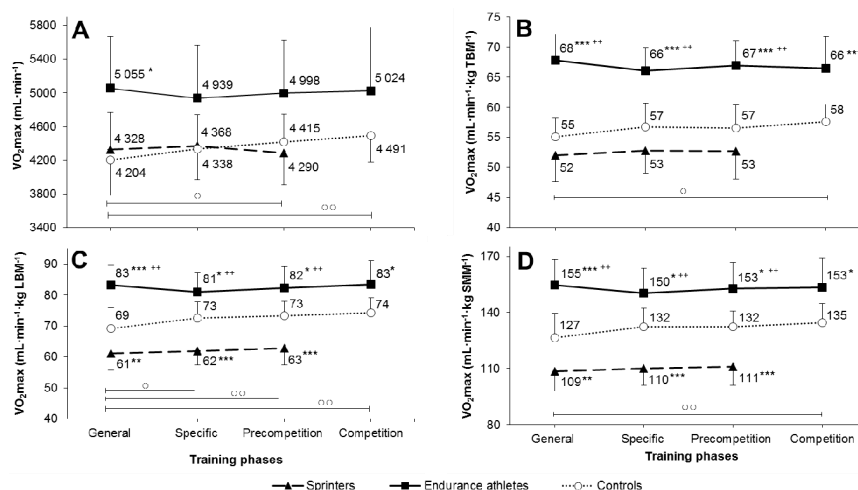


Figure 2. Changes in maximal oxygen uptake ($\dot{V}O_2\max$) between consecutive phases of the annual training cycle in athletes and controls. (A)—absolute values; Panel (B)—calculated per weight or kilogram of total body mass (TBM); Panel (C)—calculated per kilogram of lean body mass (LBM); Panel (D)—calculated per kilogram of skeletal muscle mass (SMM.) \circ $p < 0.05$, $\circ\circ$ $p < 0.01$ —significantly different from the general preparation phase in the control group; $++$ $p < 0.01$ —significantly different from sprinters at the same training phase; $\#$ $p < 0.01$ —significantly different from endurance athletes at the same training phase; * $p < 0.05$, ** $p < 0.01$, *** $p < 0.001$ —significantly different from controls at the same training phase.

4. Discussion

To our knowledge, this is the first study to analyze the changes in $\dot{V}O_2\max$ calculated per SMM across an annual training cycle in competitive athletes of different sports specializations. The major findings are that (i) the profile of change in SMM-adjusted $\dot{V}O_2\max$ in a 1-year training cycle is not different from the change in weight-adjusted $\dot{V}O_2\max$ and (ii) the between-group differences depend on the $\dot{V}O_2\max$ measure used, as shown by significant differences between sprinters and controls that emerged when SMM- or LBM-adjusted $\dot{V}O_2\max$ values were used.

4.1. Changes in $\dot{V}O_2\max$ between Training Phases

There is scarce research on $\dot{V}O_2\max$ expressed as relative values per kg of SMM [11,12]. Nevertheless, there were reasons to believe that the profile of the changes in SMM-adjusted $\dot{V}O_2\max$ across a 1-year training cycle would be different from that expressed as absolute and weight-adjusted values. However, this hypothesis has not been confirmed. In sprint- and endurance-trained athletes and controls, the profiles of change across training phases were very similar regardless of $\dot{V}O_2\max$ measure.

In endurance athletes, high $\dot{V}O_2\max$ is regarded as one of the necessary (although not sufficient) factors determining high endurance performance [16,17]. In response to years of intense training (apart from innate aptitudes), the level of $\dot{V}O_2\max$ is usually maximized and the observed seasonal changes can be negligible. Due to optimally high $\dot{V}O_2\max$ levels, endurance athletes are focused on other factors determining performance such as exercise response at lactate (anaerobic) threshold or exercise efficiency, e.g., “running economy” meaning the oxygen cost at a given running speed [16,18,19]. It seems that no indicator of maximal aerobic capacity, whether it be a weight- or SMM-adjusted one, is suitably sensitive to track training adaptations in highly trained athletes. On the other hand, the effect of body composition on endurance performance is still valid. For example, in male trained trial runners (age 36.1 ± 6.5 years), $\dot{V}O_2\max$ and fat mass percent were the two best predictors of race time among other physiological and body composition variables, explaining ~84% of the total variance in a multiple regression model [20]. Even if not considered in terms of cause and effect, the changes in body composition across training phases just accompany improvements in aerobic capacity and endurance performance as related physiological adaptations [21].

Available research indicates that body composition and its variations have a significant impact on $\dot{V}O_2\text{max}$. As mentioned in the introduction, absolute SMM in athletes is strongly directly proportional to absolute oxygen uptake (up to the suggested limit of ~ 45 kg of SMM). In highly trained male rowers (20 ± 2 years old), it was predicted based on a regression model that an increase in fat free mass by 1 kg should result in the gain in $\dot{V}O_2\text{max}$ by $0.16 \text{ L}\cdot\text{min}^{-1}$ [22]. Also, it is known that body fat strongly negatively correlates with $\dot{V}O_2\text{max}$ [13,23]. It can be assumed that body composition does matter in achieving high levels of aerobic capacity. However, our results showed that, despite reductions in absolute and percentage fat mass in endurance athletes across the training phases, there was no positive effect on $\dot{V}O_2\text{max}$. The likely explanation is that some determinants of $\dot{V}O_2\text{max}$, e.g., muscle adaptation to endurance training such as mitochondrial enzyme levels, capillary density or other central and peripheral factors [17,24,25], were maximized and could not be substantially improved in this highly trained group. Moreover, particular effects and relationships seem to depend on age, sex, training status, and athletic profile.

In controls, unlike in athletes, we observed significant changes in $\dot{V}O_2\text{max}$ indicators between consecutive examinations, despite no significant change in body components. Zwaard et al. [4] suggested that in amateurs adaptive changes such as capillaries or the type of muscle fibers were not as one-sided directed as in endurance- or sprint-trained professional athletes. Central and peripheral adaptations supporting $\dot{V}O_2\text{max}$ were not maximized in recreationally active individuals, thus our control group could have more strongly responded to training stimuli, even if their training loads were milder than in competitive athletes, because of their relatively low baseline level of $\dot{V}O_2\text{max}$ (compared to the other two groups) at the start the annual cycle under consideration.

In sprinters, the expected lack of significant changes in $\dot{V}O_2\text{max}$ between consecutive training phases (despite desired changes in body composition, i.e., fat mass reduction) results from their specific training and performance requirements. Sprint is an all-out high-intensity exercise and the distance covered during competition (including acceleration, achieving maximal velocity, and deceleration) lasts for up to several seconds [26]. It is recommended that elite sprinters should primarily focus on increasing their relative muscle power production using ballistic exercises to maximize speed performance [27]. It is clear that $\dot{V}O_2\text{max}$ is not crucial for sprint performance. On the other hand, at the early stage of the annual training cycle (the general preparation phase), sprinters' workouts include a certain amount of aerobic exercise to reach an optimal level of aerobic capacity. This allows speed-power athletes to better tolerate training loads necessary for speed and speed endurance development [28]. Despite the significant decrease in body fat in sprinters, there was no positive effect on their $\dot{V}O_2\text{max}$. This may be associated with the simultaneous increase in SMM, the large amount of which is typical of sprinters. Our sprinters have approached the "upper limit" of SMM (~ 40 kg vs. the ~ 45 kg proposed by Beekley [13]), beyond which $\dot{V}O_2\text{max}$ is plateauing or even decreasing. More importantly, skeletal muscles in speed-power athletes are characterized by a relatively low capillary density and mitochondrial density, resulting in lower O_2 extraction from the blood by contracting muscles and, consequently, in lower $\dot{V}O_2\text{max}$ [4,29]. This athletic group focuses on training supporting anaerobic metabolic systems that are the main energy source for muscle activity during sprint running [30,31]. Such training results in a low content of aerobic enzymes in skeletal muscle [32,33].

4.2. Between-Group Differences in $\dot{V}O_2\text{max}$

In a few previous studies on the relationship between SMM and $\dot{V}O_2\text{max}$, it was suggested that $\dot{V}O_2\text{max}$ normalized to skeletal muscle mass might be a more relevant index than simply weight-adjusted $\dot{V}O_2\text{max}$ in the evaluation of aerobic power [11,12]. Moreover, Beekley et al. [13], developed the term "aerobic muscle quality", meaning the amount of oxygen consumed per 1 kg of SMM, to make better comparisons of $\dot{V}O_2\text{max}$ between individuals of varying fat and total body mass or representing different sports.

In our study, significant differences in SMM- or LBM-adjusted $\dot{V}O_2\text{max}$ were revealed between sprinters and controls, contrary to non-significant differences in absolute and weight-adjusted

values. This can be affected by several factors. First, as other authors have suggested, adjustment of $\dot{V}O_2\text{max}$ for fat-free mass or skeletal muscle mass is out the influence of adipose tissue [10]. In our sprinters, LBM and SMM significantly increased across the annual cycle, while these body components remained unchanged in controls. This caused significant differences between sprinters and controls in both SMM- and LBM-adjusted $\dot{V}O_2\text{max}$, while there was no significant change in absolute and weight-adjusted $\dot{V}O_2\text{max}$. Second, the control group consisted of recreationally active men whose physical activity was endurance-oriented. Endurance training modifies central (pulmonary diffusing capacity, maximal cardiac output, the oxygen-carrying capacity of the blood) and peripheral (skeletal muscle characteristics) factors affecting $\dot{V}O_2\text{max}$ [16,18]. For example, skeletal muscles that undergo endurance training oxidize fat at a higher rate (thus sparing muscle glycogen and blood glucose) and contribute to the decrease in lactate production during exercise. Besides, more muscle mitochondria allow more oxygen to be extracted from the blood by contracting muscles [16,18]. Such typical muscle adaptations (occurring in endurance- but not sprint-trained individuals) may explain significant differences in SMM-adjusted $\dot{V}O_2\text{max}$ that emerged between sprinters and controls, even though they were not detectable when standard $\dot{V}O_2\text{max}$ measures were used.

In our participants, the percentage of LBM ranged between 78% and 85% of total body mass, whereas the percentage of SMM was between 43% and 48% (Figure 1). However, despite such a sizeable quantitative difference between these body components as regards their contribution to the total weight, adjusting $\dot{V}O_2\text{max}$ for SMM only slightly (by mere ~2%) deepened the differences between sprinters and controls compared to LBM-adjusted values (Figure 2). In practical terms, it can be, therefore, assumed that LBM- and SMM-adjusted $\dot{V}O_2\text{max}$ provide virtually the same information. Thus, calculating the SMM-adjusted $\dot{V}O_2\text{max}$ to compare groups of different training status seems to be unnecessary. Using LBM, which itself contains about 55–57% SMM, to more precisely express the $\dot{V}O_2\text{max}$ level, can be quite sufficient and easier.

5. Conclusions

In summary, our research has proven that in endurance- and sprint-trained competitive athletes and recreationally active individuals the profiles of 1-year changes in SMM-adjusted vs. weight-adjusted $\dot{V}O_2\text{max}$ are not different. However, adjusting $\dot{V}O_2\text{max}$ for LBM or SMM can uncover significant differences in maximal aerobic capacity between groups of different training specialization and status. In high-performance athletes, the use of the LBM- or SMM-adjusted $\dot{V}O_2\text{max}$ as an index of “aerobic muscle quality” to track the changes in maximum aerobic capacity across consecutive training phases seems to be unjustified. In competitive athletes, the monitoring and control of maximum aerobic capacity across an annual training cycle can be successfully carried out using conventional (absolute and weight-adjusted) $\dot{V}O_2\text{max}$ measures. Admittedly, the LBM- or SMM-adjusted $\dot{V}O_2\text{max}$ can be useful as a tool to more precisely distinguish between groups or individuals differing in muscle adaptation to maximum oxygen uptake. It also seems that LBM- and SMM-adjusted $\dot{V}O_2\text{max}$ measures provide equivalent information about maximum aerobic capacity. Finally, the limitation of our study is the participation of only male athletes, thus further research is needed to explore analogous patterns of change in different $\dot{V}O_2\text{max}$ measures in female athletes.

Author Contributions: Conceptualization, J.T. and K.K.; methodology, J.T. and K.K.; software, not applicable; validation, J.T., J.Z. and K.K.; formal analysis, J.T.; investigation, J.T., J.Z. and K.K.; resources, J.T., K.K. and J.Z.; data curation, J.T.; writing—original draft preparation, J.T.; writing—review and editing, J.Z. and K.K.; visualization, J.T.; supervision, K.K.; project administration, K.K.; funding acquisition, K.K. All authors have read and agreed to the published version of the manuscript.

Funding: This research was funded by the National Science Centre, Poland, within the OPUS 14 program, application and grant number 2017/27/B/NZ7/02828.

Acknowledgments: The authors thank the coaches, athletes, and volunteers for their full participation in the study.

Conflicts of Interest: The authors declare that they have no conflicts of interest.

Appendix A

Table A1. Changes in body composition between consecutive phases of the annual training cycle in athletic groups and controls.

	Training Phases				ANOVA Btw. Phases	Effect Size η^2
	General	Specific	Pre-Competition			
			Pre-Competition	Competition		
			Total Mass (kg)			
Sprint	81.6 ± 5.9	82.8 ± 6.3 ^{##}	83.3 ± 6.3 ^{###}	-	<0.001	0.39
Endurance	75.4 ± 7.4 ⁺	74.5 ± 6.5	74.6 ± 6.2 ⁺	74.4 ± 6.7	0.138	0.12
Controls	78.4 ± 5.8	78.0 ± 6.2	77.1 ± 6.7	77.0 ± 5.6	0.165	0.17
ANOVA btw. Groups	0.033	0.006	0.019	0.179		
Effect Size η^2	0.32	0.43	0.36	0.19		
			Fat Mass (kg)			
Sprinters	9.5 ± 1.5 [*]	8.6 ± 1.4 ^{###}	8.6 ± 1.4 ^{###}	-	0.002	0.32
Endurance	12.2 ± 2.8	10.6 ± 2.3 ^{###}	10.6 ± 2.1 ^{###}	10.54 ± 2.3 ^{###}	<0.001	0.46
Controls	14.6 ± 4.3	14.5 ± 4.5	13.9 ± 4.3	12.9 ± 3.3	0.109	0.20
ANOVA btw. Groups	0.011	<0.001	0.001	0.022		
Effect Size η^2	0.40	0.55	0.52	0.46		
			Fat Mass (%)			
Sprinters	11.6 ± 1.9 ^{**}	10.38 ± 1.7 ^{###}	10.36 ± 1.6 ^{###}	-	<0.001	0.43
Endurance	16.00 ± 2.6	14.4 ± 2.3 ^{###}	14.1 ± 2.1 ^{###}	14.1 ± 2.1 ^{###}	<0.001	0.46
Controls	18.4 ± 4.4	18.4 ± 4.8	17.9 ± 4.9	16.7 ± 4.2	0.149	0.18
ANOVA btw. Groups	0.002	<0.001	<0.001	0.039		
Effect Size η^2	0.51	0.64	0.65	0.39		
			Lean Body Mass (kg)			
Sprinters	68.4 ± 5.5 [#]	70.6 ± 5.9 ^{###}	71.0 ± 5.8 ^{###}	-	<0.001	0.72
Endurance	60.0 ± 5.2	60.6 ± 4.8 ⁺⁺	60.8 ± 4.6	60.7 ± 4.7	0.140	0.12
Controls	60.6 ± 3.6	60.3 ± 4.1	60.0 ± 5.1	60.9 ± 5.5	0.511	0.08
ANOVA btw. Groups	0.002	<0.001	<0.001	0.61		
Effect Size η^2	0.49	0.60	0.55	0.03		

Table A1. Cont.

	Training Phases			ANOVA Btw. Phases	Effect Size η^2
	General	Specific	Pre-Competition		
	Lean Body Mass (%)				
Sprinters	83.9 ± 1.8 **	85.3 ± 1.7 ▲▲▲***	85.3 ± 1.6 ▲▲▲***	-	0.48
Endurance	79.8 ± 2.5	81.4 ± 2.2 ■■■**	81.6 ± 2.1 ■■■**	81.7 ± 2.2 ■■■*	0.47
Controls	77.5 ± 4.1	77.5 ± 4.4	77.9 ± 4.6	79.1 ± 4.0	0.17
ANOVA btw. groups	0.001	<0.001	<0.001	0.036	
Effect size η^2	0.52	0.66	0.67	0.40	
	Skeletal Muscle Mass (kg)				
Sprinters	38.7 ± 3.6 #*	39.8 ± 3.8 ▲▲**	40.0 ± 4.0 ▲▲**	-	0.37
Endurance	32.7 ± 3.1	32.7 ± 2.6 ++	32.8 ± 2.6 ++	32.7 ± 2.8	0.01
Controls	33.4 ± 2.3	33.4 ± 2.1	32.9 ± 3.1	33.3 ± 3.2	0.07
ANOVA btw. Groups	0.002	<0.001	<0.001	0.503	
Effect Size η^2	0.51	0.64	0.60	0.05	
	Skeletal Muscle Mass (%)				
Sprinters	47.4 ± 1.7 **	48.0 ± 1.5 #***	48.0 ± 1.6 #***	-	0.10
Endurance	43.5 ± 1.7 +	44.0 ± 1.6	44.0 ± 1.7	43.9 ± 1.7	0.13
Controls	42.8 ± 2.9	42.9 ± 2.7	42.7 ± 3.2	43.3 ± 2.7	0.06
ANOVA btw. Groups	0.001	<0.001	<0.001	0.036	
Effect Size η^2	0.52	0.62	0.70	0.24	

▲ $p < 0.05$, ▲▲ $p < 0.01$, ▲▲▲ $p < 0.001$ —significantly different from the general preparation phase in a sprinters group; ■ $p < 0.01$, ■■■ $p < 0.001$ —significantly different from the general preparation phase in endurance group; + $p < 0.05$, ++ $p < 0.01$ —significantly different from sprinters at the same training phase, # $p < 0.01$ —significantly different from endurance athletes at the same training phase, * $p < 0.05$, ** $p < 0.01$, *** $p < 0.001$ —significantly different from controls at the same training phase.

Table A2. Changes in maximal oxygen uptake (absolute and relative values) between consecutive phases of the annual training cycle in athletic groups and controls.

	Training Phases			ANOVA Btw. Phases	Effect Size η^2
	General	Specific	Pre-Competition		
	$\dot{V}O_2\text{max}$ (mL·min⁻¹)				
Sprint	4328 ± 438	4368 ± 370	4290 ± 381	–	0.268
Endurance	5055 ± 615 *	4939 ± 628.15	4998 ± 628	5024 ± 753	0.628
Controls	4204 ± 419	4338 ± 365	4415 ± 335 ○	4491 ± 315 ○○	0.001
ANOVA btw. Groups	0.022	0.232	0.077	0.487	
Effect Size η^2	0.34	0.15	0.25	0.06	
	$\dot{V}O_2\text{max}$ (mL·min⁻¹·kg TBM⁻¹)				
Sprinters	52.1 ± 4.5	52.8 ± 3.7	52.7 ± 4.6	–	0.406
Endurance	67.9 ± 4.3 +++++	66.1 ± 3.9 +++++	66.9 ± 4.1 +++++	66.5 ± 5.3 ***	0.467
Controls	54.6 ± 3.4	56.4 ± 3.9	56.7 ± 3.7	57.4 ± 2.8 ○	0.033
ANOVA btw. Groups	>0.001	>0.001	>0.001	>0.001	
Effect Size η^2	0.86	0.78	0.76	0.78	
	$\dot{V}O_2\text{max}$ (mL·min⁻¹·kg LBM⁻¹)				
Sprinters	61.1 ± 5.4 **	62.0 ± 4.5 ***	62.7 ± 5.4 ***	–	0.077
Endurance	83.2 ± 6.4 +++++	81.0 ± 6.1 + + +	82.4 ± 6.9 + + +	83.4 ± 7.8 *	0.321
Controls	69.2 ± 6.7	72.5 ± 5.2 ○	73.3 ± 4.7 ○○	74.2 ± 4.0 ○○	0.001
ANOVA btw. Groups	>0.001	>0.001	>0.001	0.011	
Effect Size η^2	0.83	0.81	0.79	0.53	
	$\dot{V}O_2\text{max}$ (mL·min⁻¹·kg SMM⁻¹)				
Sprinters	108.6 ± 10.6 **	110.2 ± 9.2 ***	111.2 ± 10.1 ***	–	0.306
Endurance	154.8 ± 13.4 +++++	150.5 ± 13.1 + + +	152.7 ± 14.0 + + +	153.4 ± 15.7 *	0.404
Controls	126.7 ± 12.9	132.4 ± 9.9	132.4 ± 8.4	134.7 ± 10.0 ○	0.005
ANOVA btw. Groups	>0.001	>0.001	>0.001	0.023	
Effect Size η^2	0.82	0.83	0.80	0.45	

Abbreviations: LBM = lean body mass; SMM = skeletal muscle mass; $\dot{V}O_2\text{max}$ = maximal oxygen uptake; ○ $p < 0.05$, ○○ $p < 0.01$, ○○○ $p < 0.001$ —significantly different from the general preparation phase in a controls group; + + $p < 0.001$ —significantly different from sprinters at the same training phase; * $p < 0.05$, ** $p < 0.01$, *** $p < 0.001$ —significantly different from controls at the same training phase.

References

1. Costill, D.; Thomason, H.; Roberts, E. Fractional utilization of the aerobic capacity during distance running. *Med. Sci. Sports* **1973**, *5*, 248–252. [[CrossRef](#)]
2. Hill, A.; Long, C.; Lupton, H. Muscular exercise, lactic acid and the supply and utilisation of oxygen: Parts VII-VIII. *Proc. R. Soc. B* **1924**, *97*, 155–176.
3. Ranković, G.; Mutavdžić, V.; Toskić, D.; Preljević, A.; Kocić, M.; Nedin-Ranković, G.; Damjanović, N. Aerobic capacity as an indicator in different kinds of sports. *Bosn. J. Basic Med. Sci.* **2010**, *10*, 44–48. [[CrossRef](#)]
4. Zwaard, S.; Laarse, W.; Weide, G.; Bloemers, F.; Hofmijster, M.; Levels, K.; Noordhof, D.; Koning, J.; Ruiter, C.; Jaspers, R. Critical determinants of combined sprint and endurance performance: An integrative analysis from muscle fiber to the human body. *FASEB J.* **2018**, *32*, 2110–2123. [[CrossRef](#)] [[PubMed](#)]
5. Kim, J.; Wang, Z.; Heymsfield, S.; Baumgartner, R.; Gallagher, D. Total-body skeletal muscle mass: Estimation by a new dual-energy X-ray absorptiometry method. *Am. J. Clin. Nutr.* **2002**, *76*, 378–383. [[CrossRef](#)] [[PubMed](#)]
6. Andreato, L.; Esteves, J.; Gomes, T.; Andreato, T.; Alcantara, B.; Almeida, D.; Franzói De Moraes, S. Morphological profile of Brazilian jiu-jitsu athletes from different competitive level. *Rev. Bras. Med. Esporte* **2010**, *18*, 46–50. [[CrossRef](#)]
7. Delaney, J.; Thornton, H.; Scott, T.; Ballard, D.; Duthie, G.; Wood, L.; Dascombe, B. Validity of skinfold-based measures for tracking changes in body composition in professional rugby league players. *Int. J. Sports Physiol. Perform.* **2016**, *11*, 261–266. [[CrossRef](#)] [[PubMed](#)]
8. González-Mendoza, R.; Gaytán-González, A.; Jiménez-Alvarado, J.; Villegas-Balcázar, M.; Jáuregui-Ulloa, E.; Torres-Naranjo, F.; López-Taylor, J. Accuracy of anthropometric equations to estimate DXA-derived skeletal muscle mass in professional male soccer players. *J. Sports Med.* **2019**, *1*, 4387636. [[CrossRef](#)]
9. Martín-Matillas, M.; Valadés, D.; Hernández-Hernández, E.; Olea-Serrano, F.; Sjöström, M.; Delgado-Fernández, M.; Ortega, F. Anthropometric, body composition and somatotype characteristics of elite female volleyball players from the highest Spanish league. *J. Sports Sci.* **2014**, *32*, 137–148. [[CrossRef](#)]
10. Milanese, C.; Cavedon, V.; Corradini, G.; De Vita, F.; Zancanaro, C. Seasonal DXA-measured body composition changes in professional male soccer players. *J. Sports Sci.* **2015**, *33*, 1219–1228. [[CrossRef](#)]
11. Proctor, D.; Joyner, M. Skeletal muscle mass and the reduction of VO₂max in trained older subjects. *J. Appl. Physiol.* **1997**, *82*, 1411–1415. [[CrossRef](#)] [[PubMed](#)]
12. Sanada, K.; Kearns, C.; Kojima, K.; Abe, T. Peak oxygen uptake during running and arm cranking normalized to total and regional skeletal muscle mass measured by magnetic resonance imaging. *Eur. J. Appl. Physiol.* **2005**, *93*, 687–693. [[CrossRef](#)] [[PubMed](#)]
13. Beekley, M.; Abe, T.; Kondo, M.; Midorikawa, T.; Yamauchi, T. Comparison of normalized maximum aerobic capacity and body composition of sumo wrestlers to athletes in combat and other sports. *J. Sports Sci. Med.* **2006**, *5*, 13–20. [[PubMed](#)]
14. Nana, A.; Slater, G.J.; Hopkins, W.G.; Burke, L.M. Effects of daily activities on DXA measurements of body composition in active people. *Med. Sci. Sports Exerc.* **2012**, *44*, 180–189. [[CrossRef](#)]
15. Edvardsen, E.; Hem, E.; Anderssen, S. End criteria for reaching maximal oxygen uptake must be strict and adjusted to sex and age: A cross-sectional study. *PLoS ONE* **2014**, *9*, e85276. [[CrossRef](#)]
16. Bassett, D.R., Jr.; Howley, E. Limiting factors for maximum oxygen uptake and determinants of endurance performance. *Med. Sci. Sports Exerc.* **2000**, *32*, 70–84. [[CrossRef](#)]
17. Joyner, M. Physiological limits to endurance exercise performance: Influence of sex. *J. Physiol.* **2017**, *595*, 2949–2954. [[CrossRef](#)]
18. Jacobs, R.; Rasmussen, P.; Siebenmann, C.; Díaz, V.; Gassmann, M.; Pesta, D.; Gnaiger, E.; Nordsborg, N.; Robach, P.; Lundby, C. Determinants of time trial performance and maximal incremental exercise in highly trained endurance athletes. *J. Appl. Physiol.* **2011**, *111*, 1422–1430. [[CrossRef](#)]
19. Joyner, M.; Coyle, E. Endurance exercise performance: The physiology of champions. *J. Physiol.* **2008**, *586*, 35–44. [[CrossRef](#)]
20. Alvero-Cruz, J.; Parent, V.; Garcia, J.; Albornoz-Gil, M.; Benítez-Porres, J.; Ordóñez, F.; Rosemann, T.; Nikolaidis, P.; Knechtle, B. Prediction of performance in a short trail running race: The role of body composition. *Front. Physiol.* **2019**, *10*, 1306. [[CrossRef](#)]
21. Venkata, Y.; Surya, M.V.L.; Sudhakar, S.; Balakrishna, N. Effect of changes in body composition profile on VO₂max and maximal work performance in athletes. *J. Exerc. Physiol. Online* **2004**, *7*, 34–39.

22. Durkalec-Michalski, K.; Nowaczyk, P.M.; Podgórski, T.; Kusy, K.; Osiński, W.; Jeszka, J. Relationship between body composition and the level of aerobic and anaerobic capacity in highly trained male rowers. *J. Sports Med. Phys. Fit.* **2019**, *59*, 1526–1535. [[CrossRef](#)] [[PubMed](#)]
23. Shete, A.; Bute, S.; Deshmukh, P. A study of VO₂max and body fat percentage in female athletes. *J. Clin. Diagn. Res.* **2014**, *8*, BC01–BC03. [[CrossRef](#)] [[PubMed](#)]
24. Andersen, P.; Henriksson, J. Capillary supply of the quadriceps femoris muscle of man: Adaptive response to exercise. *J. Physiol.* **1977**, *270*, 677–690. [[CrossRef](#)] [[PubMed](#)]
25. Holloszy, J.; Coyle, E. Adaptations of skeletal muscle to endurance exercise and their metabolic consequences. *J. Appl. Physiol.* **1984**, *56*, 831–838. [[CrossRef](#)]
26. Haugen, T.; Seiler, S.; Sandbakk, Ø.; Tønnessen, E. The training and development of elite sprint performance: An integration of scientific and best practice literature. *Sports Med. Open* **2019**, *5*, 44. [[CrossRef](#)]
27. Loturco, I.; Kobal, R.; Kitamura, K.; Fernandes, V.; Moura, N.; Siqueira, F.; Cal Abad, C.; Pereira, L. Predictive factors of elite sprint performance: Influences of muscle mechanical properties and functional parameters. *J. Strength Cond. Res.* **2019**, *33*, 974–986. [[CrossRef](#)]
28. Bompa, T.; Buzzichelli, C. *Periodization Training for Sports*; Human Kinetics: Champaign, IL, USA, 2015.
29. Torok, D.; Duey, W.; Bassett, D.R., Jr.; Howley, E.; Mancuso, P. Cardiovascular responses to exercise in sprinters and distance runners. *Med. Sci. Sports Exerc.* **1995**, *27*, 1050–1056. [[CrossRef](#)]
30. Duffield, R.; Dawson, B.; Goodman, C. Energy system contribution to 100-m and 200-m track running events. *J. Sci. Med. Sport* **2004**, *7*, 302–313. [[CrossRef](#)]
31. Kusy, K.; Zarębska, E.; Ciekot-Sołtysiak, M.; Janowski, M.; Zieliński, J. Cardiorespiratory response and energy system contribution during speed endurance workout in a highly trained sprinter: A preliminary report. *Antropomotoryka. J. Kinesiol. Exerc. Sci.* **2015**, *70*, 27–36.
32. Bompa, T.; Haff, G. *Periodization: Theory and Methodology of Training*; Human Kinetics: Champaign, IL, USA, 2009.
33. Ross, A.; Leveritt, M. Long-term metabolic and skeletal muscle adaptations to short-sprint training implications for sprint training and tapering. *Sports Med.* **2001**, *31*, 1063–1082. [[CrossRef](#)] [[PubMed](#)]



© 2020 by the authors. Licensee MDPI, Basel, Switzerland. This article is an open access article distributed under the terms and conditions of the Creative Commons Attribution (CC BY) license (<http://creativecommons.org/licenses/by/4.0/>).

ARTICLE ONLINE FIRST

This provisional PDF corresponds to the article as it appeared upon acceptance.

A copyedited and fully formatted version will be made available soon.

The final version may contain major or minor changes.

Male and female athletes matched for maximum oxygen uptake per skeletal muscle mass: Equal but still different

Jacek TRINSCHKEK, Jacek ZIELINSKI, Ewa ZARĘBSKA, Krzysztof KUSY

The Journal of Sports Medicine and Physical Fitness 2022 Mar 01

DOI: 10.23736/S0022-4707.22.13605-4

Article type: Original Article

© 2022 EDIZIONI MINERVA MEDICA

Supplementary material available online at <http://www.minervamedica.it>

Article first published online: March 1, 2022

Manuscript accepted: February 18, 2022

Manuscript revised: February 4, 2022

Manuscript received: November 25, 2021

Subscription: Information about subscribing to Minerva Medica journals is online at:

<http://www.minervamedica.it/en/how-to-order-journals.php>

Reprints and permissions: For information about reprints and permissions send an email to:

journals.dept@minervamedica.it - journals2.dept@minervamedica.it - journals6.dept@minervamedica.it

Male and female athletes matched for maximum oxygen uptake per skeletal muscle

mass: Equal but still different

Preferred running head: $\dot{V}O_2$ max Adjusted for Skeletal Muscle Mass

Submission type: Original investigation

Authors: Jacek Trinschek*, Jacek Zieliński, Ewa A. Zarębska, Krzysztof Kusy

¹Department of Athletics, Strength and Conditioning, Faculty of Sport Sciences, Poznan
University of Physical Education, ul. Królowej Jadwigi 27/39, 61-871 Poznań, Poland

Corresponding author:

Jacek Trinschek

Department of Athletics, Strength and Conditioning, Faculty of Sport Sciences,
Poznan University of Physical Education

ul. Królowej Jadwigi 27/39, 61-871 Poznań, Poland

tel. +48 798832600

e-mail: jactri@wp.pl

Abstract:

Background: We matched highly trained competitive male and female athletes using maximal oxygen uptake ($\dot{V}O_2\text{max}$) per kg skeletal muscle mass (SMM) to show sex differences in factors limiting $\dot{V}O_2\text{max}$. **Methods:** Thirteen highly trained male (28 ± 3.0 yr) vs 13 female (21.3 ± 3.0 yr) endurance athletes and 10 male (23.9 ± 3.8 yr) vs 10 female sprinters (21.9 ± 3.3 yr) performed an incremental running treadmill test until exhaustion. Main cardiorespiratory variables were measured using ergospirometry. SMM was determined using the dual X-ray absorptiometry method and a regression equation based on measured appendicular lean soft tissue. Basic hematological parameters were obtained from capillary blood samples taken before exercise. **Results:** In both endurance and sprint groups, male athletes had significantly higher muscle mass (by 8–12%) and substantially lower total fat (by 55–58%). For almost all body composition indicators, the effect size of sex differences was very large (Cohens $d > 1.4$). Male athletes obtained significantly higher values in cardiorespiratory variables (by 12–34%) and factors related to oxygen transport (9–13%). Cohens d of the revealed differences was large or very large in both groups (0.8–2.1 in sprinters and 0.8–2.3 in endurance athletes). **Conclusions:** Male and female competitive athletes having the same $\dot{V}O_2\text{max}$ per kg SMM strongly differ in main factors limiting maximum oxygen uptake. These differences are more pronounced in endurance- than in sprint-trained athletes. The strongest differences are seen for body composition (fat, lean, and muscle mass) and central cardiac factors.

Keywords: maximum aerobic capacity, sex differences, body composition, limiting factors, Dual-energy X-ray absorptiometry

Pełen tekst dostępny na stronie wydawnictwa / Full text available from publisher's website:

<https://www.minervamedica.it/en/journals/sports-med-physical-fitness/article.php?cod=R40Y9999N00A22030104>

Miejscowość, data 30.03.2022

mgr Jacek Trinschek

doktorant w Zakładzie Lekkiej Atletyki i Przygotowania Motorycznego

Akademia Wychowania Fizycznego

im. Eugeniusza Piaseckiego w Poznaniu

ul. Królowej Jadwigi 27/39, 61-871 Poznań

Dotyczy wniosku o przeprowadzenie postępowania doktorskiego mgr Jacka Trinschka

OŚWIADCZENIE

Oświadczam, że w pracy:

Trinschek J., Zieliński J., Kusy K. **Maximal oxygen uptake adjusted for skeletal muscle mass in competitive speed-power and endurance male athletes: changes in a one-year training cycle**. International Journal of Environmental Research and Public Health, 2020, 17(17): 6226. doi: 10.3390/ijerph17176226; impact factor – 3.390, punktacja MEiN – 140 pkt.

mój udział polegał na: opracowaniu koncepcji badań, doborze metod, sprawdzeniu procedur pomiarowych, rekrutacji badanych, wykonaniu pomiarów, analizie formalnej i opracowaniu danych, przygotowanie i krytyczna rewizja manuskryptu, przygotowanie tabel i rycin, akceptacja ostatecznej wersji manuskryptu.

Jacek Trinschek



Miejscowość, data 30.03.2022

prof. dr hab. Jacek Zieliński

Zakład Lekkiej Atletyki i Przygotowania Motorycznego

Akademia Wychowania Fizycznego

im. Eugeniusza Piaseckiego w Poznaniu

ul. Królowej Jadwigi 27/39, 61-871 Poznań

Dotyczy wniosku o przeprowadzenie postępowania doktorskiego mgr Jacka Trinschka


OŚWIADCZENIE WSPÓŁAUTORA

Oświadczam, że w pracy:

Trinschek J., Zieliński J., Kusy K. **Maximal oxygen uptake adjusted for skeletal muscle mass in competitive speed-power and endurance male athletes: changes in a one-year training cycle.** International Journal of Environmental Research and Public Health, 2020, 17(17): 6226. doi: 10.3390/ijerph17176226; impact factor – 3.390, punktacja MEiN – 140 pkt.

mój udział polegał na sprawdzeniu procedur pomiarowych, wykonaniu pomiarów, rekrutacji badanych, krytycznej rewizji manuskryptu i akceptacji ostatecznej wersji manuskryptu.

Jacek Zieliński



Miejscowość, data 30.03.2022

prof. AWF dr hab. Krzysztof Kusy

Zakład Lekkiej Atletyki i Przygotowania Motorycznego

Akademia Wychowania Fizycznego

im. Eugeniusza Piaseckiego w Poznaniu

ul. Królowej Jadwigi 27/39, 61-871 Poznań

Dotyczy wniosku o przeprowadzenie postępowania doktorskiego mgr Jacka Trinschka

OŚWIADCZENIE WSPÓLAUTORA

Oświadczam, że w pracy:

Trinschek J., Zieliński J., Kusy K. **Maximal oxygen uptake adjusted for skeletal muscle mass in competitive speed-power and endurance male athletes: changes in a one-year training cycle.** International Journal of Environmental Research and Public Health, 2020, 17(17): 6226. doi: 10.3390/ijerph17176226; impact factor – 3.390, punktacja MEiN – 140 pkt.

mój udział polegał na opracowaniu koncepcji badań, doborze metod, sprawdzeniu procedur pomiarowych, rekrutacji badanych, wykonaniu pomiarów, krytyczna rewizja manuskryptu, nadzór merytoryczny i zarządzanie projektem, pozyskanie funduszy, akceptacja ostatecznej wersji manuskryptu.

Krzysztof Kusy



Miejscowość, data 30.03.2022

Mgr Jacek Trinschek

Doktorant Zakładu Lekkiej Atletyki i Przygotowania Motorycznego

Akademia Wychowania Fizycznego

im. Eugeniusza Piaseckiego w Poznaniu

ul. Królowej Jadwigi 27/39, 61-871 Poznań

Dotyczy wniosku o przeprowadzenie postępowania doktorskiego mgr Jacka Trinschka

OŚWIADCZENIE

Oświadczam, że w pracy:

Trinschek J., Zieliński J., Zarębska E., Kusy K. **Male and female athletes matched for maximum oxygen uptake per skeletal muscle mass: equal but still different.** Journal of Sports Medicine and Physical Fitness, 2022, online first, Mar 1. doi: 10.23736/S0022-4707.22.13605-4; impact factor – 1.637, punktacja MEiN – 40 pkt.

mój udział polegał na opracowaniu koncepcji i projektu badań, zbieraniu danych empirycznych, analizie i interpretacji uzyskanych danych, przygotowaniu manuskryptu oraz jego krytycznej rewizji, akceptacji ostatecznej wersji manuskryptu.

Jacek Trinschek



Miejscowość, data 30.03.2022.

prof. dr hab. Jacek Zieliński

Zakład Lekkiej Atletyki i Przygotowania Motorycznego

Akademia Wychowania Fizycznego

im. Eugeniusza Piaseckiego w Poznaniu

ul. Królowej Jadwigi 27/39, 61-871 Poznań

Dotyczy wniosku o przeprowadzenie postępowania doktorskiego mgr Jacka Trinschek

OŚWIADCZENIE WSPÓŁAUTORA

Oświadczam, że w pracy:

Trinschek J., Zieliński J., Zarębska E., Kusy K. **Male and female athletes matched for maximum oxygen uptake per skeletal muscle mass: equal but still different.** Journal of Sports Medicine and Physical Fitness, 2022, online first, Mar 1. doi: 10.23736/S0022-4707.22.13605-4; impact factor – 1.637, punktacja MEiN – 40 pkt.

mój udział polegał na zbieraniu danych empirycznych, krytycznej rewizji manuskryptu i akceptacji ostatecznej wersji manuskryptu.

Jacek Zieliński



Miejscowość, data 30.03.2022

dr Ewa Zarębska

Zakład Lekkiej Atletyki i Przygotowania Motorycznego

Akademia Wychowania Fizycznego

im. Eugeniusza Piaseckiego w Poznaniu

ul. Królowej Jadwigi 27/39, 61-871 Poznań

Dotyczy wniosku o przeprowadzenie postępowania doktorskiego mgr Jacka Trinschka

OŚWIADCZENIE WSPÓŁAUTORA

Oświadczam, że w pracy:

Trinschek J., Zieliński J., Zarębska E., Kusy K. **Male and female athletes matched for maximum oxygen uptake per skeletal muscle mass: equal but still different.** Journal of Sports Medicine and Physical Fitness, 2022, online first, Mar 1. doi: 10.23736/S0022-4707.22.13605-4; impact factor – 1.637, punktacja MEiN – 40 pkt.

Mój udział polegał na zbieraniu danych empirycznych, krytycznej rewizji manuskryptu i akceptacji ostatecznej wersji manuskryptu.



Ewa Zarębska

Miejscowość, data 30.03.2022

prof. AWF dr hab. Krzysztof Kusy

Zakład Lekkiej Atletyki i Przygotowania Motorycznego

Akademia Wychowania Fizycznego

im. Eugeniusza Piaseckiego w Poznaniu

ul. Królowej Jadwigi 27/39, 61-871 Poznań

Dotyczy wniosku o przeprowadzenie postępowania doktorskiego mgr Jacka Trinschka

OŚWIADCZENIE WSPÓŁAUTORA

Oświadczam, że w pracy:

Trinschek J., Zieliński J., Zarębska E., Kusy K. **Male and female athletes matched for maximum oxygen uptake per skeletal muscle mass: equal but still different.** Journal of Sports Medicine and Physical Fitness, 2022, online first, Mar 1. doi: 10.23736/S0022-4707.22.13605-4; impact factor – 1.637, punktacja MEiN – 40 pkt.

mój udział polegał na pomocy w koncepcji i projekcie badań, zbieraniu danych empirycznych, pozyskaniu funduszy, nadzorze nad projektem, krytycznej rewizji manuskryptu i akceptacji ostatecznej wersji manuskryptu.

Krzysztof Kusy

