

mgr Paweł Kowalski

**Monitorowanie wysiłku fizycznego w trakcie ćwiczeń
na zajęciach prowadzonych w Studium Wychowania
Fizycznego i Sportu Uniwersytetu Medycznego w Poznaniu**

Rozprawa doktorska

Promotor:

prof. dr hab. n. med. Włodzimierz Samborski

Promotor pomocniczy:

dr n. o zdr. Piotr Kordel

Uniwersytet Medyczny im. Karola Marcinkowskiego w Poznaniu

Wydział Nauk o Zdrowiu

Poznań, 2020 r.

Serdeczne podziękowania dla Promotora

prof. dr hab. n.med. Włodzimierza Samborskiego

za opiekę naukową, życzliwość i wyrozumiałość oraz merytoryczne wsparcie

udzielone w trakcie realizacji niniejszej pracy.

Serdeczne podziękowania dla Promotora pomocniczego

dr Piotra Kordela

za nieustanną pomoc i cierpliwość na każdym etapie przygotowania tej rozprawy.

Serdeczne podziękowania dla Pani

mgr Anny Borowicz

za okazaną pomoc, cierpliwość i wyrozumiałość w pisaniu tej rozprawy.

Spis treści

1. Wstęp.....	5
1.1. Wpływ wysiłku fizycznego na organizm człowieka.....	5
1.2. Fizjologiczna klasyfikacja wysiłków fizycznych.....	7
1.3. Wybrane parametry oceny intensywności wysiłku fizycznego	11
1.3.1. Częstość pracy serca.....	11
1.3.2. Skala Borga.....	15
1.3.3. Inne wskaźniki nasilenia wysiłku	17
1.3.3.1. Stężenie kwasu mlekowego.....	17
1.3.3.2. Maksymalny pobór tlenu	20
1.3.3.3. Równoważnik metaboliczny.....	20
1.3.3.4. Stężenie amoniaku.....	21
2. Założenia pracy	22
3. Cel pracy	24
4. Grupa badana i metody	25
4.1. Grupa badana	25
4.2. Metody	26
4.3. Analiza statystyczna.....	28
5. Wyniki	30
5.1. Charakterystyka przebadanej grupy	30
5.2. Charakterystyka badanych w zależności od zmęczenia odczuwanego w trakcie wysiłku fizycznego.....	31
5.3. Ocena związków pomiędzy odczuciem zmęczenia a wartością tętna w trakcie ćwiczeń.....	35
5.4. Związki między szczytową wartością tętna i parametrami pochodnymi a skalą Borga	36
5.5. Predykcja odczuwanego zmęczenia w oparciu o pomiary tętna w spoczynku i podczas rozgrzewki	39
5.6. Prawdopodobieństwo osiągnięcia submaksymalnego wysiłku fizycznego w oparciu o subiektywną ocenę zmęczenia w skali Borga	41
6. Dyskusja.....	43
7. Wnioski.....	54
8. Streszczenie	55
9. Summary	58
10. Piśmiennictwo	61

Wykaz skrótów stosowanych w pracy

Symbol	Opis (pol.)	Opis (ang.)
ATP	adenozynotrifosforan	<i>adenosine triphosphate</i>
BMI	wskaźnik masy ciała	<i>Body Mass Index</i>
BS	skala Borga	<i>Borg scale</i>
CVD	choroby układu krążenia	<i>cardiovascular disease</i>
dHR_{r-p}	zmiana częstości pracy serca między wartością spoczynkową a szczytową	<i>change in heart rate between resting and peak values</i>
dHR_{r-wu}	zmiana częstości pracy serca między wartością spoczynkową a osiągniętą w czasie rozgrzewki	<i>change in heart rate between resting and warm-up values</i>
dHR_{wu-p}	zmiana częstości pracy serca między wartością osiągniętą w czasie rozgrzewki a szczytową	<i>change in heart rate between warm-up and peak values</i>
eHR_{max}	przewidywana dla wieku maksymalna częstość pracy serca	<i>age-predicted maximum heart rate</i>
HR	częstość pracy serca	<i>heart rate</i>
HR_{ci}	wskaźnik odpowiedzi chronotropowej	<i>chronotropic index</i>
HR_{max}	maksymalna częstość pracy serca	<i>maximal heart rate</i>
HR_p	szczytowa częstość pracy serca	<i>peak heart rate</i>
HR_r	spoczynkowa częstość pracy serca	<i>resting heart rate</i>
HR_{wu}	rozgrzewkowa częstość pracy serca	<i>warm-up heart rate</i>
MET	równoważnik metaboliczny	<i>metabolic equivalent</i>
rHR_p/HR_{max}	stosunek szczytowej do przewidywanej dla wieku maksymalnej częstości pracy serca	<i>the ratio of peak to age-predicted maximum heart rate</i>
RPE	skala odczuwania zmęczenia w czasie wysiłku fizycznego	<i>Rating of Perceived Exertion</i>
VO_2	pobór tlenu	<i>oxygen uptake</i>
VO_{2max}	maksymalny pobór tlenu	<i>maximal oxygen uptake</i>
WHO	Światowa Organizacja Zdrowia	<i>World Health Organisation</i>

1. Wstęp

1.1. Wpływ wysiłku fizycznego na organizm człowieka

Wysiłek fizyczny to zasadniczy element życia obecny w całej historii naszego gatunku. Dzięki systematycznej aktywności ruchowej maleje prawdopodobieństwo rozwoju wielu chorób przewlekłych, a ryzyko przedwczesnej śmierci zostaje zredukowane o 20-30% w stosunku do osób prowadzących siedzący tryb życia [1-6].

Rolę wysiłku fizycznego podkreśla się szczególnie w kontekście chorób układu krążenia (ang. *cardiovascular disease*; CVD), cukrzycy typu 2 oraz niektórych rodzajów nowotworów (raka piersi i jelita grubego) [1,3-8]. Wyniki licznych badań obserwacyjnych wyraźnie wskazują na istotny udział wysiłku fizycznego w redukowaniu śmiertelności całkowitej u ludzi [3].

Systematyczny wysiłek fizyczny wywołuje szereg reakcji przystosowawczych, które prowadzą do poprawy i/lub zachowania sprawności fizycznej organizmu. Zmiany te dotyczą przede wszystkim układu sercowo-naczyniowego, oddechowego i mięśniowo-szkieletowego, a ich charakter zależy od intensywności i czasu trwania wysiłku fizycznego [9-13].

Wśród istotnych zmian zachodzących w obrębie układu sercowo-naczyniowego najczęściej obserwujemy obniżenie spoczynkowej częstości pracy serca (ang. *heart rate*; HR). Spadek wartości tętna spoczynkowego wynika głównie z poprawy wydolności serca, przebudowy ścian i jam narządu, zmiany równowagi między przywspółczulnym i współczulnym układem nerwowym oraz poprawy przepływu krwi przez krążenie wieńcowe i obwodowe [9-13].

U osób z CVD regularny wysiłek fizyczny może poprawić sprawność krążeniowo-oddechową i opóźnić postęp wielu chorób [14-16]. Wyniki długookresowych badań obserwacyjnych z udziałem pacjentów kardiologicznych potwierdzają zależność pomiędzy regularną aktywnością fizyczną a zmniejszonym ryzykiem przedwczesnej śmierci wynikającej z CVD [17-19].

Co więcej, regularna aktywność ruchowa stanowi bardzo ważny element profilaktyki i leczenia miażdżycy. Wynika to z faktu, iż wysiłek fizyczny wywiera korzystny wpływ na profil lipidowy krwi, stężenie glukozy, wskaźniki zapalne oraz redukcję masy ciała. Warto zwrócić też uwagę na kluczową rolę wysiłku fizycznego w zakresie redukcji ryzyka nadciśnienia tętniczego, udaru mózgu i zawału serca [9-13].

Wzrost sprawności układu krążenia poprawia transport tlenu i substratów energetycznych do mięśni. Zwiększa się także aktywność enzymów oksydacyjnych odpowiedzialnych za transport i wykorzystanie tlenu w mitochondriach komórek mięśniowych. Zaobserwowano również lepszy przepływ mięśniowy i zwiększoną kapilaryzację mięśni, czyli wzrost liczby naczyń włosowatych. Wysiłek fizyczny o submaksymalnej intensywności skutkuje większą tolerancją na obciążenie. Powtarzanie wysiłku submaksymalnego przez dłuższy czas obniża wartość tętna spoczynkowego i poziom stężenia kwasu mlekowego we krwi w czasie kolejnych wysiłków [9-13,20].

Aktywność fizyczna wiąże się z ruchem i wpływa bezpośrednio na zdolność motoryczną człowieka. Zdolność motoryczna według obowiązującej definicji to zespół właściwości osobniczych uwarunkowanych strukturą ustroju, procesami energetycznymi oraz sterowania i regulacji ruchu, które wprost charakteryzują poziom możliwości efektywnego wykonania względnie ściśle określonego rodzaju czynności ruchowych [21].

Wynikiem kształtowania zdolności motorycznych wskutek regularnego wysiłku fizycznego jest m.in. zwiększona siła i wytrzymałość, które przekładają się bezpośrednio na korzyści zdrowotne i/lub sportowe. Należy pamiętać również o efekcie zwiększającym morfofunkcjonalną gibkość, koordynację i zręczność człowieka [9-13].

Podwyższone parametry zdolności motorycznych polepszają sprawność organizmu, zabezpieczają przed uszkodzeniami stawów i mięśni, a także działają protekcyjnie względem potencjalnych dolegliwości bólowych (np. odcinka lędźwiowego). Regularny wysiłek fizyczny umożliwia również zachowanie prawidłowego bilansu energetycznego oraz utrzymanie prawidłowych wartości komponentów ciała (np. procentowej zawartości tkanki mięśniowej, tłuszczowej i wody), m.in. dzięki sprawniejszej regulacji gospodarki węglowodanowo-lipidowej. Prawidłowy skład ciała umożliwia zachowanie dobrej sylwetki, a większa gęstość kości zmniejsza także ryzyko rozwoju osteoporozy i zapobiega złamaniom kości [9-13].

Regularna aktywność fizyczna skutkuje nie tylko poprawą funkcjonowania ciała, ale również bardzo korzystnie wpływa na psychikę i samopoczucie człowieka [9-13]. W trakcie wykonywania ćwiczeń fizycznych dochodzi do wydzielania endorfin, które wpływają na entuzjazm, optymizm i lepsze samopoczucie ćwiczącego. Psychologiczne efekty treningu objawiają się większą wydajnością w pracy, kreatywnością, umiejętnością rozwiązywania problemów, a także redukcją stresu, poprawą jakości snu oraz lepszym funkcjonowaniem mózgu. Lepsze samopoczucie i jakość życia znajdują

bezpośrednie przełożenie na poprawę relacji międzyludzkich i umiejętności funkcjonowania w społeczeństwie.

Warto w tym miejscu podkreślić, że w świetle aktualnej definicji WHO (ang. *World Health Organisation*) zdrowie to nie tylko stan pełnego dobrostanu fizycznego, ale także dobre samopoczucie psychiczne [22]. Aktywność ruchowa stanowi zaś najbardziej naturalny i najłatwiejszy sposób na osiągnięcie zdrowej psychiki [23]. Jak pokazują badania, osoby nieaktywne fizycznie, które zintensyfikowały dotychczasową codzienną aktywność ruchową deklarują lepsze samopoczucie zarówno w kontekście fizycznym, jak i psychicznym [8]. Co więcej, wyniki badań wskazują, że osoby aktywne fizycznie postrzegają się jako zdrowe i mają poczucie własnej wartości, a to pozwala im na osiągnięcie dobrostanu fizycznego i poprawę jakości życia [24].

Odkrycie psychofizycznych korzyści płynących z regularnego wysiłku fizycznego zaowocowało szeregiem działań wspierających codzienną aktywność ruchową. Szczególnie istotne stało się opracowanie ogólnych zaleceń dotyczących rodzaju, częstotliwości, czasu i intensywności wysiłku fizycznego przez WHO [14,25,26].

1.2. Fizjologiczna klasyfikacja wysiłków fizycznych

Pod pojęciem wysiłku fizycznego rozumiemy świadomą czynność (pracę zewnętrzną) układu mięśniowo-szkieletowego wraz z zespołem towarzyszących jej przemian czynnościowych w organizmie [9]. Fizjologiczne sklasyfikowanie wysiłków fizycznych pozwoliło na uporządkowanie aktualnej wiedzy i opracowanie skuteczniejszej metodyki treningowej.

Wysiłki fizyczne możemy podzielić ze względu na:

- 1) charakter dominujących skurczów mięśniowych
- 2) wielkość masy mięśniowej zaangażowanej w wysiłek fizyczny
- 3) intensywność
- 4) charakter przemian energetycznych zachodzących w pracujących mięśniach [9].

Wyróżniamy trzy rodzaje wysiłku fizycznego – wysiłek statyczny, dynamiczny i mieszany. Podział ten opiera się na charakterze skurczu mięśniowego, który dominuje w trakcie wykonywania danego wysiłku fizycznego.

Wysiłek statyczny wiąże się z przewagą izometrycznych skurczów włókien mięśniowych, które prowadzą do wzrostu napięcia mięśnia przy jego niezmienniej

długości. Pod względem zdrowotnym wysiłek statyczny stanowi większe obciążenie dla układu krążenia i systemu kostno-stawowego niż wysiłek dynamiczny [9,27-30]. Długotrwałe napięcie mięśniowe skutkuje bowiem uciskiem otaczających go naczyń krwionośnych, a utrudniony przepływ krwi prowadzi do zaburzonego odżywiania tkanki mięśniowej. Co więcej, stan długotrwałego napięcia wiąże się ze zmęczeniem, poczuciem dyskomfortu i może prowadzić do bólu. Na rycinie 1 przedstawiono podział dyscyplin sportowych w zależności od rodzaju wysiłku fizycznego [27].

OBCIĄŻENIE STATYCZNE III – duże >50% MVC	Bobsleje/saneczkarstwo Lekkoatletyka Gimnastyka Sztuki walki Żeglarstwo Wspinaczka sportowa Narty wodne Podnoszenie ciężarów Windsurfing	Kulturystyka Narciarstwo alpejskie Jazda na deskorolce Snowboard Zapasy	Boks Wioślarstwo/kajakarstwo Kolarstwo Dziesięciobój Łyżwiarstwo szybkie Triathlon
OBCIĄŻENIE STATYCZNE II – umiarkowane 20-50% MVC	Łucznictwo Wyciągi samochodowe Skoki do wody Sporty jeździeckie Sporty motocyklowe	Futbol amerykański Lekkoatletyka Łyżwiarstwo figurowe Rodeo Rugby Biegi – sprint Surfing Pływanie synchroniczne*	Koszykówka Hokej na lodzie Biegi narciarskie (technika łyżwowa) Lacrosse Pływanie Piłka ręczna
OBCIĄŻENIE STATYCZNE I – małe <20% MVC	Bilard Kregle Krykiet Curling Golf Strzelanie	Baseball Szermierka Tenis stołowy Siatkówka	Badminton Biegi narciarskie (technika klasyczna) Hokej na trawie Biegi na orientację Chód Biegi długodystansowe Racquetball/squash Piłka nożna Tenis
	OBCIĄŻENIE DYNAMICZNE A – małe <40% VO_{2max}	OBCIĄŻENIE DYNAMICZNE B – umiarkowane 40-70% VO_{2max}	OBCIĄŻENIE DYNAMICZNE C – duże >70% VO_{2max}
MVC – ang. <i>maximal voluntary contraction</i> – maksymalny skurcz dowolny VO _{2max} – ang. <i>maximal oxygen uptake</i> – maksymalne zużycie tlenu w teście spiroergometrycznym * obszar zielony – wysiłek mieszany			

Rycina 1.

Podstawowy podział dyscyplin sportowych w zależności od rodzaju wysiłku fizycznego [27].

Wysiłki dynamiczne wykonywane są przy dominacji izotonicznych lub auksotonicznych skurczów włókien mięśniowych. Mięśnie kurczące się izotonicznie zmieniają długość, ale zachowują stałe napięcie. W czasie skurczu auksotonicznego pobudzony mięsień zmienia jednocześnie długość i napięcie. Wysiłek dynamiczny zachodzi dzięki pracy antagonistycznych grup mięśniowych (zginaczy i prostowników). Naprzemiennność skurczu i rozkurczu ma istotne znaczenie zdrowotne, ponieważ ułatwia krążenie krwi ("efekt pompy mięśniowej") i poprawia metabolizm mięśnia.

Pod względem energetycznym, ten typ wysiłku fizycznego wymaga większego wydatku energii niż obciążenie o charakterze statycznym. Nawet lekki wysiłek

dynamiczny wymaga znacznie większych nakładów energii niż duży wysiłek statyczny [9,28-30].

Wysiłek mieszany stanowi połączenie wysiłku statycznego i dynamicznego (rycina 1). W trakcie wysiłku mieszanego praca części z zaangażowanych grup mięśniowych odbywa się statycznie (dominują skurcze izometryczne), natomiast inne partie mięśni zostają obciążone dynamicznie (przewaga skurczów izotonicznych lub auksotonicznych) [9,28-30].

Kolejny fizjologiczny podział opiera się na wielkości grup mięśniowych zaangażowanych w wykonanie wysiłku fizycznego. Na tej podstawie wyróżniamy wysiłki lokalne i ogólne. Rozmiar pracujących grup mięśniowych określamy procentowo w ujęciu całkowitej masy mięśniowej. Każdy wysiłek wymagający pracy mniej niż 30% włókien mięśniowych oznacza wysiłek lokalny. W wysiłek ogólny organizm angażuje powyżej 30% mięśni szkieletowych [9,28-31].

Intensywność wysiłku fizycznego wyrażamy na kilka sposobów. Można na przykład określić obciążenie względne, tj. ilość energii koniecznej do wykonania wysiłku w jednostce czasu (inaczej mówiąc: moc wygenerowaną w tym celu przez organizm). Innym sposobem jest określanie obciążenia względnego, czyli zależności pomiędzy intensywnością wykonywanego wysiłku fizycznego a maksymalnymi możliwościami organizmu wyrażonymi jako $\%VO_{2max}$ (maksymalny pobór tlenu; ang. *maximal oxygen uptake*) lub $\%HR_{max}$ (tętno maksymalne; ang. *maximal heart rate*).

Podział wysiłków fizycznych oparty na obciążeniu względnym wyróżnia wysiłki submaksymalne, maksymalne i supramaksymalne. Wysiłek submaksymalny zachodzi, gdy zapotrzebowanie na tlen lub wartość tętna nie przekraczają maksymalnych wartości, czyli maksymalnego pochłaniania tlenu (VO_{2max}) lub maksymalnej częstości pracy serca (HR_{max}), ale wynoszą co najmniej 85% przewidywanej wartości maksymalnej [9,32-34].

W sytuacji, gdy (mimo zwiększania obciążenia pracą) pobór tlenu jest równy VO_{2max} lub wartość tętna odpowiada HR_{max} , taki wysiłek określamy jako maksymalny. Analogicznie, wysiłek supramaksymalny zachodzi gdy zapotrzebowanie na tlen przekracza VO_{2max} ćwiczącego lub wartość tętna jest większa od HR_{max} . Intensywność wysiłku supramaksymalnego jest większa niż maksymalnego, ponieważ organizm posiada fizjologiczną zdolność pozyskiwania energii także z procesów beztlenowych [9,12].

Z praktycznego punktu widzenia, fizjologiczna klasyfikacja wysiłku na podstawie obciążenia względnego stanowi efektywny element metodyki treningowej, ponieważ uwzględnia indywidualny poziom wydolności fizycznej ćwiczącego.

Istnieje wiele metod oceny intensywności wysiłku fizycznego. Do najważniejszych z nich należy pomiar tętna, ocena zmęczenia wysiłkowego raportowanego skalą Borga oraz badanie stężenia kwasu mlekowego we krwi. Wskaźniki te zostaną omówione szerzej w rozdziale poświęconym wybranym parametrom oceny intensywności wysiłku fizycznego.

Każda aktywność fizyczna cechuje się własną specyfiką. W zależności od przemian energetycznych zachodzących w pracujących mięśniach wyróżniamy wysiłek tlenowy (aerobowy) i beztlenowy (anaerobowy). Oba mechanizmy wytwarzania energii przez komórkę zachodzą zależnie od bieżących potrzeb fizjologicznych organizmu (np. podczas wysiłków supramaksymalnych, które cechują się bardzo dużą intensywnością, energia pozyskiwana jest głównie z procesów beztlenowych). Wyróżniamy również wysiłki fizyczne w tzw. zakresie mieszanym (aero-anaerobowym), podczas których energia pozyskiwana jest z procesów tlenowych i beztlenowych. Przykładem takiej aktywności są gry zespołowe, w których zawodnicy zwykle wykonują wysiłek interwałowy o zmiennej intensywności.

Organizm preferuje produkcję większej ilości energii związanej z przemianami tlenowymi w pracujących mięśniach. Niemniej jednak charakter przemian zależy od intensywności i czasu trwania wysiłku fizycznego, a także sprawności dostarczania tlenu do pracujących mięśni i adaptacji mitochondriów do szybkiego wytwarzania energii w warunkach dużych obciążeń.

W warunkach ograniczonej dostępności tlenu, a wymagających dostarczenia energii, komórki mięśniowe przechodzą w metabolizm beztlenowy, w ramach którego mogą pracować przez krótki czas. Stąd, wysiłki krótkotrwałe (do 10 sekund) i o dużej intensywności ($>90\% \text{VO}_{2\text{max}}$, np. sprint) zasilane są energią pochodzącą z beztlenowych procesów przemiany składników pokarmowych. Praca beztlenowa opiera się przede wszystkim na glikolizie beztlenowej i skutkuje produkcją dużej ilości kwasu mlekowego [9,28,29].

Wysiłki wykonywane przez dłuższy czas oraz o małej (do $40\% \text{VO}_{2\text{max}}$) lub średniej intensywności ($60\text{-}70\% \text{VO}_{2\text{max}}$) czerpią energię z utleniania glukozy, aminokwasów i wolnych kwasów tłuszczowych. Aerobowy sposób oddychania komórkowego prowadzi do niewielkiego wzrostu stężenia kwasu mlekowego w organizmie [9,35,36].

Omówioną klasyfikację wysiłków fizycznych podsumowano w tabeli 1.

Tabela 1. Klasyfikacja wysiłków fizycznych na podstawie wybranych kryteriów fizjologicznych [9].

	WYSIŁEK FIZYCZNY
charakter skurczów mięśniowych	statyczny
	dynamiczny
	mieszany
wielkość zaangażowanej masy mięśniowej	lokalny
	ogólny
obciążenie względne	submaksymalny
	maksymalny
	supramaksymalny
rodzaj przemian energetycznych	tlenowy
	beztlenowy
	mieszany

1.3. Wybrane parametry oceny intensywności wysiłku fizycznego

Wysiłek fizyczny związany z treningiem przynosi największe korzyści, gdy wywołuje zaplanowany efekt w organizmie. Z tego powodu, aby zapewnić efektywność założonego programu treningowego, wysiłek fizyczny powinien podlegać prawidłowemu i skutecznemu monitorowaniu. Najczęściej wykorzystywaną metodą monitorującą wysiłek fizyczny w sporcie jest pomiar częstości pracy serca (pomiar tętna).

Tętno ćwiczeniowe stanowi najprostszy wskaźnik fizjologiczny wykorzystywany w ocenie intensywności ćwiczeń [10-13].

1.3.1. Częstość pracy serca

Chwilowa częstość pracy serca zależy od funkcji węzła zatokowego i przedsionkowo-komorowego. Podczas gdy węzeł zatokowy jest głównym rozrusznikiem serca, węzeł przedsionkowo-komorowy reguluje przewodzenie depolaryzacji z przedsionków do komór, a tym samym bezpośrednio decyduje o częstości skurczów komór serca. Lewa komora, kurcząc się wyrzuca do aorty i krążenia systemowego krew, która tworzy falę tętna. Tętno mierzone na tętnicach obwodowych to efekt przechodzenia fali krwi przez te naczynia zgodny ze skurczami mięśnia sercowego [37].

Pomiar tętna stanowi łatwą i bezinwazyjną metodę podstawowej oceny funkcji tego narządu. Prawidłowa wartość tętna spoczynkowego (ang. *resting heart rate*; HR_r)

u dorosłych mieści się w przedziale od 50 do 99 uderzeń na minutę [38]. Tętno od 100 uderz./min określamy jako częstoskurcz lub tachykardię, natomiast wynik poniżej dolnej granicy przedziału (<50 uderz./min) nosi miano rzadkoskurczu lub bradykardii [38].

Wczesne fizjologiczne badania treningowe koncentrowały się na metabolicznych wymaganiach organizmu w trakcie wykonywania wysiłku fizycznego. Analizowano parametry takie jak np. konsumpcja tlenu (VO_2) i wydatek energetyczny oraz tętno, które traktowano jako „metaboliczny produkt uboczny” będący prostym i tanim sposobem wyjaśnienia informacji treningowych [10,12].

Dziś wiele osób błędnie postrzega tętno ćwiczeniowe jako cel treningowy. Uważają, że wzrost wartości tętna, bez względu na sposób jego podwyższenia, skutkuje poprawą sprawności fizycznej. Na przykład wzrost wartości tętna w trakcie treningów o charakterze siłowym doprowadził do przekonania, że obwodowy trening siły można wykorzystać do poprawy ogólnej wydolności tlenowej. Niestety zignorowano przy tym fakt, że zaangażowanie poszczególnych grup mięśniowych trwa około 20-30 sekund, znacznie za krótko, aby wywołać zmiany adaptacyjne w szlakach oksydacyjnych mięśni [10,12].

Zaletą pomiaru tętna ćwiczeniowego jest możliwość samodzielnego pomiaru metodą palpacyjną. Niestety, taki pomiar tętna niesie ze sobą duże ryzyko błędu [39]. Otrzymany wynik może nie odwzorowywać rzeczywistej wartości tętna ćwiczeniowego, a to oznacza niewiarygodność pomiaru i w konsekwencji nieefektywność treningu. Z reguły wymagane jest zaprzestanie wykonywania wysiłku w czasie pomiaru.

Z tego powodu do praktyki treningowej wprowadzono pulsometry, będące urządzeniami dedykowanymi monitorowaniu pracy serca. Stosowanie pulsometru niesie ze sobą wiele korzyści, w tym nieprzerwany pomiar tętna ćwiczeniowego, wyznaczenie minimalnej i maksymalnej wartości tętna w trakcie treningu oraz monitorowanie HR w różnych fazach ćwiczeń [39-41].

Wyróżniamy dwa rodzaje pulsometrów. Pulsometr jednoczęściowy zwykle przyjmuje formę zegarka z optycznym czytnikiem tętna, ale występują również urządzenia dokonujące pomiaru na palcu lub szyi. Pulsometr dwuczęściowy (klasyczny) analizuje tętno, pracując na zasadzie podobnej do działania elektrokardiografu. Urządzenie składa się z pasa na klatkę piersiową i komputera treningowego w formie zegarka. Pas mierzy chwilową częstość pracy serca i bezprzewodowo przesyła dane analizowane przez komputer. Dokładność i wiarygodność pomiarowa pulsometrów jest duża, co czyni pulsometr jednym z najlepszych narzędzi wykorzystywanych w

monitorowaniu intensywności wysiłku fizycznego i kontroli reakcji organizmu na obciążenie wysiłkowe [42].

Niestety zastosowanie pulsometru w trakcie ćwiczeń nie zawsze jest możliwe, np. ze względów finansowych lub ograniczeń w dostępności urządzenia. Niektórzy ćwiczący mogą również dostrzegać potencjalną techniczną trudność w użytkowaniu lub odczuwać pewien dyskomfort związany z obecnością urządzenia na ciele i obawą dotyczącą prawidłowej dezynfekcji urządzenia po poprzednich użytkownikach [42].

W zależności od wartości tętna, wyróżniamy sześć zakresów intensywności wysiłku fizycznego [9,35,36]. Sposób klasyfikacji intensywności wysiłku ze względu na wartość tętna u młodych osób przedstawiono w tabeli 2.

Tabela 2. Klasyfikacja intensywności wysiłku fizycznego u młodych osób w zależności od wartości tętna ćwiczeniowego [9,35,36].

Wartość tętna [uderzenia/min]	Intensywność wysiłku fizycznego
<75	bardzo mała
75-100	mała
100-125	umiarkowana
125-150	duża
150-175	bardzo duża
>175	skrajnie duża

Kluczowym parametrem wykorzystywanym w badaniach fizjologii wysiłku jest tętno maksymalne (HR_{max}) [43]. HR_{max} określa największą liczbę skurczów serca na minutę w trakcie wykonywania wysiłku o maksymalnej intensywności. Tętno maksymalne określamy podczas testów wysiłkowych o narastającym obciążeniu, np. według protokołów rampowych opartych na wieku osoby ćwiczącej [44,45]. Najczęściej stosowaną formułą obliczeniową dla HR_{max} jest metoda zaproponowana przez Fox i wsp.: $220 - \text{wiek}$ [46,47].

Innym sposobem szacowania HR_{max} jest wykorzystanie matematycznej formuły. W tabeli 3 przedstawiono metody obliczeniowe dla HR_{max} wykorzystywane w sporcie [48].

Tabela 3. Wybrane algorytmy predykcji tętna maksymalnego (HR_{max}) wykorzystywane w sporcie [48].

Algorytmy predykcji tętna maksymalnego (HR_{max})
$HR_{max} = 220 - \text{wiek}$ [47]
$HR_{max} = 206,3 - (0,711 \times \text{wiek})$ [49]
$HR_{max} = 217 - (0,85 \times \text{wiek})$ [50]
$HR_{max} = 206,9 - (0,67 \times \text{wiek})$ [51]
$HR_{max} = 202 - (0,55 \times \text{wiek})$ [52]
$HR_{max} = 208 - (0,7 \times \text{wiek})$ [53]
$HR_{max} = 205 - (\text{wiek}/2)$ [54]

Trening oparty na znajomości tętna maksymalnego umożliwia ćwiczenie z zaplanowaną intensywnością, wywołanie określonego efektu w organizmie i osiągnięcie założonych celów treningowych. W tabeli 4 przedstawiono pięć stref intensywności treningowej wyróżnionych na podstawie procentowego odniesienia tętna ćwiczeniowego do wartości HR_{max} [55].

Tabela 4. Strefy intensywności treningowej w procentowym odniesieniu do tętna maksymalnego [55].

% HR_{max}	Strefa intensywności treningowej
<57	bardzo lekki wysiłek
57-63	lekki wysiłek
64-76	umiarkowany wysiłek
77-95	duży wysiłek
96-100	bliski maksymalnemu lub maksymalny wysiłek

Skróty: % HR_{max} – procent przewidywanego tętna maksymalnego;

Niektóre wyniki badań wskazują, że powszechnie stosowane metody predykcji HR_{max} mogą być obarczone pewnym ryzykiem błędu pomiarowego. Wynika to z wyznaczania wartości tętna maksymalnego na podstawie wieku, co przykładowo u osób starszych może prowadzić do niedoszacowania wyniku, a u ludzi młodych i sprawnych fizycznie do pewnego przeszacowania wartości tego parametru [53,56,57]. Należy wspomnieć, że HR_{max} jest wartością indywidualną u każdej osoby, zależną m.in. od masy ciała, stanu zdrowia, formy motywacji do wykonywania maksymalnego wysiłku w czasie pomiaru tętna.

Różnorodność algorytmów obliczeniowych dotyczących szacowania HR_{max} skutkuje zróżnicowaniem wyników tego parametru zależnie od wybranej metody. Celem poszukiwania innych wskaźników intensywności wysiłku fizycznego niezależnych od

pomiaru lub szacunku tętna opracowano subiektywną skalę odczuwania zmęczenia w czasie wysiłku fizycznego (ang. *Rating of Perceived Exertion*; RPE) [58-61].

1.3.2. Skala Borga

Kilkadziesiąt lat temu zmęczenie odczuwane w sporcie było uważane za zbyt subiektywne i zmienne oraz zbyt zależne od indywidualnej oceny ćwiczącego [59]. Wątpiono w motywację sportowca, gdy ten odmawiał dalszego wykonywania wysiłku fizycznego w związku z subiektywnym odczuciem zmęczenia. Zmiana myślenia w tej kwestii nastąpiła w latach 80-tych XX wieku za sprawą Gunnara Borga. Szwedzki psycholog opracował wówczas skalę nazwaną później od jego nazwiska (ang. *Borg scale*; BS), będącą pierwszym sposobem oceny intensywności wysiłku fizycznego opartym na psychosomatycznych odczuciach osoby ćwiczącej [58-61].

Badania Borga wykazały silną zależność pomiędzy subiektywnym odczuwaniem zmęczenia wysiłkiem (np. bólem, uczuciem kołatania serca i zaburzeniami oddechu) a fizjologicznymi, obiektywnymi parametrami oceny intensywności treningowej (m.in. wartością tętna i pułapem tlenowym). Zdaniem Borga, subiektywna ocena intensywności wysiłku fizycznego może stanowić trafny wskaźnik obciążenia treningowego i z tego względu Borg zaleca ćwiczącym, aby poświęcali więcej uwagi odczuciom towarzyszącym wykonywaniu wysiłku fizycznego [58].

Piętnastopunktowa skala Borga obejmuje zakres 6-20 punktów, gdzie dolna granica oznacza lekki wysiłek, a górna wysiłek o maksymalnej intensywności (tabela 5) [58].

U osób młodych, na podstawie wyniku zareportowanego przez ćwiczącego w skali Borga można dopasować wartość tętna ćwiczeniowego do subiektywnego odczucia wysiłku fizycznego. Po pomnożeniu wyniku przez dziesięć uzyskujemy przybliżone wartości tętna w trakcie ćwiczeń [61]. Przykładowo: wysiłek zareportowany przez ćwiczącego jako 11 oznacza lekką intensywność, która koresponduje z tętnem na poziomie około 110 uderzeń na minutę.

Na subiektywne odczucie zmęczenia w trakcie ćwiczeń wpływają czynniki zewnętrzne związane z obciążeniem wysiłkowym oraz wewnętrzne bodźce fizjologiczne stanowiące odpowiedź organizmu na pracę fizyczną [62]. Nie należy zapominać także o szczególnie istotnym elemencie postrzegania intensywności wysiłku fizycznego, jakim jest psychologiczne nastawienie do wykonywania ćwiczeń (motywacja, niechęć, apatia).

Bodźce fizjologiczne dzielimy na dwie kategorie: centralne i obwodowe. Centralne dotyczą objawów zmęczenia ze strony układu krążeniowo-oddechowego i objawiają się np. kołataniem serca, trudnościami w oddychaniu lub dolegliwościami bólowymi w klatce piersiowej. Bodźce obwodowe dotyczą zaś objawów zmęczenia kończyn, tzn. obejmują bóle mięśni i/lub ogólny stan ociężałości wskutek uprawianej aktywności fizycznej [63-65].

W miarę zwiększającej się intensywności wysiłku fizycznego rośnie zapotrzebowanie mięśni na tlen i substancje energetyczne. Wzmożony metabolizm wyzwała szereg bodźców wewnętrznych (centralnych i obwodowych), będących mediatorami wzrostu wartości RPE [66]. Miejscowe uczucie zmęczenia w kończynach związane jest przede wszystkim ze spadkiem pH w komórkach mięśniowych, który prowadzi do obniżenia aktywności enzymów glikolitycznych, dyskomfortu, a nawet bólu [63,65].

W zakresie natężenia pracy układu oddechowego głównym mediatorem percepcji intensywności wysiłku fizycznego jest minutowa częstość oddechów. Co ciekawe, badania nie wykazały istotnego wpływu zmian w objętości oddechowej na subiektywną ocenę ciężkości ćwiczeń [67,68]. Do innych czynników wpływających na subiektywną ocenę intensywności wysiłku fizycznego zaliczamy m.in. wiek, płeć, stopień wydolności organizmu, a także stężenie katecholamin i β -endorfin we krwi osoby ćwiczącej [62,69,70].

Podsumowując, czynnikami wpływającymi na ocenę ciężkości pracy w BS są odczucia związane z częstością oddechu, zasobami substratów energetycznych oraz spowolnieniem pracy enzymów glikolitycznych z równoczesnym wzrostem pH w mięśniach spowodowanym zmęczeniem mięśniowym [71,72]. Narastające zmęczenie mięśniowe zmusza organizm do aktywacji większej ilości włókien mięśniowych z jednoczesnym zwiększeniem ich mobilizacji, czego wynikiem jest powstawanie odczuć bólowych wpływających na ocenę ciężkości wykonywanych ćwiczeń [73,74].

Skala Borga uznawana jest za dobrą metodę monitorowania intensywności wysiłku fizycznego. Dzięki silnej zależności pomiędzy wynikiem w BS a pomiarami intensywności wysiłku (np. HR i VO_{2max}), powszechnie wykorzystuje się ją w charakterze doprecyzowującego wskaźnika obciążenia wysiłkiem [75-77]. Metoda znajduje zastosowanie w różnych formach aktywności fizycznych (zarówno w ćwiczeniach wytrzymałościowych, jak i siłowych) [55].

Tabela 5. Skala Borga z uwzględnieniem przybliżonej wartości tętna ćwiczeniowego u osób młodych do 30 roku życia [58].

Skala Borga	Wysiłek	Przybliżona wartość tętna [uderzenia/min]
6	brak	60
7	bardzo, bardzo lekki	70
8		80
9		90
10	bardzo lekki	100
11	lekki	110
12		120
13	niezbyt ciężki	130
14		140
15	ciężki	150
16		160
17	bardzo ciężki	170
18		180
19	bardzo, bardzo ciężki	190
20	maksymalny	200

1.3.3. Inne wskaźniki nasilenia wysiłku

1.3.3.1. Stężenie kwasu mlekowego

Produkcja kwasu mlekowego (ang. *lactic acid*; LA) to nieodłączny element pracy mięśniowej. Organizm syntetyzuje ten związek niezależnie od charakteru przemiany energetycznej, ale to właśnie energetyka wysiłku fizycznego decyduje o ilości kwasu mlekowego w organizmie [78,79].

W warunkach aerobowych, a więc gdy zasoby tlenowe organizmu odpowiadają bieżącemu zapotrzebowaniu na wysiłek, kwas mlekowy stanowi pośredni produkt metabolizmu glukozy (będącej głównym dostawcą energii dla pracujących mięśni).

Szybko ulega konwersji do kwasu cytrynowego w cyklu Krebsa, a dalsze przemiany prowadzą do syntezy końcowych produktów oddychania tlenowego, tj. wody, dwutlenku węgla i energii w postaci ATP (ang. *adenosine triphosphate*) [9].

Kwas mlekowy powstaje także w warunkach opóźnionej dostawy tlenu do mięśni, którą obserwujemy np. na początku wysiłku fizycznego. Synteza LA odbywa się również w trakcie wysiłków o dużej intensywności, gdzie dochodzi do gwałtownego wzrostu

zapotrzebowania mięśni na energię przy niewystarczającym potencjale energetycznym z procesów tlenowych. Największe stężenie kwasu mlekowego obserwujemy w trakcie wykonywania wysiłków supramaksymalnych [80,81].

W związku z dużą intensywnością wysiłku fizycznego, glikogen mięśniowy ulega konwersji do kwasu mlekowego. Jego kumulacja w mięśniach prowadzi do dyskomfortu i reakcji bólowych u osoby ćwiczącej. Celem szybkiej eliminacji LA, związek ten dyfunduje z komórek mięśniowych do krwi i trafia do wątroby, gdzie w procesie glukoneogenezy ulega przetworzeniu do glukozy. Całkowite odprowadzenie LA z mięśni trwa do dwóch godzin od zakończenia intensywnego wysiłku fizycznego [9,82-84].

Próg mleczanowy (ang. *lactate threshold*; LT) odpowiada takiemu nasileniu wysiłku, kiedy dochodzi do wzrostu stężenia kwasu mlekowego powyżej 2 mmol/l we krwi w trakcie wysiłku fizycznego [9]. Spoczynkowe stężenie towarzyszące ćwiczeniom o małej intensywności wynosi około 1 mmol/l. Wraz ze wzrostem intensywności treningu stężenie kwasu mlekowego rośnie, a ćwiczący osiąga pierwszy próg mleczanowy (LT1, próg tlenowy) odpowiadający wartości powyżej 2 mmol/l. LT1 stanowi punkt rozpoczęcia tlenowo-beztlenowej pracy mięśniowej. Wysiłek poniżej LT1 i okolicach progu tlenowego pozwala na kilkugodzinną aktywność [9-12].

Drugi próg mleczanowy (LT2, próg beztlenowy) występuje w momencie osiągnięcia stężenia LA na poziomie 4 mmol/l. Choć wiadomo, że wartość LT2 cechuje się osobniczym zróżnicowaniem, liczne badania przeprowadzone z udziałem zawodników wielu dyscyplin sportowych wykazały, że u większości z nich granica przemian beztlenowych rzeczywiście zachodzi przy intensywności odpowiadającej stężeniu kwasu mlekowego równym 4 mmol/l. Osiągnięcie progu beztlenowego oznacza moment zastąpienia procesów mieszanych przemianami beztlenowymi i ma szczególne znaczenie w sportach wytrzymałościowych i wysiłkach trwających ponad 30 minut (np. biegi długodystansowe i pływanie). Stwierdzono, że intensywność wysiłku przy której występuje LT2 można podwyższyć pod wpływem treningu wytrzymałościowego. Oznacza to, że po wdrożeniu podprogowego cyklu treningu ćwiczący wykonuje z czasem identyczną pracę przy niższym stężeniu kwasu mlekowego we krwi. Podwyższenie progu przemian beztlenowych (LT2) stanowi jedną z charakterystycznych oznak wzrostu wydolności tlenowej [9-12].

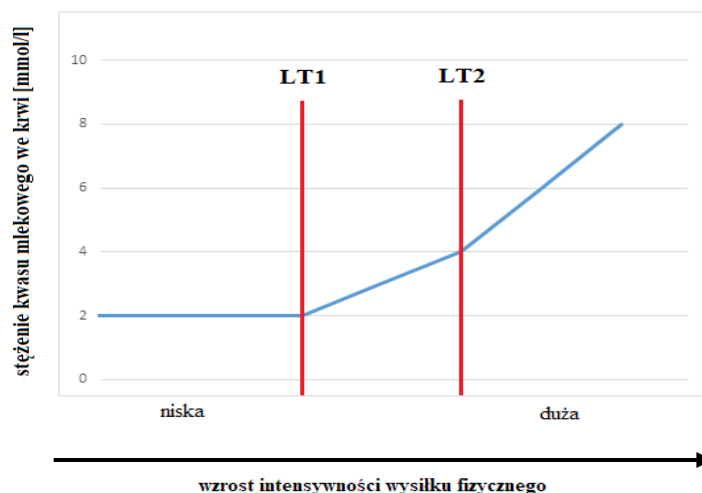
Oznaczanie stężenia kwasu mlekowego we krwi stanowi ważną metodę oceny intensywności wysiłku fizycznego [85,86]. U sportowców, powysiłkowy pomiar stężenia LA (np. po zawodach), umożliwia pozyskanie informacji o przemianach energetycznych

dominujących w trakcie rywalizacji, a tym samym na ukierunkowanie przyszłych programów treningowych zawodnika. Pomiar LT bardzo często wykonywany jest w trakcie wystandaryzowanych testów wysiłkowych. Zwykle odbywa się to podczas progresywnego testu na bieżni mechanicznej lub cykloergometrze, w trakcie którego na każdym etapie pobierane są próbki krwi zawodnika [87].

W tabeli 6 w praktycznym uproszczeniu opisano charakter i stopień intensywności wysiłku fizycznego w zależności od stężenia kwasu mlekowego we krwi [10]. Relację pomiędzy stężeniem kwasu mlekowego we krwi a intensywnością wysiłku fizycznego w ujęciu progów mleczanowych przedstawiono na rycinie 2 [9,10].

Tabela 6. Zależność pomiędzy stężeniem kwasu mlekowego we krwi [mmol/l] a intensywnością i charakterem energetycznym wysiłku fizycznego [10].

Stężenie kwasu mlekowego [mmol/l]	Charakter wysiłku fizycznego	Intensywność wysiłku fizycznego
< 2	aerobowy	niska
2 - 4	mieszany	umiarkowana
> 4	anaerobowy	duża



Rycina 2.

Zależność pomiędzy stężeniem kwasu mlekowego we krwi [mmol/l] a intensywnością wysiłku fizycznego w ujęciu progów mleczanowych (LT1, LT2) [9,10].

1.3.3.2. Maksymalny pobór tlenu

Maksymalny pobór tlenu (VO_{2max}) jest funkcjonalną miarą wydolności organizmu wykorzystywaną do oceny sprawności układu krążeniowo-oddechowego. Parametr określa maksymalne pochłanianie (zużycie) tlenu w trakcie wysiłku fizycznego i wyrażony jest jednostką ml/kg/min. Wartości VO_{2max} uzyskiwane są w trakcie laboratoryjnego testu maksymalnego o stopniowo wzrastającej intensywności – u mężczyzn wyniki są wyższe i wynoszą 30-55 ml/kg/min, natomiast u kobiet kształtują się na poziomie 25-40 ml/kg/min [13].

Wartość VO_{2max} uwarunkowana jest sprawnością transportu tlenu (m.in. stężeniem hemoglobiny), czyli czynnikiem centralnym i obwodowym, który wyraża się szybką utylizacją tlenu na poziomie tkanki mięśniowej [53,88,89]. Systematyczne ćwiczenia o charakterze wytrzymałościowym u zdrowych osób wpływają na podwyższenie wartości VO_{2max} o około 10-30% [90,91]. Co ciekawe, zaprzestanie aktywności fizycznej powoduje spadek wartości tego parametru do poziomu sprzed aktywności fizycznej [92].

1.3.3.3. Równoważnik metaboliczny

Innym parametrem wykorzystywanym w ocenie intensywności wysiłku fizycznego jest równoważnik metaboliczny (ang. *metabolic equivalent*; MET) [9,10]. Wskaźnik ten informuje o ilości pochłanianego i zużywanego przez tkanki tlenu w czasie spoczynku, gdzie 1 MET=3,5 ml O_2 /kg/min. W czasie wysiłku wielkość MET wielokrotnie wzrasta, głównie w związku ze zwiększeniem wydatku energetycznego przez mięśnie i serce [9-12]. W tabeli 7 przedstawiono przykładowe parametry wykorzystywane w określaniu obciążenia wysiłkowego [10].

Z jednostką MET wiąże się także pojęcie wydolności funkcjonalnej (ang. *functional capacity*; FC). Wydolność funkcjonalną wyrażoną równoważnikiem metabolicznym można określić w teście sprawnościowym (próbie wysiłkowej).

Tabela 7. Wybrane parametry wykorzystywane w monitorowaniu wysiłku fizycznego (przybliżone wartości parametrów dla osoby o masie 70 kg) [10].

Intensywność wysiłku fizycznego	Parametr			
	HR [uderzenia/min]	VO ₂ [l/min]	MET*	cal/min**
mała	100	1,0	4,0	5,0
umiarkowana	135	2,0	8,1	10,0
duża	170	3,0	12,2	15,0

*MET stanowi wielokrotność spoczynkowego tempa metabolizmu; 1 MET = 3,5 ml/kg/min = 1,2 cal/min;

** 1 litr tlenu stanowi ekwiwalent 5 cal/min;

Skróty: HR – tętno; MET – równoważnik metaboliczny; VO₂ – pobór tlenu;

1.3.3.4. Stężenie amoniaku

Ocena stężenia amoniaku jest kolejnym parametrem oceny intensywności wysiłku fizycznego opisywanych w literaturze. Zieliński i wsp. dokonali analizy porównawczej dotyczącej stężenia amoniaku i kwasu mlekowego we krwi sprinterów i triathlonistów podczas stopniowanego testu wysiłkowego na bieżni i w trakcie 30 minut regeneracji potreningowej [93]. Poziom stężenia amoniaku we krwi okazał się bardziej wrażliwym wskaźnikiem intensywności wysiłku fizycznego w porównaniu do analizy poziomu stężenia kwasu mlekowego we krwi ćwiczących [93,94].

2. Założenia pracy

Jako trener, w codziennej praktyce mam do czynienia ze zróżnicowaną grupą studentów. Są wśród nich osoby szczupłe i otyłe, o różnym stopniu aktywności ruchowej, formy, wytrzymałości, a także o niejednakowym nastawieniu do wysiłku fizycznego oraz sportu.

Bywa, że do Studium Wychowania Fizycznego i Sportu UMP trafiają młodzi ludzie, którzy traktują uczestnictwo w ćwiczeniach jako „zło konieczne” i niechętnie angażują się w zajęcia. Inną grupą są studenci, którzy z kolei nie mogą doczekać się rozpoczęcia zajęć, które trwają dla nich zbyt krótko. Tacy studenci często są spotykani w siłowni, na salach sportowych, niejednokrotnie są reprezentantami różnych sekcji sportowych, biorą udział w zawodach, reprezentują UMP w kraju i za granicą.

W tak zróżnicowanej sytuacji nauczyciel i/lub trener prowadzący zajęcia musi znaleźć „złoty środek”, który dostosuje obciążenie wysiłkiem fizycznym w taki sposób, aby wszyscy studenci mogli wykonać zadane ćwiczenie. Najrozsądniejszym wyborem jest pełna indywidualizacja obciążeń, bowiem zbyt trudne zadania i polecenia zniechęcą słabszych fizycznie studentów, a zbyt proste zanudzą aktywnych i wysportowanych.

W trakcie zajęć trener stale analizuje wizualnie zachowanie i zaangażowanie każdego uczestnika zajęć w wykonywane polecenia. Niemniej bardzo przydatne byłoby oszacowanie, czy ćwiczący studenci osiągnęli minimalną oczekiwaną intensywność wysiłku, która pozwoli odnieść im korzyść zarówno z punktu widzenia fizjologii, zdrowia, jak i ogólnej sprawności fizycznej.

Jak już wspomniałem wcześniej, ocenę zaangażowania w wysiłek można przeprowadzić również w oparciu o subiektywną skalę zmęczenia zaproponowaną przez Gunnara Borga [58]. Znane są niektóre związki pomiędzy szczytowymi wartościami pracy serca a wynikami w skali Borga u osób w różnych grupach wiekowych, u ludzi zdrowych i chorych [60-63]. Nie znalazłem jednak analizy podobnych zależności w populacji studentów uczelni wyższych, z którymi pracuję na co dzień w ramach praktyki treningowej.

W oparciu o wstępne badania pilotażowe, które przed laty przeprowadziłem na małej grupie studentów zaobserwowałem ciekawe zjawisko. Okazało się, że wśród studentów o podobnej budowie ciała występowały duże różnice w wartości tętna spoczynkowego i rozgrzewkowego. Odniosłem wrażenie, że studenci którzy charakteryzowali się niższymi wartościami tętna spoczynkowego znacznie słabiej

angażowali się w zajęcia, natomiast ci, których tętno spoczynkowe było większe uczestniczyli w ćwiczeniach bardziej aktywnie. Z uwagi na fakt, że badania te wykonywałem na grupie kilkunastu studentów, nie byłem przekonany czy moje obserwacje są właściwe i powtarzalne.

Jak wspomniałem, istnieje wiele sposobów monitorowania intensywności wysiłku fizycznego – zarówno subiektywne, jak i obiektywne. W pracy trenera takie monitorowanie odgrywa kluczową rolę, którą wcześniej wyjaśniłem. W związku z tym, a także w oparciu o własne obserwacje z praktyki trenerskiej, wysunąłem kilka założeń badawczych, które posłużyły do zdefiniowania celów.

Hipotezy badania:

- 1) Istnieją istotne związki między pomiarami szczytowej częstości pracy serca a odczuwanym zmęczeniem w skali Borga u studentów UMP uczestniczących w zajęciach aktywności fizycznej;
- 2) Istnieją istotne różnice w częstości pracy serca i parametrach pochodnych między grupami studentów, którzy odczuwają różny stopień zmęczenia spowodowanego wykonywanymi ćwiczeniami.

Ponadto w oparciu o opisane wyniki własnych badań pilotażowych zdefiniowałem dwie kolejne hipotezy:

- 3) Istnieje związek między spoczynkową i rozgrzewkową wartością pracy serca a odczuwanym zmęczeniem u studentów UMP uczestniczących w zajęciach aktywności fizycznej;
- 4) Przy pomocy skali Borga można ustalić taki poziom zmęczenia, który pozwoli z dużym prawdopodobieństwem określić czy student osiągnął zaplanowaną intensywność wysiłku w trakcie ćwiczeń fizycznych. Do celów badania przyjąłem, że będzie to wysiłek o co najmniej submaksymalnej intensywności.

3. Cel pracy

Nauczyciele i trenerzy pracujący w Studium Wychowania Fizycznego i Sportu Uniwersytetu Medycznego im. Karola Marcinkowskiego w Poznaniu prowadzą wiele rodzajów zajęć ze studentami Uczelni. Zajęcia te mają zróżnicowany charakter – od przedmiotów zawodowych, po treningi sekcji sportowych.

Monitorowanie wysiłku fizycznego jest niezbędnym elementem wszystkich typów tych zajęć, aby ocenić obciążenie treningowe, obiektywnie obserwować ewentualne postępy i motywację ćwiczących, a także aby uświadomić studentom jak dana aktywność może wpływać na organizm człowieka.

- 1) Oszacowanie związków między subiektywnym odczuciem zmęczenia zmierzonym przy pomocy skali Borga a obiektywnymi wskaźnikami opartymi o pomiary częstości pracy serca w czasie wysiłku związanego z wykonywaniem ćwiczeń fizycznych przez studentów;
- 2) Porównanie wartości częstości pracy serca i wskaźników pochodnych między grupami studentów o różnym nasileniu zmęczenia według skali Borga w trakcie wykonywanych ćwiczeń fizycznych;
- 3) Określenie wartości predykcyjnej tętna spoczynkowego i rozgrzewkowego dla stopnia odczuwanego zmęczenia według skali Borga w trakcie wykonywanych przez studentów ćwiczeń fizycznych;
- 4) Ocena przydatności subiektywnej skali Borga w identyfikacji osiągnięcia wysiłku o co najmniej submaksymalnej intensywności w trakcie wykonywanych przez studentów ćwiczeń fizycznych.

Założone cele realizowano badając zdrowych studentów Uniwersytetu Medycznego w Poznaniu, którzy brali udział w wielu formach aktywności fizycznej oferowanych przez Studium Wychowania Fizycznego i Sportu UMP.

4. Grupa badana i metody

4.1. Grupa badana

W latach 2009-2016 w Studium Wychowania Fizycznego i Sportu UMP przebadano 565 zdrowych studentów (zgoda Komisji Bioetycznej przy Uniwersytecie Medycznym im. Karola Marcinkowskiego w Poznaniu, uchwała nr 512/09). Badani reprezentowali wszystkie wydziały Uniwersytetu, tj. Wydział Lekarski I, Wydział Lekarski II, Wydział Farmaceutyczny oraz Wydział Nauk o Zdrowiu.

Warunkiem włączenia do badania było lekarskie orzeczenie o zdolności do uczestnictwa w zajęciach wychowania fizycznego, fakultetach, sekcjach sportowych oraz w przedmiotach zawodowych związanych z wykonywaniem zajęć fizycznych. Nie stosowano dodatkowych kryteriów selekcji.

Zestawienie form zajęć, w trakcie których prowadzono badanie przedstawiono w tabeli 8. Zajęcia wychowania fizycznego oraz fakultety i sekcje sportowe były prowadzone dla studentów wszystkich kierunków i wydziałów, natomiast przedmioty zawodowe prowadzono dla studentów kierunku Kosmetologia, Fizjoterapia oraz Ratownictwo Medyczne.

Dane zbierano w trakcie wszystkich wymienionych rodzajów aktywności fizycznej, na losowo wybranych zajęciach prowadzonych przez różnych nauczycieli i trenerów. Nie stosowano żadnego kryterium w doborze prowadzących, jak również w żaden sposób nie wpływało na ich decyzję co do sposobu realizacji zajęć.

Tabela 8. Zestawienie form aktywności sportowych, w trakcie których zbierano dane badawcze.

Sekcje Sportowe	Zajęcia Wychowania Fizycznego
• siatkówka mężczyzn i kobiet • kulturystyka • tenis stołowy • lekkoatletyka • koszykówka mężczyzn i kobiet • tenis ziemny • pływanie • unihokej • piłka nożna • aerobik • ergometr wioślarski	• mini gry • taniec • siłownia • tenis • trening cardio • aerobik
Przedmioty Zawodowe	Fakultety Sportowe
• Kształtowanie sylwetki i postawy ciała • Lekkoatletyczne formy rehabilitacji ruchowej • kajakarstwo dla Ratownictwa Medycznego	• siatkówka • taniec • siłownia • trening cardio • aerobik • tenis

4.2. Metody

Pożądanym celem związanym z uczestnictwem w zajęciach wychowania fizycznego jest osiągnięcie co najmniej submaksymalnego wysiłku, który określa się jako wystąpienie tętna odpowiadającego co najmniej 85% przewidywanego tętna maksymalnego.

Przed rozpoczęciem badania zmierzono wzrost i masę ciała uczestników z wykorzystaniem antropometru oraz cyfrowej wagi platformowej (AXIS, model B150L, Polska). Wzrost badanych mierzono bez obuwia, ze stopami złączonymi w piętach i ułożonymi płasko na podłożu. Ciało znajdowało się w maksymalnym wyproście, a głowa w płaszczyźnie frankfurckiej. Otrzymane wyniki posłużyły wyliczeniu wskaźnika masy ciała (ang. *Body Mass Index*; BMI) oraz powierzchni ciała badanych wg formuły Du Bois & Du Bois [95-98].

Ponadto na podstawie wieku ćwiczących określono indywidualne wartości przewidywanej maksymalnej częstości pracy serca z zastosowaniem równania: $eHR_{max} = 220 - \text{wiek}$ [99,100].

W kolejnym etapie studenci zostali poproszeni o założenie na klatkę piersiową pulsometru mierzącego chwilową częstość pracy serca (w oparciu o pomiar EKG) i łączącego się bezprzewodowo z zegarkowym komputerem treningowym (Polar RS 100TM, Finlandia) zakładanym na lewy nadgarstek.

Badanie rozpoczęło się od trwającego trzy minuty odpoczynku w pozycji siedzącej. Pod koniec odpoczynku zmierzono indywidualne wartości tętna spoczynkowego badanych i wpisano je do protokołu badania (HR_r).

Urządzenie pomiarowe Polar RS 100TM nieustannie rejestrowało tętno w trakcie badania, tzn. w spoczynku, rozgrzewce, przez właściwą część treningową, aż po okres aktywnej regeneracji. Drugim w kolejności parametrem zanotowanym w protokole była najwyższa wartość tętna uczestników w trakcie rozgrzewki (ang. *warm-up heart rate*; HR_{wu}). Uproszczony schemat badania trwającego łącznie około 90 minut przedstawiono na rycinie 3.

Po zakończonym treningu, badanych poproszono o zdjęcie urządzeń pomiarowych i odczytywano szczytową częstość pracy serca (ang. *peak heart rate*; HR_p) zarejestrowaną przez pulsometr podczas właściwej części treningowej.

Dodatkowo obliczono parametry pochodne z mierzonych wartości HR_r , HR_{wu} i HR_p takie jak:

- rHR_p/HR_{max} – stosunek HR_p do przewidywanego dla wieku tętna maksymalnego (eHR_{max}). Wartość tego parametru wynoszącą co najmniej 85% uznano za wskaźnik osiągnięcia zmęczenia na poziomie co najmniej submaksymalnym.

- HR_{ci} – odpowiedź chronotropową serca (ang. *chronotropic index*), czyli uzyskane przyspieszenie pracy serca ($HR_p - HR_r$) do potencjalnie maksymalnego przyspieszenia między spoczynkiem a wyliczonym eHR_{max} ($eHR_{max} - HR_r$) w czasie wysiłku wyrażoną

wzorem: $\frac{(HR_p - HR_r)}{(eHR_{max} - HR_r)} [\%]$ [101].

- dHR_{r-p} – zmiana częstości pracy serca między wartością spoczynkową a szczytową:

$$dHR_{r-p} = HR_p - HR_r;$$

- dHR_{r-wu} – zmiana częstości pracy serca między wartością spoczynkową a osiągniętą w czasie rozgrzewki:

$$dHR_{r-wu} = HR_{wu} - HR_r;$$

- dHR_{wu-p} – zmiana częstości pracy serca między wartością osiągniętą w czasie rozgrzewki a szczytem wysiłku:

$$dHR_{wu-p} = HR_p - HR_{wu}.$$

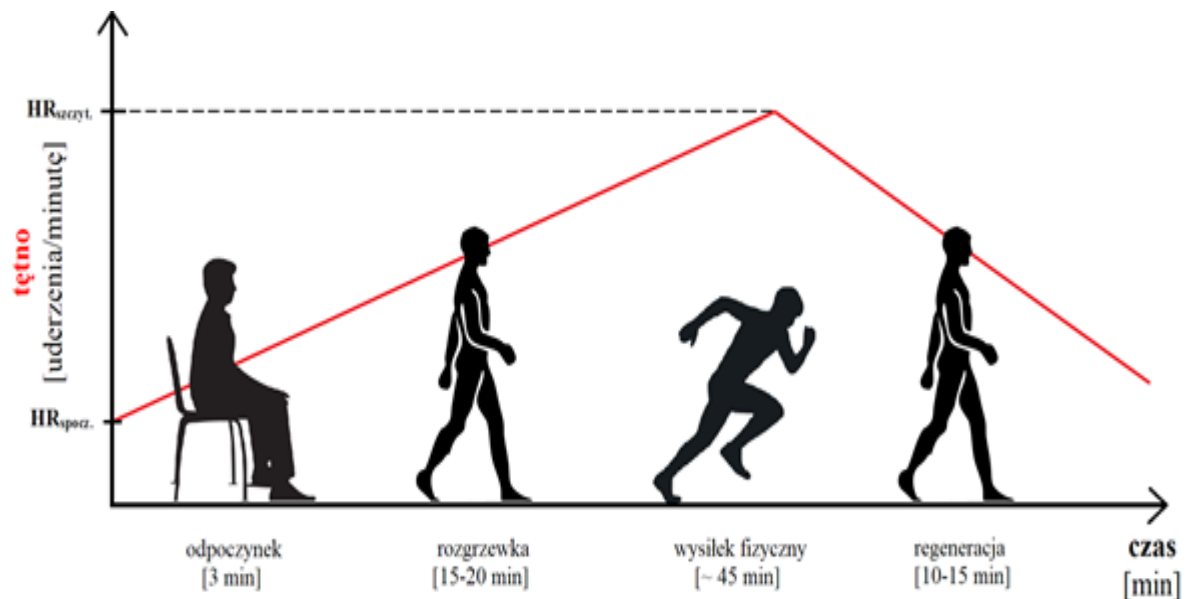
W celu oceny subiektywnego uczucia zmęczenia wykorzystano piętnastopunktową skalę Borga (BS) szacującą odczuwane zmęczenie w zakresie od 6 do 20 przedstawioną wcześniej w tabeli 5. Wynik na poziomie sześciu określał wysiłek minimalny, zaś wybór dwudziestu punktów oznaczał maksymalną intensywność wysiłku fizycznego. Wszystkim badanym zwrócono uwagę, aby w trakcie ćwiczeń zapamiętali moment o najwyższym (ich zdaniem) poziomie zmęczenia fizycznego, który raportowali prowadzącemu pod koniec zajęć z wykorzystaniem skali Borga.

Na podstawie subiektywnych wyników oceny intensywności wysiłku fizycznego raportowanych skalą Borga, grupa badana została podzielona na cztery podgrupy od niskiego do bardzo dużego poziomu odczuwanego zmęczenia (tabela 9).

Tabela 9. Podział grupy badawczej ze względu na subiektywną ocenę intensywności wysiłku fizycznego.

Grupa	Wynik w skali Borga	Poziom zmęczenia
G1	≤ 8	niski
G2	9–12	średni
G3	13–16	duży
G4	≥ 17	bardzo duży

Na rycinie 3 przedstawiono schemat przebiegu badania, w którym brali udział studenci w Studium Wychowania Fizycznego i Sportu UMP.



Rycina 3.

Uproszczony schemat prowadzonego badania. Wszyscy badani na początku zajęć odpoczywali, a następnie przechodzili fazę rozgrzewki, właściwego wysiłku fizycznego i okres regeneracji.

4.3. Analiza statystyczna

Rozkład danych ciągłych przeanalizowano testem Shapiro-Wilk'a. Większość zmiennych (poza pojedynczymi wyjątkami) zachowała rozkład normalny i z tego powodu wyniki przedstawiono zarówno w formie średnich z odchyleniami standardowymi, jak i w postaci mediany z wartościami odpowiadającymi 25. i 75. percentylowi. Dane jakościowe przedstawiono jako liczbę spełniającą dane kryterium, zaś częstość wyrażono w wartościach procentowych.

Wstępna analiza wariancji (ang. *Analysis of Variance*; ANOVA) posłużyła ocenie różnic dotyczących analizowanych parametrów pomiędzy czterema grupami (uporządkowanymi pod względem poziomu zmęczenia według BS, patrz. tabela 9). Dla parametrów, gdzie stwierdzono istotne statystycznie różnice wykonano dodatkową analizę kowariancji (ang. *Analysis of Covariance*; ANCOVA) z odpowiednimi testami post-hoc, dostosowaną do płci, wieku i wartości BMI. Miało to na celu potwierdzić lub wykluczyć występowanie różnic w wartościach analizowanych parametrów niezależnie od wymienionych czynników dostosowujących.

Zależność pomiędzy odczuwanym zmęczeniem (wyrażonym skalą Borga) a parametrami HR_p , dHR_{wu-p} , dHR_{r-p} , rHR_p/HR_{max} oraz HR_{ci} oceniono za pomocą parametrycznej korelacji Pearsona. W celu lepszej wizualizacji zaobserwowanych istotnych zależności między uśrednionymi wartościami dla kolejnych decyli tych parametrów a odpowiadającymi im uśrednionymi wartościami w skali Borga wykorzystano regresję liniową. Podobne podejście zastosowano do oceny wartości predykcyjnej częstości pracy serca w spoczynku (HR_r), podczas rozgrzewki (HR_{wu}) oraz różnicy w częstości pracy serca pomiędzy spoczynkiem a rozgrzewką (dHR_{r-wu}), co miało pozwolić na ustalenie maksymalnego zmęczenia w czasie treningu.

W każdej z czterech grup (G1-G4) oceniono liczbę studentów, którzy osiągnęli przynajmniej wysiłek submaksymalny ($HR_p/HR_{max} \geq 85\%$). Przy pomocy testu chi-kwadrat Pearsona dla trendów przeanalizowano związek pomiędzy rosnącą grupą odczuwającą wyższe zmęczenie według skali Borga a częstością występowania submaksymalnego zmęczenia.

Jednocześnie przy pomocy analizy ROC (ang. *Receiver Operating Characteristic*) oraz produktu czułości i specyficzności wyznaczono wartość odcinającą odczuwanego zmęczenia według skali Borga, która możliwie najlepiej (najwyższa możliwa wartość produktu czułości i swoistości) szacuje wystąpienie wysiłku na co najmniej submaksymalnym poziomie. Przy pomocy regresji logistycznej niedostosowanej oraz dostosowanej do płci, wieku i BMI wyznaczono iloraz szans (ang. *odds ratio*; OR) z 95% przedziałem ufności (ang. *confidence interval*; CI) dla tak wyznaczonego proggu.

We wszystkich analizach za istotne statystycznie różnice lub związki uznano wyłącznie te, dla których stwierdzono $p < 0,05$. Wyniki badania poddano analizie statystycznej z wykorzystaniem MedCalc Statistical Software version 19.1 (MedCalc Software by Ostend, Belgium; 2019).

5. Wyniki

5.1. Charakterystyka przebadanej grupy

Przebadano 565 studentów, w tym 428 kobiet (tj. 75,8% całej grupy). Średni wiek badanych wynosił 21 lat, wzrost 171 cm, średnia masa ciała 63 kg, BMI 21,4 kg/m², a powierzchnia ciała 1,7 m².

Wśród studentów biorących udział w badaniu średnie wartości częstości pracy serca wyniosły: w spoczynku 71 skurczów/min, w czasie rozgrzewki 101 skurczów/min, w szczycie wysiłku 172 skurcze/min, a przewidywana dla wieku maksymalna częstość pracy wyniosła 198 skurczów/min. Średnia wartość wzrostu częstości pracy serca między spoczynkiem a rozgrzewką wyniosła 31 skurczów/min, między rozgrzewką a szczytem wysiłku 71 skurczów/min, a między spoczynkiem a szczytem wysiłku 102 skurcze/min. Średni stosunek szczytowej do przewidywanej dla wieku maksymalnej częstości pracy serca wyniósł niecałe 87%, natomiast średnia wskaźnika odpowiedzi chronotropowej serca na wysiłek około 80%. Średnie subiektywne odczucie zmęczenia według skali Borga przekroczyło 13 punktów w całej przebadanej grupie. W tabeli 10 przedstawiono wyniki analizowanych danych ciągłych dla wszystkich przebadanych osób.

Tabela 10. Podsumowanie danych ciągłych opisujących wszystkich przebadanych studentów (N=565).

Parametr	średnia	SD	mediana	25.-75. percentyl
Wiek [lata]	21,68	2,22	21,00	20,00 - 23,00
Wzrost [cm]	171,04	8,59	170,00	165,00 - 176,00
Ciężar ciała [kg]	63,01	11,83	60,00	54,00 - 70,00
Body Mass Index [kg/m ²]	21,40	2,63	20,94	19,49 - 23,04
Powierzchnia ciała [m ²]	1,74	0,19	1,69	1,60 - 1,868
HR _r [skurcze/min]	70,63	9,45	70,00	65,00 - 78,00
HR _{wu} [skurcze/min]	101,44	12,09	100,00	91,00 - 110,00
HR _p [skurcze/min]	172,07	11,07	170,00	164,00 - 180,00
eHR _{max} [skurcze/min]	198,32	2,22	199,00	197,00 - 200,00
dHR _{r-wu} [skurcze/min]	30,82	18,46	29,00	17,75 - 43,00
dHR _{wu-p} [skurcze/min]	70,63	9,68	70,00	65,00 - 78,00
dHR _{r-p} [skurcze/min]	101,45	11,93	101,00	91,00 - 110,00
rHR _p /HR _{max} [%]	86,78	5,68	85,43	82,41 - 90,82
HR _{ci} [%]	79,57	8,58	77,52	73,11 - 85,63
BS	13,21	3,24	14,00	10,00 - 15,00

Skróty: BS – subiektywne odczucie zmęczenia wg skali Borga; dHR_{r-p} – zmiana częstości pracy serca między wartością spoczynkową a szczytową; dHR_{r-wu} – zmiana częstości pracy serca między wartością spoczynkową a osiągniętą w czasie rozgrzewki; dHR_{wu-p} – zmiana częstości pracy serca między wartością osiągniętą w czasie rozgrzewki a szczytową; eHR_{max} – przewidywana dla wieku maksymalna częstość pracy serca; HR_{ci} – wskaźnik odpowiedzi chronotropowej serca na wysiłek; HR_p – szczytowa częstość pracy serca w czasie treningu; HR_r – spoczynkowa częstość pracy serca; HR_{wu} – najwyższa częstość pracy serca w czasie rozgrzewki; rHR_p/HR_{max} – stosunek szczytowej do przewidywanej dla wieku maksymalnej częstości pracy serca; SD – odchylenie standardowe (standard deviation);

5.2. Charakterystyka badanych w zależności od zmęczenia odczuwanego w trakcie wysiłku fizycznego

W tabeli 11 przedstawiono liczbę studentów przyporządkowanych do czterech grup (1-4) dotyczących odczuwanego zmęczenia, tj. niskiego, średniego, dużego i bardzo dużego. Ponadto zaprezentowano liczbę studentów, których częstość pracy serca w czasie treningu osiągnęła co najmniej 85% przewidywanej częstości maksymalnej odpowiadającej wysiłkowi submaksymalnemu.

Tabela 11. Podsumowanie danych jakościowych wśród wszystkich przebadanych studentów (N=565).

	N	%
Grupa 1: BS do 8 (niskie)	58	10,3%
Grupa 2: BS 9-12 (średnie)	169	29,9%
Grupa 3: BS 13-16 (duże)	258	45,7%
Grupa 4: BS co najmniej 17 (bardzo duże)	80	14,2%
Studenci, którzy osiągnęli co najmniej 85% rHR_p/HR_{max}	309	54,7%

Skróty: BS – subiektywne odczucie zmęczenia według skali Borga; rHR_p/HR_{max} – stosunek szczytowej do przewidywanej dla wieku maksymalnej częstości pracy serca;

Podsumowanie wszystkich danych ciągłych w poszczególnych grupach ustalonych na podstawie odczuwanego zmęczenia według skali Borga przedstawiono w tabeli 12. W tej samej tabeli zaprezentowano wartość p z testu ANOVA oceniającego obecność potencjalnych różnic między grupami odczuwającymi różny stopień zmęczenia według skali Borga. W przypadku tej analizy przedstawiono wyłącznie średnie wartości analizowanych zmiennych i odchylenie standardowe (SD). Istotne statystycznie różnice zaobserwowano w analizowanych parametrach związanych wyłącznie z pracą serca.

U studentów odczuwających większe zmęczenie odnotowywano wyższą częstość pracy serca w spoczynku, podczas rozgrzewki i w szczycie wysiłku, a także większe przyrosty częstości pracy serca między różnymi fazami treningu.

Pod względem wieku, masy, budowy ciała i wartości tętna maksymalnego grupy nie różniły się w sposób istotny statystycznie. Nie stwierdzono istotnych różnic w rozkładzie

płci pomiędzy analizowanymi grupami ($p = 0,0888$ dla trendu z analizy χ^2 Pearsona) – w grupie 1. było 10 mężczyzn (17,2%), w grupie 2. 37 (21,9%), w grupie 3. 68 (26,4%), a w grupie 4. 22 (27,5%).

Tabela 12. Wyniki analizy wariancji dla grup studentów według odczuwanego zmęczenia w czasie treningu.

	Grupa 1		Grupa 2		Grupa 3		Grupa 4		P _{ANOVA}
	średnia	SD	średnia	SD	średnia	SD	średnia	SD	
Wiek [lata]	21,19	1,72	21,81	2,38	21,61	2,20	22,01	2,23	0,143
Wzrost [cm]	168,95	7,35	170,55	9,03	171,56	8,41	171,93	8,84	0,383
Ciężar ciała [kg]	60,67	10,93	62,18	13,40	63,79	10,63	63,96	12,44	0,142
Body Mass Index [kg/m ²]	21,13	2,56	21,20	3,09	21,56	2,30	21,48	2,60	0,257
Powierzchnia ciała [m ²]	1,69	0,17	1,72	0,21	1,75	0,18	1,75	0,20	0,260
HR _r [skurcze/min]	66,05	9,36	69,20	9,34	72,42	9,11	71,18	9,38	<0,001
HR _{wu} [skurcze/min]	96,71	9,67	98,83	10,72	101,87	11,76	109,01	13,86	<0,001
HR _p [skurcze/min]	162,76	6,51	168,14	9,44	174,46	10,55	179,44	11,02	<0,001
eHR _{max} [skurcze/min]	198,81	1,72	198,20	2,38	198,39	2,20	197,99	2,23	0,143
dHR _{r-wu} [skurcze/min]	30,66	17,89	29,64	17,75	29,45	17,98	37,84	20,56	0,003
dHR _{wu-p} [skurcze/min]	66,05	9,36	69,30	9,41	72,59	9,02	70,43	11,00	<0,001
dHR _{r-p} [skurcze/min]	96,71	9,67	98,94	10,68	102,04	11,63	108,26	13,73	0,016
rHR _p /HR _{max} [%]	81,87	3,41	84,84	4,70	87,95	5,43	90,65	5,78	<0,001
HR _{ci} [%]	72,83	4,86	76,75	7,01	81,13	8,40	85,38	9,05	<0,001
BS	7,02	0,89	10,82	0,98	14,78	0,94	17,69	0,89	<0,001

Skróty: BS – subiektywne odczucie zmęczenia wg skali Borga; dHR_{r-p} – zmiana częstości pracy serca między wartością spoczynkową a szczytową; dHR_{r-wu} – zmiana częstości pracy serca między wartością spoczynkową a osiągniętą w czasie rozgrzewki; dHR_{wu-p} – zmiana częstości pracy serca między wartością osiągniętą w czasie rozgrzewki a szczytową; eHR_{max} – przewidywana dla wieku maksymalna częstość pracy serca; HR_{ci} – wskaźnik odpowiedzi chronotropowej serca na wysiłek; HR_p – szczytowa częstość pracy serca w czasie treningu; HR_r – spoczynkowa częstość pracy serca; HR_{wu} – najwyższa częstość pracy serca w czasie rozgrzewki; rHR_p/HR_{max} – stosunek szczytowej do przewidywanej dla wieku maksymalnej częstości pracy serca; SD – odchylenie standardowe (standard deviation);

W celu ograniczenia wpływu wieku, płci i BMI na ww. wyniki wykonano analizę kowariancji dostosowaną do tych parametrów. Wyniki ANCOVA tj. szacowanych wartości średnich brzegowych (ang. *Estimated Marginal Means*; EMM) i błędu standardowego (ang. *Standard Error*; SE) przedstawione w tabeli 13. wskazują na różnice między parametrami pracy serca w zależności od poziomu odczuwanego zmęczenia przez studentów.

Tabela 13. Wyniki analizy kowariancji danych ciągłych różniących się istotnie statystycznie w ANOVA (tabela 12). ANCOVA została dostosowana do wieku, płci i wartości BMI dla grup studentów według odczuwanego zmęczenia w czasie treningu, a wyniki przedstawiono jako szacowaną wartość średnich brzegowych (EMM) i błąd standardowy (SE).

Parametr	Grupa 1		Grupa 2		Grupa 3		Grupa 4		wartość <i>p</i>
	EMM	SE	EMM	SE	EMM	SE	EMM	SE	
HR _r [skurcze/min]	65,71	1,20	69,22	0,70	72,42	0,57	71,38	1,02	<0,001
HR _{wu} [skurcze/min]	97,11	1,52	98,82	0,89	101,87	0,72	108,77	1,29	<0,001
HR _p [skurcze/min]	162,84	1,31	168,14	0,76	174,45	0,62	179,39	1,11	<0,001
dHR _{r-wu} [skurcze/min]	31,39	2,38	29,60	1,39	29,45	1,13	37,39	2,03	0,005
dHR _{wu-p} [skurcze/min]	65,73	1,23	69,32	0,72	72,59	0,58	70,62	1,05	<0,001
dHR _{r-p} [skurcze/min]	97,12	1,50	98,92	0,88	102,04	0,71	108,01	1,28	<0,001
rHR _p /HR _{max} [%]	82,13	0,66	84,78	0,39	87,98	0,31	90,48	0,56	<0,001
HR _{ci} [%]	73,2	1,0	76,68	0,59	81,17	0,48	85,11	0,86	<0,001

Skróty: EMM – szacowana średnia brzegowa (estimated marginal mean); dHR_{r-p} – zmiana częstości pracy serca między wartością spoczynkową a szczytową; dHR_{r-wu} – zmiana częstości pracy serca między wartością spoczynkową a osiągniętą w czasie rozgrzewki; dHR_{wu-p} – zmiana częstości pracy serca między wartością osiągniętą w czasie rozgrzewki a szczytową; HR_{ci} – wskaźnik odpowiedzi chronotropowej serca na wysiłek; HR_p – szczytowa częstość pracy serca w czasie treningu; HR_r – spoczynkowa częstość pracy serca; HR_{wu} – najwyższa częstość pracy serca w czasie rozgrzewki; rHR_p/HR_{max} – stosunek szczytowej do przewidywanej dla wieku maksymalnej częstości pracy serca; SE – błąd standardowy (standard error);

W tabeli 14 przedstawiono wartości *p* z analizy post-testów dla porównań badanych parametrów w ANCOVA między poszczególnymi podgrupami studentów wyodrębnionymi według odczuwanego zmęczenia. Większość z prezentowanych parametrów wskazuje, że studenci z grupy 1., tj. odczuwających niskie zmęczenie osiągało istotnie niższe wartości częstości pracy serca niż studenci z grup 3. i 4. odczuwających duże i bardzo duże zmęczenie.

Tabela 14. Wartości *p* z analizy post-testów dla porównań badanych parametrów zaprezentowanych w tabeli 13. między poszczególnymi podgrupami według odczuwanego zmęczenia.

	Grupa 1 vs 2	Grupa 1 vs 3	Grupa 1 vs 4	Grupa 2 vs 3	Grupa 2 vs 4	Grupa 3 vs 4
HR _r	0,0730	<0,0001	0,0022	0,0027	0,4940	1,0000
HR _{wu}	1,0000	0,0286	<0,0001	0,0478	<0,0001	<0,0001
HR _p	0,0030	<0,0001	<0,0001	<0,0001	<0,0001	0,0007
dHR _{r-wu}	1,0000	1,0000	0,3373	1,0000	0,0096	0,0040
dHR _{wu-p}	0,0728	<0,0001	0,0160	0,0027	1,0000	0,6013
dHR _{r-p}	1,0000	0,0198	<0,0001	0,0369	<0,0001	0,0003
rHR _p /HR _{max}	0,0034	<0,0001	<0,0001	<0,0001	<0,0001	0,0007
HR _{ci}	0,0206	<0,0001	<0,0001	<0,0001	<0,0001	0,0004

Skróty: dHR_{r-wu} – zmiana częstości pracy serca między wartością spoczynkową a osiągniętą w czasie rozgrzewki; dHR_{wu-p} – zmiana częstości pracy serca między wartością osiągniętą w czasie rozgrzewki a szczytową; dHR_{r-p} – zmiana częstości pracy serca między wartością spoczynkową a szczytową; HR_{ci} – wskaźnik odpowiedzi chronotropowej serca na wysiłek; HR_p – szczytowa częstość pracy serca w czasie treningu; HR_r – spoczynkowa częstość pracy serca; HR_{wu} – najwyższa częstość pracy serca w czasie rozgrzewki; rHR_p/HR_{max} – stosunek szczytowej do przewidywanej dla wieku maksymalnej częstości pracy serca;

Liczbę badanych, którzy osiągnęli wartość tętna szczytowego stanowiącego co najmniej 85% właściwego dla ich wieku tętna maksymalnego (tj. co najmniej wysiłek submaksymalny) dla poszczególnych grup odczuwanego zmęczenia przedstawiono w tabeli 15. Procent studentów, którzy wykonali w czasie zajęć co najmniej submaksymalny wysiłek wzrastał od wartości ok. 21% w grupie deklarujących najmniejsze zmęczenie (do 8 punktów w skali Borga) do niemal 80% wśród osób o najwyższym odczuwanym zmęczeniu (co najmniej 17 punktów w skali Borga).

Tabela 15. Liczba i procent studentów w poszczególnych grupach, którzy w czasie treningu osiągnęli $rHR_p/HR_{\max} \geq 85\%$ odczuwanego zmęczenia według skali Borga.

Grupa 1		Grupa 2		Grupa 3		Grupa 4		<i>p</i> dla trendu
N	%	N	%	N	%	N	%	
12	20,69	68	40,24	166	64,34	63	78,75	<0,0001

Skróty: *N* – liczba studentów;

5.3. Ocena związków pomiędzy odczuciem zmęczenia a wartością tętna w trakcie ćwiczeń

Bezpośrednią ilustracją związków między odczuwanym zmęczeniem według skali Borga a parametrami pochodzącymi z pomiarów pracy serca są wyniki korelacji Pearsona przedstawione w tabeli 16. Niemal wszystkie zaprezentowane korelacje były dodatnie i statystycznie istotne, a najsilniejsze zaobserwowano dla stosunku szczytowej do przewidywanej dla wieku maksymalnej częstości pracy serca, wartości tętna szczytowego oraz wskaźnika odpowiedzi chronotropowej serca na wysiłek fizyczny. Jedynie związek z przewidywaną dla wieku maksymalną częstością pracy serca nie był istotny statycznie (należy zwrócić uwagę, że parametr eHR_{max} jest liniowo zależny od wieku, a rozpiętość wieku badanych była bardzo mała).

Tabela 16. Współczynnik korelacji Pearsona dla zależności pomiędzy odczuciem zmęczenia a parametrami pochodzącymi z pomiarów częstości pracy serca.

	Współczynnik r	Wartość P
HR_r	0,19	<0,0001
HR_{wu}	0,29	<0,0001
HR_p	0,45	<0,0001
eHR_{max}	-0,07	0,0938
dHR_{r-wu}	0,09	0,0285
dHR_{wu-p}	0,16	0,0001
dHR_{r-p}	0,27	<0,0001
rHR_p/HR_{max}	0,46	<0,0001
HR_{ci}	0,43	<0,0001

Skróty: dHR_{r-wu} – zmiana częstości pracy serca między wartością spoczynkową a osiągniętą w czasie rozgrzewki; dHR_{wu-p} – zmiana częstości pracy serca między wartością osiągniętą w czasie rozgrzewki a szczytową; dHR_{r-p} – zmiana częstości pracy serca między wartością spoczynkową a szczytową; eHR_{max} – przewidywana dla wieku maksymalna częstość pracy serca; HR_{ci} – wskaźnik odpowiedzi chronotropowej serca na wysiłek; HR_p – szczytowa częstość pracy serca w czasie treningu; HR_r – spoczynkowa częstość pracy serca; HR_{wu} – najwyższa częstość pracy serca w czasie rozgrzewki; rHR_p/HR_{max} – stosunek szczytowej do przewidywanej dla wieku maksymalnej częstości pracy serca;

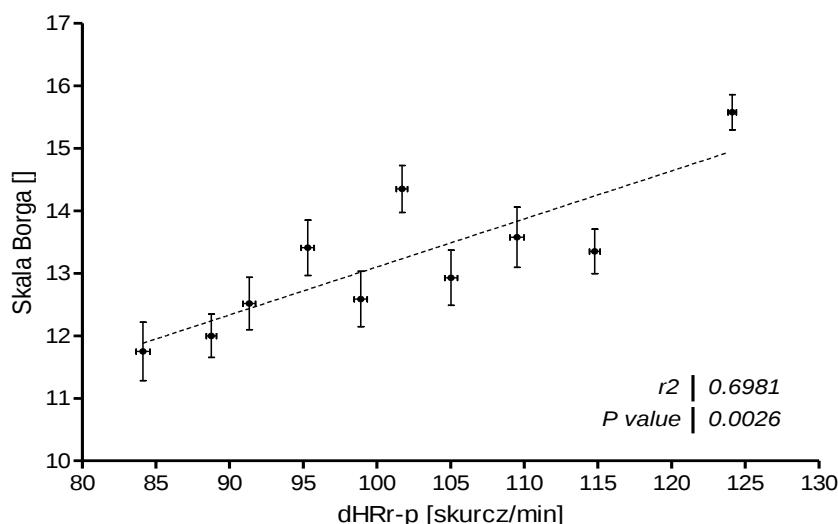
W celu lepszej wizualizacji zależności między wartościami częstości pracy serca a skalą Borga, badanych podzielono na 10 równych grup (decyli) i przeanalizowano regresje linowe między średnimi wartościami poszczególnych parametrów pracy serca a średnią wartością skali Borga w każdym decylu. Analizę tę wykonano wyłącznie dla statystycznie istotnych zależności zaprezentowanych w tabeli 16. Dodatkowo wyniki podzielono na 2 grupy. W pierwszej przedstawiono związki odczuwanego zmęczenia z parametrami odzwierciedlającymi bezpośrednio lub pośrednio szczytową częstość pracy

serca, tj. dHR_{wu-p} , dHR_{r-p} , HR_{ci} , HR_p oraz rHR_p/HR_{max} . W drugiej grupie przedstawiono związki między odczuwanym zmęczeniem a wskaźnikami częstości pracy serca w spoczynku, rozgrzewce i zmianą częstości pracy serca między spoczynkiem a rozgrzewką. Podział ten wynika z faktu, że HR_r , HR_{wu} oraz dHR_{r-wu} były zmierzone przed szczytowym wysiłkiem i największym odczuwanym zmęczeniem. Z tego powodu związki między HR_r , HR_{wu} oraz dHR_{r-wu} a wartością BS mają znaczenie predykcyjne.

5.4. Związki między szczytową wartością tętna i parametrami pochodnymi a skalą Borga

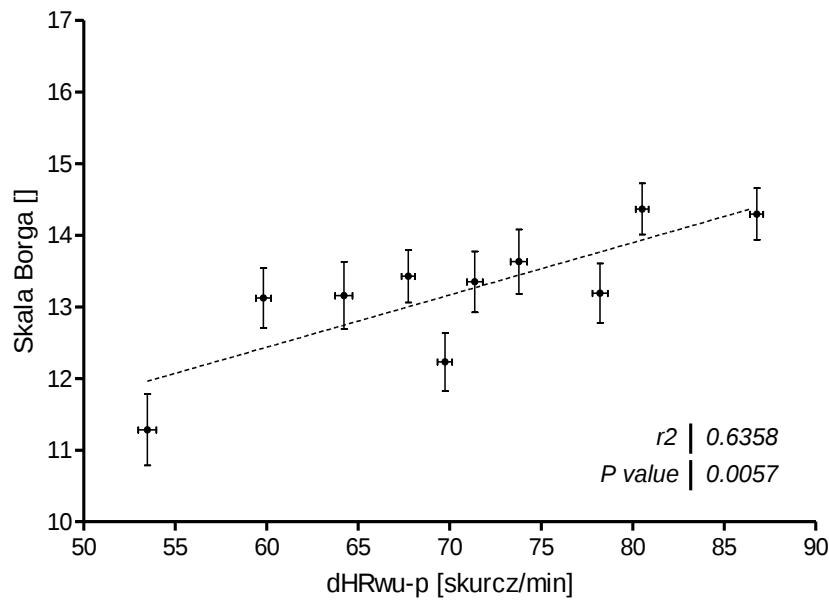
Wyniki analizy regresji liniowej między decylami wartości dHR_{r-p} , dHR_{wu-p} , HR_p , rHR_p/HR_{max} oraz HR_{ci} a decylami wartości BS zaprezentowano na rycinach 4-8.

Wszystkie wymienione zależności wskazują na istotne związki między odpowiedzią serca w czasie wysiłku a odczuwanym w tym czasie zmęczeniem. Najsilniejsze, niemal liniowe zależności zaobserwowano między HR_p , rHR_p/HR_{max} oraz HR_{ci} a BS. Wyniki te można interpretować w taki sposób, że obiektywne pomiary szczytowej częstości pracy serca w czasie wysiłku znajdują swoje odzwierciedlenie w subiektywnej skali Borga związanej z odczuwanym wysiłkiem. Innymi słowy, osoby osiągające wyższe wartości szczytowej częstości pracy serca odczuwają bardziej nasilone zmęczenie.



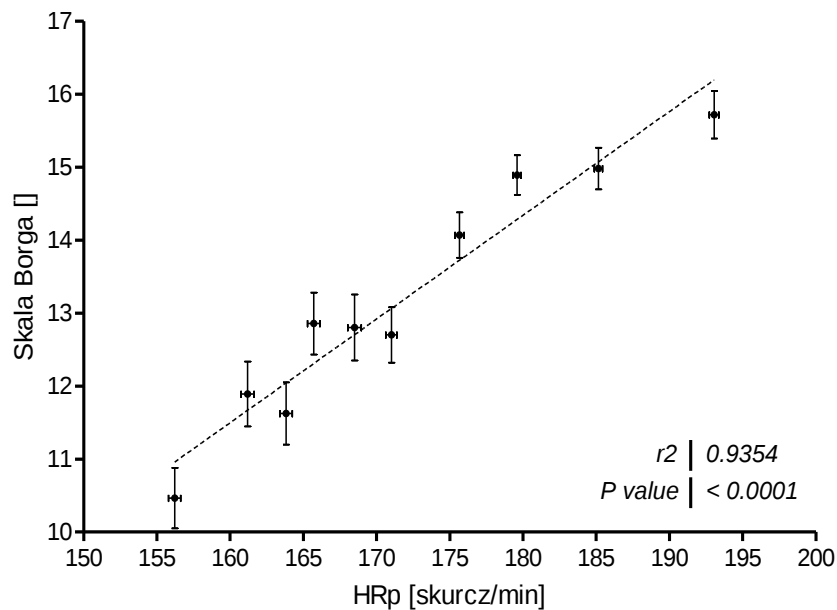
Rycina 4.

Regresja liniowa między decylami przyrostu częstości pracy serca między spoczynkiem i szczytem wysiłku (dHR_{r-p}) a decylami wartości odczuwanego zmęczenia według BS.



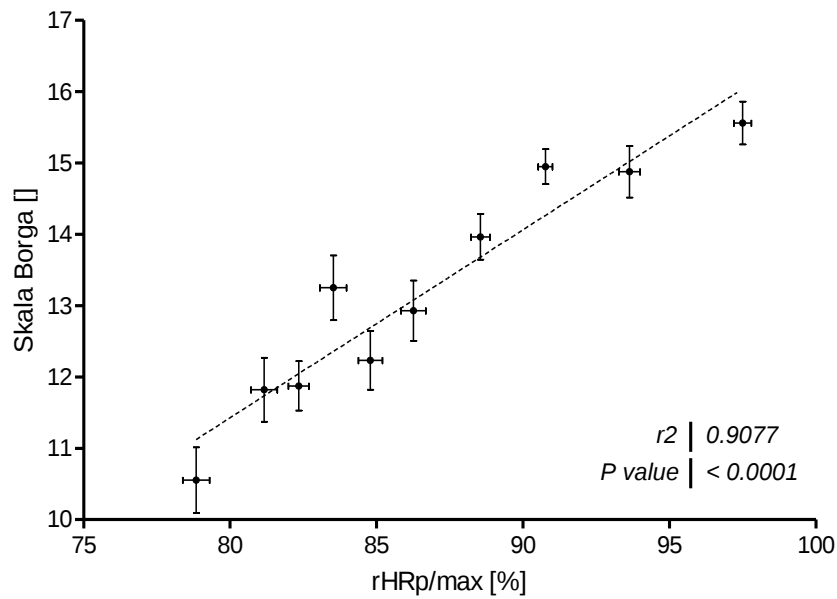
Rycina 5.

Regresja liniowa między decylami przyrostu częstości pracy serca między rozgrzewką i szczytem wysiłku (dHR_{wu-p}) a decylami wartości odczuwanego zmęczenia według BS.



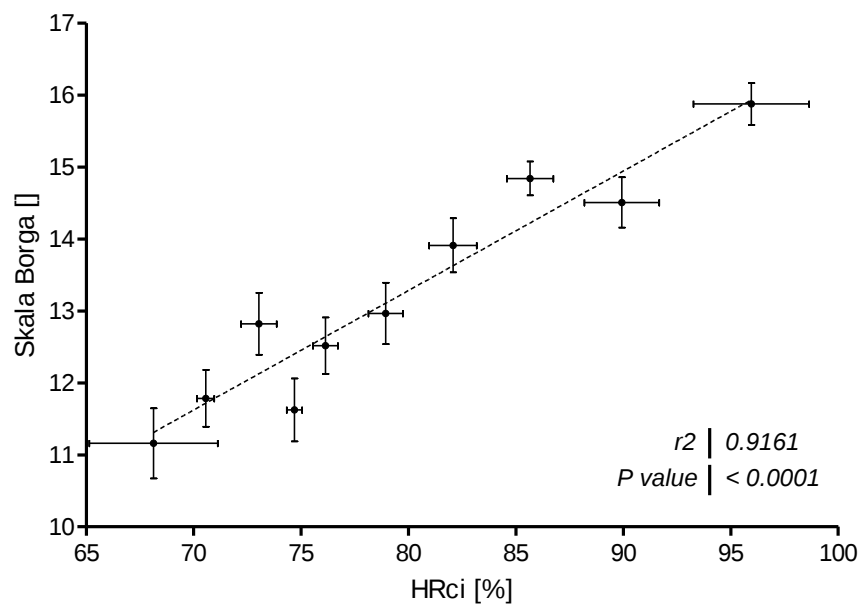
Rycina 6.

Regresja liniowa między decylami częstości pracy serca w szczycie wysiłku (HR_p) a decylami wartości odczuwanego zmęczenia według BS.



Rycina 7.

Regresja liniowa między decylami stosunku szczytowej do przewidywanej dla wieku maksymalnej częstości pracy serca (rHR_p/HR_{max}) a decylami wartości odczuwanego zmęczenia według BS.



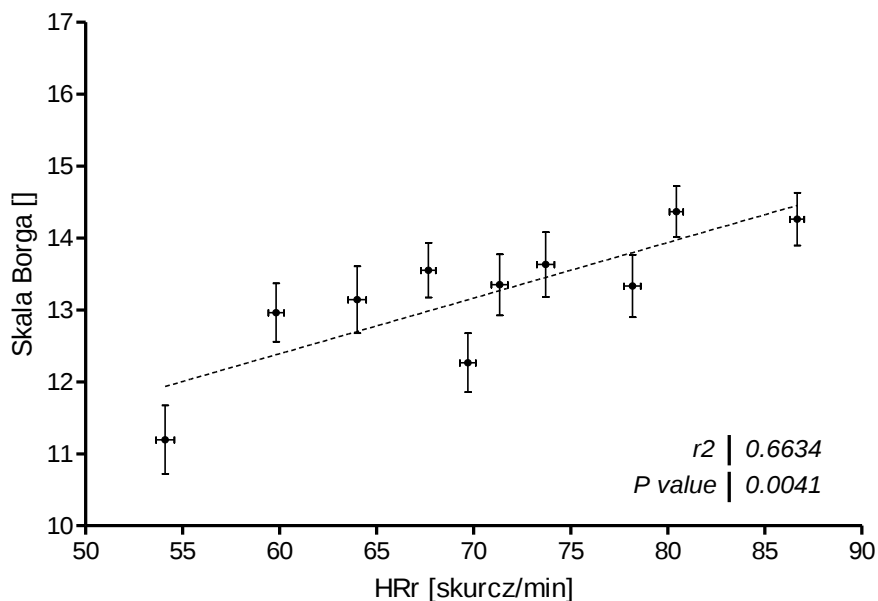
Rycina 8.

Regresja liniowa między decylami wartości wskaźnika odpowiedzi chronotropowej serca na wysiłek (HR_{ci}) a decylami wartości odczuwanego zmęczenia według BS.

5.5. Predykcja odczuwanego zmęczenia w oparciu o pomiary tętna w spoczynku i podczas rozgrzewki

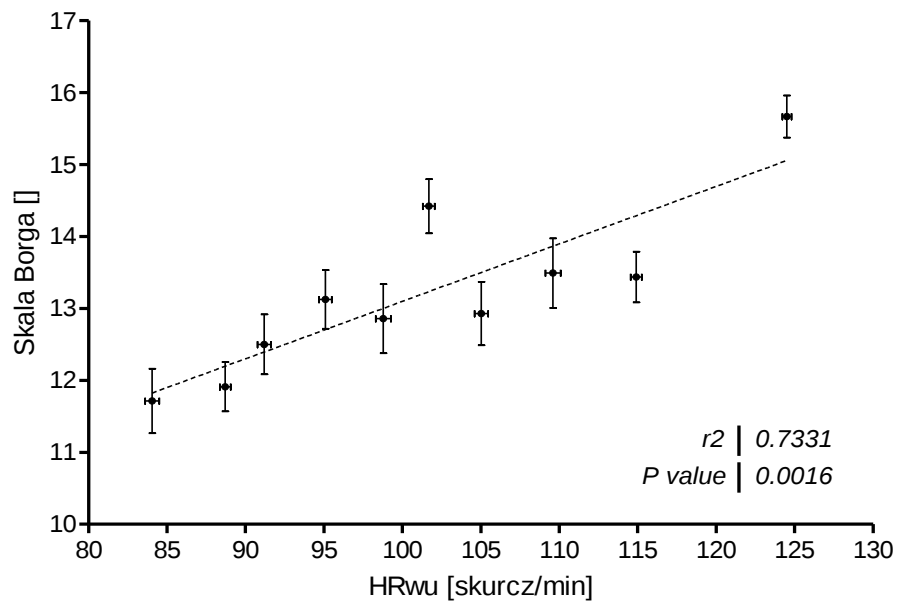
Zaprezentowane związki między decylami HR_r , HR_{wu} oraz dHR_{r-wu} a decylami BS (ryciny 9-11) wskazują na istotne zależności między częstością pracy serca w spoczynku i rozgrzewce przed wysiłkiem a zmęczeniem, które będzie dopiero odczuwane. Wartość r^2 dla związków między HR_r i HR_{wu} a BS wskazuje średnio-silną zależność, natomiast dla zmiany częstości pracy serca między spoczynkiem a rozgrzewką i odczuwanym zmęczeniem na słabą zależność.

Ponieważ pomiary HR_r , HR_{wu} oraz dHR_{r-wu} były wykonane przed zaplanowanym wysiłkiem i związanym z tym odczuwanym zmęczeniem, z tego powodu wyniki przedstawionych analiz regresji liniowej między decylami tych wartości a decylami wartości BS są predykcyjne dla zmęczenia. Innymi słowy, na podstawie pomiarów częstości pracy serca w spoczynku i w czasie rozgrzewki można z pewnym przybliżeniem przewidzieć jak bardzo badany zmęczy się w czasie zajęć wychowania fizycznego.



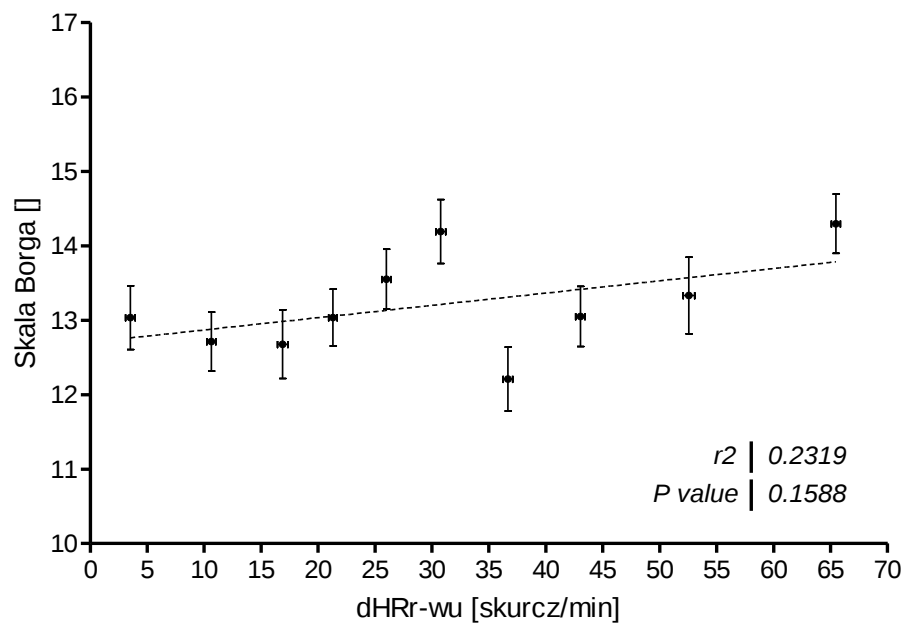
Rycina 9.

Regresja liniowa między decylami spoczynkowej częstości pracy serca (HR_r) a decylami wartości odczuwanego zmęczenia według skali Borga.



Rycina 10.

Regresja liniowa między decylami częstości pracy serca w czasie rozgrzewki (HR_{wu}) a decylami odczuwanego zmęczenia według skali Borga.



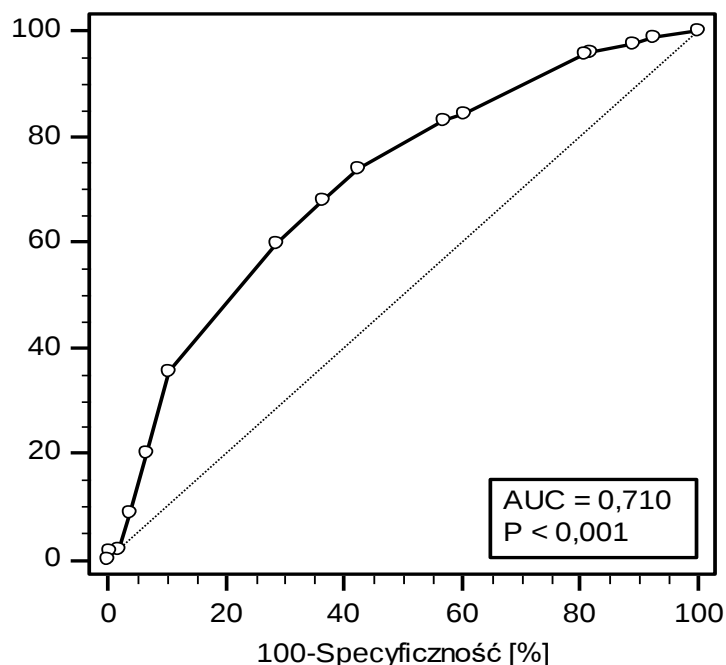
Rycina 11.

Regresja liniowa między decylami zmiany częstości pracy serca między spoczynkiem a rozgrzewką (dHR_{r-wu}) a decylami wartości odczuwanego zmęczenia według skali Borga.

5.6. Prawdopodobieństwo osiągnięcia submaksymalnego wysiłku fizycznego w oparciu o subiektywną ocenę zmęczenia w skali Borga

Pożądanym celem związanym z udziałem w zajęciach wychowania fizycznego jest osiągnięcie co najmniej submaksymalnego wysiłku, który określa się jako pojawienie się tętna odpowiadającego przynajmniej 85% przewidywanego tętna maksymalnego.

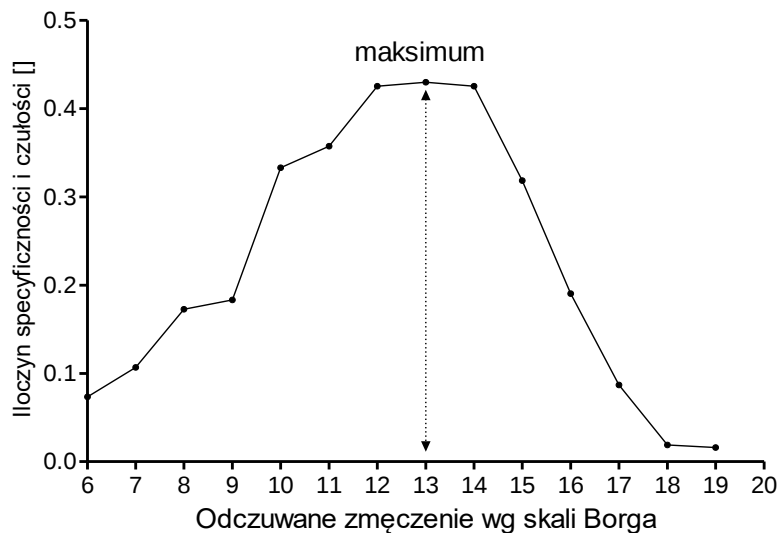
W celu wyznaczenia progu raportowanego zmęczenia według BS dla wystąpienia (wartość 1) lub nie (wartość 0) submaksymalnego zmęczenia przy optymalnych wartościach czułości i specyficzności posłużono się analizą krzywej ROC (rycina 12). Wyznaczona przy pomocy tej analizy wartość AUC wyniosła 0,710 (95% przedział ufności 0,670 – 0,747).



Rycina 12.

Krzywa Receiver Operating Characteristic (ROC) dla zależności czułości od (100-specyficzność) dla różnych punktów odcięcia (wartość odczuwanego zmęczenia według skali Borga) dla wystąpienia submaksymalnego zmęczenia (rHR_p/HR_{max} co najmniej 85%). Skróty: AUC – pole powierzchni pod krzywą (ang. Area Under Curve);

Na rycinie 13 przedstawiono wykres zależności wartości produktu czułości i specyficzności dla wystąpienia submaksymalnego zmęczenia w zależności od stopnia odczuwanego zmęczenia w skali Borga. Wartość maksymalna tego produktu wystąpiła dla zmęczenia odczuwanego na poziomie co najmniej 13 według BS przy czułości 74,11% i specyficzności 57,42%. Innymi słowy, odczuwanie zmęczenia w czasie wysiłku na poziomie przynajmniej 13 punktów według skali Borga jest związane z ponad 74% czułością i 57% specyficznością dla wystąpienia submaksymalnego zmęczenia.



Rycina 13.

Zależność iloczynu czułości i specyficzności dla wystąpienia submaksymalnego zmęczenia w zależności od stopnia odczuwanego zmęczenia w skali Borga. W celu wyliczenia produktu czułości i specyficzności wartości te przedstawiono w zakresie 0-1 zamiast 0-100%.

Dla wyznaczonego zmęczenia według BS na poziomie co najmniej 13 punktów wyznaczono iloraz szans (OR) wystąpienia submaksymalnego zmęczenia przy pomocy jednoczynnikowej regresji logistycznej niedostosowanej lub dostosowanej do płci, wieku i BMI badanych (tabela 17).

Dane wskazują, że szanse na to, iż student osiągnął podczas treningu wartość tętna przewidzianego dla wysiłku submaksymalnego są niemal 3,5-krotnie (analiza niedostosowana) lub prawie 4-krotnie większe (analiza dostosowana do wieku, płci i BMI), gdy po treningu deklarował poziom zmęczenia większy niż 13 punktów w BS.

Tabela 17. Iloraz szans dla osiągnięcia $rHR_p/HR_{max} \geq 85\%$ dla studentów odczuwających zmęczenie na poziomie co najmniej 13 punktów w skali Borga – jednoczynnikowa regresja logistyczna niedostosowana i dostosowana do płci, wieku oraz BMI.

	Model niedostosowany			Model dostosowany		
	Iloraz szans	95% CI	P	Iloraz szans	95% CI	P
Skala Borga ≥ 13	3,47	2,44 – 5,45	<0,0001	3,75	2,49 – 5,66	<0,0001

Skróty: CI – przedział ufności (confidence interval);

W oparciu o wyniki tej analizy można stwierdzić, że studenci deklarujący poziom zmęczenia na poziomie ≥ 13 punktów na skali Borga (ponad połowa badanych) niemal 4-krotnie częściej osiągalili poziom tętna właściwego dla wysiłku submaksymalnego w porównaniu ze studentami, którzy odczuwali mniejsze zmęczenie.

6. Dyskusja

W przeprowadzonym badaniu zaobserwowano, że istnieje istotny związek pomiędzy subiektywną oceną nasilenia zmęczenia w trakcie ćwiczeń fizycznych a obiektywnymi wskaźnikami intensywności wykonywanego wysiłku opartymi o pomiar częstości pracy serca u młodych, zdrowych studentów Uniwersytetu Medycznego im. Karola Marcinkowskiego w Poznaniu. Studenci, którzy odczuwali większe zmęczenie w czasie wysiłku charakteryzowali się wyższymi wartościami tętna szczytowego (HR_p) oraz wskaźników rHR_p/HR_{max} i HR_{ci} , a także znacznie częściej wykonywali wysiłek na poziomie submaksymalnym.

Stwierdzono istotne różnice w wartościach HR i pochodnych na każdym etapie ćwiczeń, pomiędzy grupami studentów odczuwających różne natężenie zmęczenia. Studenci o niższym odczuwanym zmęczeniu charakteryzowali się niższymi wartościami tętna niż studenci odczuwający wyższy stopień zmęczenia. Ponadto studenci z wyższymi wartościami tętna w spoczynku i w trakcie rozgrzewki, w czasie ćwiczeń wykonywali wysiłek związany z bardziej nasilonym zmęčeniem. Sugeruje to, że na podstawie oceny spoczynkowej i rozgrzewkowej częstości pracy serca u badanych można przewidzieć poziom osiągniętego przez nich zmęczenia w trakcie wykonywania ćwiczeń fizycznych.

Dodatkowo zaobserwowano, że studenci odczuwający zmęczenie na poziomie co najmniej 13 punktów w skali Borga (wartość mniej więcej w połowie skali) charakteryzowali się prawie czterokrotnie większym prawdopodobieństwem osiągnięcia szczytowej wartości częstości pracy serca odpowiadającej co najmniej wysiłkowi submaksymalnemu. Ta zależność występowała niezależnie od płci, wieku i wartości BMI badanych.

Ocena odczuwanego zmęczenia przy pomocy skali Borga

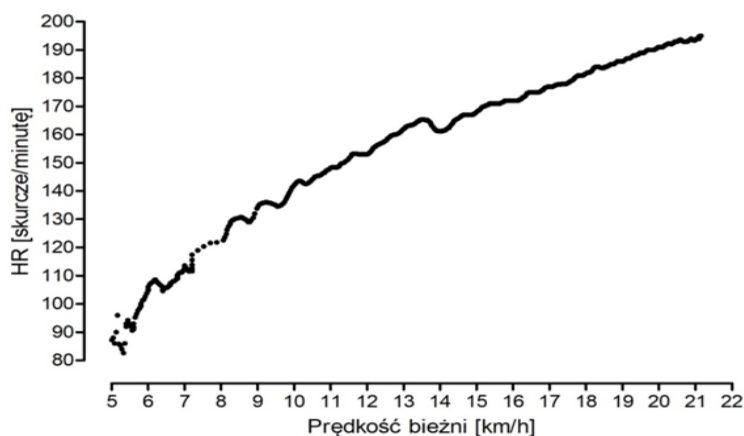
Skala Borga znalazła zastosowanie w ocenie odczuwanego zmęczenia podczas wykonywania wysiłku o różnym stopniu nasilenia – od codziennych czynności, po zaangażowanie w aktywność sportową [55,77,102-104]. Dzięki silnej zależności występującej pomiędzy wartością BS a obiektywnymi miarami intensywności wysiłku np. stężeniem mleczanu we krwi, HR czy VO_{2max} , skala Borga jest powszechnie wykorzystywana jako wskaźnik intensywności wysiłku fizycznego [75-77]. Wykorzystanie skali Borga w sporcie oraz w ćwiczeniach o charakterze prozdrowotnym

i rehabilitacyjnym u osób dorosłych i starszych wpływa korzystnie na indywidualne dostosowanie intensywności wysiłku do celów i potrzeb [105-107]. Stosowanie skali Borga zaleca się, jako subiektywną metodę wskaźnikową dotyczącą nasilenia zmęczenia ściśle związanego z intensywnością wykonanej pracy fizycznej oraz ćwiczeń (zarówno wytrzymałościowych, jak i siłowych) [55]. W przeprowadzonym badaniu średnie odczucie zmęczenia według skali Borga wśród studentów wyniosło ponad 13 punktów. Liczba studentów, którzy deklarowali zmęczenie na poziomie co najmniej 13 punktów wyniosła 338, co stanowiło prawie 60% wszystkich badanych.

Wykazano, że BS stanowi wiarygodny miernik określania intensywności wysiłku fizycznego także wśród osób otyłych i pacjentów np. ze stwardnieniem rozsianym, fibromialgią, chorobami serca, w tym stosujących leki β -adrenolityczne [75,108-112].

Wykorzystanie pomiarów częstości pracy serca w czasie wysiłku

Typową, fizjologiczną odpowiedzią węzła zatokowego na wysiłek fizyczny jest przyspieszenie pracy serca. W trakcie wykonywania ćwiczeń, częstość skurczów serca może rosnać do wartości maksymalnych. Rycina 14 przedstawia przykładowe zachowanie się HR w czasie sercowo-płucnego testu wysiłkowego do wyczerpania o liniowo narastającym obciążeniu u 25-letniego, zdrowego mężczyzny biegającego na dystansach półmaratońskich i maratońskich w okresie przygotowawczym.



Rycina 14.

Zachowanie się częstości pracy serca u zdrowego, 25-letniego biegacza w czasie sercowo-płucnego testu wysiłkowego na bieżni według protokołu o liniowo narastającej prędkości 0.1 km/h co 6 sekund (1 km/h co 1 minutę). U badanego rozgrzewka została przeprowadzona w zakresie prędkości 5-7.8 km/h w ciągu 4 minut, a obciążenia właściwe od 8 km do maksymalnej wartości 21.2 km/h. Czas trwania obciążenia wyniósł 13 minut i 15 sekund. Odczuwane zmęczenie wg BS – 9. Dane dzięki uprzejmości mgr Marcina Fehlaua z Katedry i Kliniki Intensywnej Terapii Kardiologicznej i Chorób Wewnętrznych Uniwersytetu Medycznego im. Karola Marcinkowskiego w Poznaniu.

W zrealizowanej przeze mnie pracy przedstawione wartości HR wyniosły: w spoczynku (HR_r) 71 uderz./min, po rozgrzewce (HR_{wu}) 101 uderz./min oraz w szczycie wysiłku (HR_p) 172 uderz./min.

Wartości zmierzone w czasie spoczynku mogą wydawać się nieco wyższe od przewidywanych dla młodych ludzi. Należy jednak zwrócić uwagę, że pomiary tętna spoczynkowego (HR_r) nie były wykonywane wkrótce po przebudzeniu, ani w warunkach laboratoryjnych. HR mierzono tuż przed rozgrzewką, w pozycji siedzącej, w towarzystwie innych studentów, bez ograniczenia w interakcji i komunikacji z innymi badanymi.

Ponadto w mojej pracy mierzyłem wartość HR w czasie rozgrzewki, która była realizowana w sposób zróżnicowany zależnie od nauczyciela wychowania fizycznego, jak i stopnia zaangażowania każdego studenta w wykonywanie poleceń. Podobnie było z pomiarami HR w czasie zasadniczego treningu i wysiłku o największej intensywności.

Duża heterogenność badanych (mężczyźni i kobiety, osoby szczupłe, z nadwagą i otyłością, o bardzo różnym stopniu wytrenowania) oraz różnice między prowadzącymi zajęcia i rodzajem zajęć (mniej lub bardziej intensywne) pozwalają na uogólnienie moich obserwacji do populacji młodych ludzi (w średnim wieku 21 lat) studiujących na wyższej uczelni.

Zaobserwowałem, że wartości HR w czasie rozgrzewki i tętno szczytowe związane z wysiłkiem wynosiły średnio odpowiednio 101 i 172/min i były istotnie wyższe niż wartości spoczynkowe. Co więcej, wartości HR_p były wyższe niż HR_{wu} . Zakładam więc, że każda z przebadanych osób wykonywała polecenia nauczycieli i angażowała się w zajęcia na tyle aktywnie, że w czasie rozgrzewki i wysiłku wystąpiły oczekiwane wzrosty wartości HR. Co ciekawe, u żadnego z przebadanych studentów nie zaobserwowałem niefizjologicznego i nielogicznego spadku wartości HR_{wu} poniżej wartości spoczynkowych, a HR_p poniżej wartości HR_{wu} (dane nieprzedstawione w części Wyniki).

Wzajemne związki pomiędzy pomiarami HR w trakcie wysiłku a odczuwanym zmęczeniem

Skala Borga charakteryzuje się dodatnią korelacją punktową względem parametrów intensywności wysiłku fizycznego takich jak: HR, VO_{2max} i LA. Ta zależność zachodzi bez względu na płeć, wiek, masę ciała, stan zdrowia i sprawność krążeniowo-oddechową [113,114].

Według założeń Borga, po pomnożeniu wyniku w BS przez dziesięć, uzyskujemy przybliżone wartości tętna w trakcie ćwiczeń, ale u osób młodych. Wzrost wartości HR

w czasie wysiłku koreluje ze wzrostem liczby punktów zaraportowanych w skali Borga przez ćwiczących [60].

Wiarygodność tej metody potwierdziły liczne badania wysiłku [7,115], m. in. u dzieci, gdzie współczynnik korelacji liniowej r między 10-punktową skalą RPE a wartościami tętna sięgał 0,52 przy $p < 0,05$ dla chłopców w wieku 14-15 lat i aż 0,87 dla dziewczynek w tym samym wieku [116]. Zależność ta potwierdziła się także w badaniu Scherr i wsp. [117], w którym po przebadaniu 2560 osób (17 do 44 lat) uczestniczących w przyrostowych testach wysiłkowych na bieżni i ergometrach rowerowych stwierdzono wartość współczynnika $r = 0,74$; $p < 0,01$. Podobne wnioski przedstawili Zinoubi i wsp. na podstawie wyników badania przeprowadzonego na 11 studentach wychowania fizycznego poddanych próbom wysiłkowym na ergometrze rowerowym o charakterze ciągłym i interwałowym. Dodatni związek pomiędzy wartością tętna a intensywnością wysiłku raportowaną w skali Borga był silny ($r \geq 0,7$; $p < 0,001$), bez względu na długość wysiłku, rodzaj ćwiczeń (interwał/ciągłe) i obciążenie treningowe [118]. Wyniki mojego badania również potwierdzają dodatnią korelację między wynikiem w skali Borga a mierzonymi wartościami tętna (w przypadku HR_p : $r = 0,45$; $p < 0,0001$).

Przewidywanie odczuwanego zmęczenia na podstawie pomiarów częstości pracy serca w czasie spoczynku i rozgrzewki

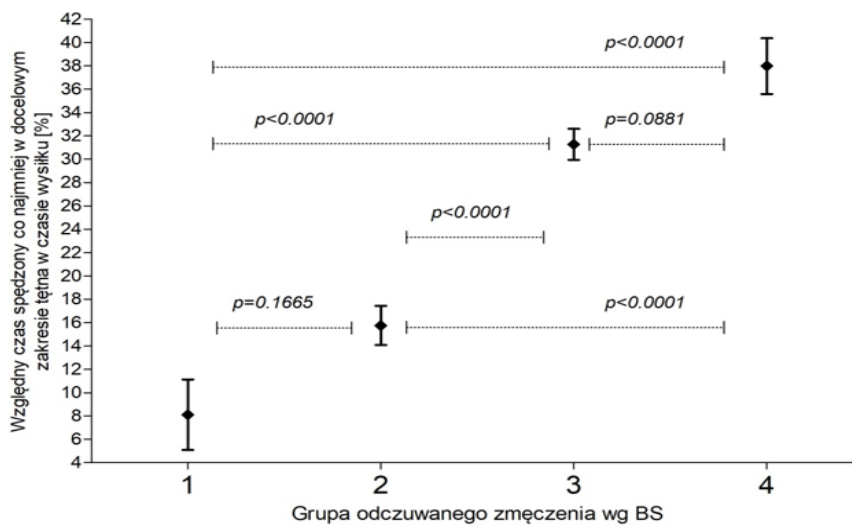
Badając wartości HR_r i HR_{wu} zaobserwowano istotne zależności pomiędzy uzyskanymi wynikami a odczuwanym w czasie wysiłku zmęczeniem w BS.

Studenci, którzy w spoczynku przed ćwiczeniami i w czasie rozgrzewki osiągalili wyższe wartości HR, w czasie późniejszego wysiłku odczuwali większe zmęczenie, a osoby z niższymi wartościami HR_r i HR_{wu} zgłaszały mniejsze zmęczenie.

Obserwację tę można interpretować na co najmniej dwa różne sposoby:

1. Pierwsza proponowana interpretacja jest taka, że studenci z wyższym tętnem spoczynkowym lub w czasie rozgrzewki byli w gorszej dyspozycji i z tego powodu odczuwali większe zmęczenie w czasie zadanego wysiłku.
2. Druga proponowana interpretacja jest odmienna – otóż osoby z wyższym HR w spoczynku i w czasie rozgrzewki znacznie bardziej angażowały się w ćwiczenia i wykonywały je intensywniej, akceptując tym samym większe zmęczenie.

Pośrednim potwierdzeniem tej drugiej interpretacji jest istotna, ujemna korelacja pomiędzy względnym czasem spędzonym przez studentów w co najmniej docelowym zakresie tętna w czasie całego wysiłku a odczuwanym zmęczeniem według BS (korelacja Spearmana $\rho=(-0,45)$; $p<0,0001$; dane nieprezentowane w części Wyniki), a także bezpośrednie porównanie tego czasu pomiędzy grupami odczuwanego zmęczenia (rycina 15). Wyniki analizy ANCOVA dostosowanej do wieku, płci i BMI badanych wyraźnie wskazują, że studenci, którzy w ciągu zajęć odczuwali mniejsze zmęczenie (grupy 1 i 2) spędzili istotnie mniej czasu w docelowym lub wyższym zakresie tętna w porównaniu z tymi, którzy zmęczyli się bardziej (grupy 3 i 4).



Rycina 15.

Wartości szacowanych średnich brzegowych (EMM) i błędu standardowego (SE) dla względnego czasu spędzonego co najmniej w strefie docelowej w trakcie wysiłku dla grup studentów według odczuwanego zmęczenia w czasie treningu. Podział na grupy według BS taki sam, jak w pozostałej części pracy.

Dla porównania, szacowana średnia brzegowa tego czasu dla studentów z grupy 1. wynosiła około 8%, a w grupie 4 prawie 38%. Innymi słowy, studenci, którzy w trakcie zajęć krócej wykonywali wysiłek w docelowym lub wyższym tętnie byli mniej zmęczeni od tych, którzy angażowali się dłużej. Ten pozornie oczywisty fakt uprawdopodobnia właśnie drugą interpretację, tj. że niższe tętno spoczynkowe przed zajęciami lub w czasie rozgrzewki jest częściej spotykane u osób, które zmęczą się mniej w czasie zajęć, a co wydaje się wynikać z ich słabszego zaangażowania w wykonywane ćwiczenia.

Ponieważ tętno spoczynkowe i rozgrzewkowe było zmierzone przed właściwym wysiłkiem, a ich wartości są istotnie związane z wartością BS, sugeruje to, że przy pomocy HR_f i HR_{wu} można przewidzieć stopień zmęczenia. Jaki jest mechanizm tego zjawiska trudno jednoznacznie odpowiedzieć. Być może wynika to z nastawienia

studentów, którzy już przed zajęciami planują większe lub mniejsze zaangażowanie w ćwiczenia. Niemniej obserwacja ta jest zaskakująca, bowiem od lat wiadomo, że sportowcy będący w dobrej formie, w okresie startowym mają nie tylko niższe tętno spoczynkowe, ale tętno na każdym etapie wysiłku, w tym w jego szczycie [52,119-124].

Ponieważ w przeprowadzonej pracy nie kontrolowałem wszystkich możliwych czynników, jest także prawdopodobne, że za te obserwacje odpowiedzialne są oba zjawiska u różnych studentów.

W dostępnym piśmiennictwie nie udało się znaleźć podobnych obserwacji innych autorów, które dotyczyłyby ewentualnego przewidywania zmęczenia w BS na podstawie najwyższych wartości pracy serca w spoczynku i w trakcie rozgrzewki w dużych grupach studentów realizujących zajęcia z wychowania fizycznego. Jednak istnieją obserwacje i doniesienia opisujące zachowanie się tętna przed startem lub zdarzeniem, które jest ważne dla osoby badanej.

W sporcie wyczynowym występuje zjawisko podwyższonej częstości spoczynkowej pracy serca, które określa się mianem „gotowości przedstartowej” [125]. Tętno spoczynkowe jest wyższe w dniu startu rywalizacji niż w inne dni. Mendes i Park tłumaczą zjawisko zwiększonej mobilizacji przedstartowej poprawą dostępności maksymalnych zasobów fizjologicznych w momencie startu zawodów [126]. Co ciekawe, podobne zależności zaobserwowali Behnke i wsp., badając mężczyzn uprawiających e-sport w pozycji siedzącej [127]. E-sport to forma rywalizacji wykorzystującej gry komputerowe rozgrywane na turniejach i regularnych ligach zawodowych (np. Electronic Sports League i Intel Extreme Masters). Lepsi gracze w oczekiwaniu na rozpoczęcie gry mieli wyższe wartości tętna niż gracze słabsi. Znane jest również odruchowe przyspieszenie pracy serca w trakcie oczekiwania na egzamin, przed publicznym wystąpieniem lub podjęciem ważnej decyzji [119,121,123,125]. Zjawisko podwyższonej wartości HR przed rozpoczęciem działań potwierdzają również obserwacje Abel i wsp., którzy badali osoby uprawiające pływanie i jazdę na rowerze [128].

Podwyższona wartość tętna może wskazywać też na wcześniejszą fizjologiczną mobilizację organizmu wywołaną rozszerzeniem naczyń krwionośnych i zwiększonym przepływem krwi, np. w mózgu i mięśniach (palców u graczy uprawiających e-sport lub innych grup mięśniowych, np. u pływaków) [129]. Jak wskazują Behnke i wsp., spoczynkowa odpowiedź pracy serca na oczekiwane zdarzenie – wysiłek mentalny lub sportowy – może być związana ze specyfiką danej aktywności sportowej [130].

Wyzwanie generuje odpowiedź sercowo-naczyniową, która przeważnie podnosi efektywność wykonywanego zadania [129]. Szczegółowa metaanaliza danych potwierdza także, że zwiększona gotowość fizjologiczna prognozuje udaną aktywność fizyczną.

Wracając do pracy Behnke i wsp., autorzy ci wskazują, że wyższe tętno spoczynkowe przed zaplanowanym działaniem ma mieć związek z motywacją, fizjologicznym pobudzeniem organizmu do działania oraz gotowością przedstartową do spodziewanego zadania [127]. Taki wniosek wskazuje na osiągnięcie wysokiego zaangażowania fizjologicznego już przed właściwym wysiłkiem i w trakcie jego trwania. Uważam, że wyższa wartość częstości pracy serca w spoczynku w przebadanej przeze mnie grupie odzwierciedla pozytywne oczekiwanie i nastawienie do zbliżającej się aktywności fizycznej w czasie ćwiczeń, które są wykonywane rutynowo, tj. kolejny raz w ramach regularnych zajęć z wychowania fizycznego [131]. O utrzymującym się poziomie motywacji do działania świadczy również fakt, że osoby, które miały wyższe tętno w spoczynku przed ćwiczeniami, również osiągały wyższe wartości HR w czasie rozgrzewki, a następnie w trakcie zasadniczych ćwiczeń. Prawdopodobnie przebadani przeze mnie studenci, którzy postrzegali planowaną dla nich aktywność fizyczną w charakterze wyzwania mieli wyższą wartość HR_r , a także HR_{wu} . Z kolei osoby, które bez entuzjazmu podchodzą do wysiłku charakteryzowały się niższą wartością HR_r i HR_{wu} .

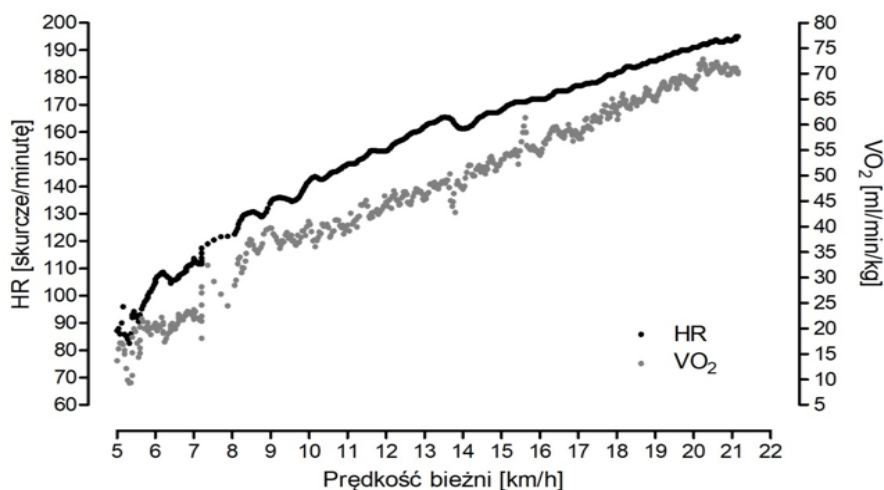
Choć zjawisko gotowości przedstartowej jest zasadniczo znane to wydaje się, że dotychczas nie zostało wykorzystane do przewidywania zaangażowania w wykonywane ćwiczenia, przynajmniej w tak heterogennej grupie młodych osób jakimi są studenci różnych kierunków tej samej Uczelni. Z tego powodu wydaje się, że możliwość predykcji stopnia zmęczenia w czasie wysiłku na podstawie wcześniejszych pomiarów tętna w spoczynku i podczas rozgrzewki mogą być elementami nowatorskimi tej pracy.

Prawdopodobieństwo osiągnięcia submaksymalnej intensywności wysiłku w oparciu o subiektywną ocenę zmęczenia

Jak już wspomniano, znane są związki pomiędzy nasileniem wysiłku odzwierciedlonym w formie odczuwanego zmęczenia a odruchową i adaptacyjną odpowiedzią układu krążenia. Określone wartości w BS mają swoje odzwierciedlenie w zachowaniu się częstości pracy serca, w tym HR_p .

Analizując problem wzajemnej zależności między skalą Borga a częstotliwością pracy serca należy również przypomnieć, że BS jest narzędziem wysoce subiektywnym przedstawianym w formie dyskretnych wartości między 6 a 20 (lub 0-10). Z kolei pomiar częstotliwości pracy serca jest bardzo obiektywnym narzędziem, a uzyskiwane wartości mają charakter ciągły.

Choć istnieją znacznie lepsze wskaźniki intensywności wysiłku, np. pomiar stężenia mleczanów we krwi lub chwilowego zużycia (pobierania) tlenu (VO_2), to jednak ich ocena jest bardziej złożona, wymaga dodatkowych urządzeń laboratoryjnych i/lub wykonania czasochłonnych procedur. Do pomiaru stężenia mleczanów należy od badanego pobrać niewielką ilość krwi włosniczkowej, żyłnej lub tętniczej, a następnie metodami biochemicznymi oznaczyć zawartość tej substancji w próbce. Z kolei do oceny VO_2 , w tym wartości szczytowych lub maksymalnych VO_2 , wymagany jest bardzo drogi sprzęt mierzący przepływ powietrza i ciśnienie parcjale O_2 oraz CO_2 w powietrzu wdychanym i wydychanym. Okazuje się jednak, że znacznym wzrostem stężenia mleczanów lub zużycia tlenu przez mięśnie w czasie wysiłku u osób zdrowych zawsze towarzyszy wzrost częstotliwości pracy serca. Na rycinie 16 przedstawiono jednocześnie rejestrowane zmiany HR i VO_2 u 25-letniego biegacza w czasie sercowo-płucnego testu wysiłkowego na bieżni według protokołu ramp [40].



Rycina 16.

Pomiar częstotliwości pracy serca (HR – czarne punkty) i zużycia tlenu (VO_2 – ciemnoszare punkty) u zdrowego, 25-letniego biegacza w czasie sercowo-płucnego testu wysiłkowego na bieżni według protokołu ramp. Dane dzięki uprzejmości mgr Marcina Fehlaua z Katedry i Kliniki Intensywnej Terapii Kardiologicznej i Chorób Wewnętrznych Uniwersytetu Medycznego im. Karola Marcinkowskiego w Poznaniu.

W wielu przypadkach okazuje się więc, że pomiar chwilowej wartości HR jest w zupełności wystarczający do monitorowania odpowiedzi serca na wysiłek o różnej intensywności. Korzystając z pomiarów HR umownie przyjęto, że wysiłek w czasie którego chwilowa wartość HR osiąga co najmniej 85% przewidywanej wartości maksymalnej częstości pracy serca jest tzw. wysiłkiem submaksymalnym. Osiągnięcie HR na takim poziomie jest jednym z ważnych celów treningu sportowego. W przebadanej grupie ponad połowa (54,7%) uzyskała właśnie taką wartość. Zaobserwowałem istotny, rosnący trend częstości osiągnięcia submaksymalnego obciążenia wysiłkiem w analizowanych podgrupach od około 20% w grupie z najmniej odczuwanym zmęczeniem (BS do 8) do niemal 80% w grupie z najsilniej odczuwanym zmęczeniem (BS $\geq$ 17).

Pomiary tętna nie zawsze są możliwe do przeprowadzenia w czasie zajęć z wychowania fizycznego (np. z powodu dużej liczebności grup studenckich i ograniczonej liczby urządzeń mierzących HR). Z tego powodu zadałem sobie pytanie, czy można na podstawie oceny zmęczenia przy pomocy BS oszacować prawdopodobieństwo, że student wykonał wysiłek o submaksymalnej intensywności. Przy pomocy analizy ROC oraz określenia maksymalnej wartości produktu czułości i specyficzności ustalono optymalny punkt odcięcia na poziomie przynajmniej 13 punktów według BS dla wystąpienia submaksymalnego zmęczenia w trakcie ćwiczeń. Z wykorzystaniem jednoczynnikowej regresji logistycznej dostosowanej do wieku, płci i BMI badanych potwierdzono, że odczuwanie zmęczenia na poziomie co najmniej 13 według BS jest związane z niemal 4-krotnie większym prawdopodobieństwem osiągnięcia przez badanych wysiłku o submaksymalnym natężeniu. Z perspektywy nauczyciela prowadzącego zajęcia aktywności fizycznej uważam, że daje to ogromne dodatkowe możliwości oszacowania zaangażowania studenta w wykonywane ćwiczenia [117].

Ograniczenia badania

1. Zastosowano piętnastopunktową skalę Borga (BS) do oceny odczuwanego zmęczenia. Skala ta jest powszechnie stosowana w medycynie i sporcie ze względu na jej dostępność i łatwość w użyciu. Wyniki przeprowadzonego badania wskazują, że około 10% studentów raportowało w trakcie zajęć odczucie zmęczenia (związane z wykonanym wysiłkiem fizycznym) na bardzo niskim poziomie do 8 punktów BS. Nie można wykluczyć, że mogło wynikać to z błędnej interpretacji odczuwanego zmęczenia, pomimo dokładnie udzielonej instrukcji dotyczącej raportowania wysiłku. Jest to jednak

problem opisywany na całym świecie w różnych badaniach, a jak wynika z przedstawionych danych – dotyczy mniejszości przebadanych osób.

2. Grupę badawczą w mojej pracy stanowili zdrowi studenci w średnim wieku 21 lat. Badani byli zróżnicowani nie tylko pod względem form uprawianej aktywności (zajęcia z wychowania fizycznego, sekcje i fakultety sportowe i przedmioty zawodowe), ale również pod względem sprawności fizycznej. Ze względu na młody wiek badanych, uzyskane wyniki mogą znaleźć praktyczne zastosowanie wyłącznie w odniesieniu do osób w podobnym wieku. Ekstrapolacja tych wyników na osoby starsze lub dzieci może doprowadzić do błędnych wniosków. Również zastosowanie moich obserwacji w grupach chorych, np. z nadciśnieniem tętniczym, cukrzycą i po zawale serca może być obarczone błędem. Niemniej należy podkreślić, że przebadana przeze mnie grupa ponad 500 studentów reprezentuje przekrojowo populację młodych ludzi uczących się w wyższych uczelniach – przedstawione wyniki mogą zatem stanowić bazę referencyjną dla podobnych badań przeprowadzonych w innych szkołach wyższych.

3. Do oceny częstości pracy serca zastosowano pulsometr z pasem piersiowym, którego technologia opiera się na pomiarze aktywności elektrycznej serca. Technologia ta jest zbliżona do elektrokardiografii. Pulsometry nakłatkowe nie rejestrują jednak całej morfologii krzywej EKG, tj. załamka P, zespołu QRS, załamka T i fali U, a mierzą jedynie odstępy pomiędzy zespólami QRS bez ich wizualizacji. Należy podkreślić, że taka technologia jest powszechnie stosowana w badaniach fizjologicznych, klinicznych i sportowych. Co więcej, jej dokładność i wiarygodność dotycząca pomiarów chwilowej częstości pracy serca w spoczynku i w czasie wysiłku o różnym natężeniu jest praktycznie taka sama jak przy zastosowaniu EKG. Inne, coraz częściej stosowane podejście oparte na pomiarze fali tętna przy pomocy fotopletyzmografii nie jest tak wiarygodne, a dokładność pomiarów w porównaniu z EKG maleje wraz ze wzrostem częstości pracy serca i intensywności wysiłku [132]. Kolejnym istotnym aspektem w zastosowaniu pulsometru nakłatkowego jest wygoda w jego stosowaniu oraz prostota w obsłudze. Dodatkowo, zdaniem badanych użycie pasa piersiowego nie ograniczało im ruchów w ćwiczeniach, a także nie prowadziło do obniżenia ich komfortu.

Kończąc opis ograniczeń, należy wyjaśnić wykorzystywane w badaniu pojęcie tętna spoczynkowego. Zwyczajowo, tętno spoczynkowe powinno być mierzone po przebudzeniu lub po długim okresie odpoczynku. Jednakże w wielu pracach stosuje się

także inny schemat pomiaru tego parametru, np. przed wykonaniem wysiłku fizycznego lub przed startem w zawodach sportowych. Podchodząc praktycznie do realizacji całego projektu zastosowano to drugie podejście. Przekonał mnie do tego także fakt, że wykonanie samodzielnego pomiaru przez studentów w warunkach domowych metodą palpacyjną mogłoby prowadzić do błędów w odczycie i zaburzać prawidłowość wyników. Również z uwagi na ograniczoną liczbę pulsometrów nie zdecydowano się na wydanie ich studentom do domu (co z resztą również nie gwarantowałoby wiarygodności przeprowadzonego badania ze względu na brak możliwości kontroli nad warunkami pomiaru). Podsumowując, tętno spoczynkowe w przeprowadzonym badaniu zostało zmierzone przed rozgrzewką, po trzuminutowym odpoczynku w pozycji siedzącej.

Monitorowanie aktywności fizycznej i intensywności wysiłku fizycznego można aktualnie prowadzić na wiele sposobów. Rośnie liczba czujników, biopatchy przyklejanych na skórę, inteligentnych koszulek, kamizelek, opasek i zegarków sportowych [41]. O ile nawet proste urządzenia mierzące tętno kosztują od kilkudziesięciu do kilkuset złotych, o tyle pytanie o stopień zmęczenia nie kosztuje nic i dostarcza bardzo ważnej informacji, która w świetle wyników niniejszej pracy pozwala na monitorowanie intensywności wysiłku i postępów w złożonym procesie treningowym.

Ocena chwilowej częstości pracy serca i pytanie o odczuwane zmęczenie są wyjątkowo nieskomplikowane, całkowicie bezinwazyjne i w praktyce mogą być stosowane podczas zajęć o dowolnym charakterze z różnymi grupami ćwiczących.

Dzięki takiemu podejściu trenerzy, nauczyciele oraz ćwiczący mogą szybko i z dużym prawdopodobieństwem poprawności określić czy intensywność ćwiczeń miała charakter wysiłku submaksymalnego czy nie, tj. na poziomie około 85% HR_{max} .

Z tego powodu śmiało można stwierdzić, że skala Borga jest efektywną metodą oceny intensywności wysiłku fizycznego, którą należy stosować na zajęciach prowadzonych w Studium Wychowania Fizycznego i Sportu UMP. Co więcej, wyniki uzyskane w tym badaniu, skonfrontowane z aktualnym stanem wiedzy pozwalają sądzić, iż skala Borga może stanowić uniwersalne narzędzie oceny wysiłku fizycznego.

7. Wnioski

Na podstawie wykonanych pomiarów i analiz wyciągam następujące wnioski:

1. Subiektywne odczucie zmęczenia według skali Borga istotnie koreluje ze szczytową wartością pracy serca. Skala ta stanowi trafny i wiarygodny sposób oceny intensywności wysiłku fizycznego u studentów biorących udział w zajęciach prowadzonych w Studium Wychowania Fizycznego i Sportu UMP.
2. Istnieją istotne różnice w zachowaniu się częstości pracy serca i parametrów pochodnych w czasie spoczynku, rozgrzewki oraz właściwej fazy ćwiczeń między studentami odczuwającymi wysiłkowe zmęczenie o różnym nasileniu według skali Borga.
3. Spoczynkowa i rozgrzewkowa wartość pracy serca pozwala przewidzieć nasilenie odczuwanego zmęczenia według BS w czasie ćwiczeń fizycznych.
4. Uczucie zmęczenia związanego z wykonywanymi ćwiczeniami na poziomie co najmniej 13 punktów według BS jest związane z około 4-krotnie większym prawdopodobieństwem osiągnięcia co najmniej submaksymalnego wysiłku niezależnie od wieku, płci i BMI ćwiczących studentów.

Zdaję sobie sprawę, że zaproponowane związki i modele predykcyjne dla zależności odczuwanego zmęczenia z tętnem spoczynkowym lub osiągnięciem co najmniej submaksymalnego zmęczenia zostały opracowane na jednej, licznej grupie studentów. Celem walidacji przedstawionych wyników zasadne byłoby wykonanie podobnych badań w innych uczelniach.

8. Streszczenie

W praktyce trenerskiej ważne jest indywidualne podejście do osoby ćwiczącej. Podejście takie powinno opierać się m.in. na wizualnej analizie zachowania i zaangażowania każdego uczestnika zajęć w wykonywane polecenia. Równie ważne jest oszacowanie, czy ćwiczące osoby osiągają minimalną oczekiwaną intensywność wysiłku, która pozwoli odnieść jak najwięcej korzyści z treningu.

W celu monitorowania intensywności wysiłku można skorzystać z subiektywnej oceny zmęczenia osoby ćwiczącej, ale także z obiektywnych pomiarów częstości pracy serca, która to rośnie proporcjonalnie do obciążenia.

Badanie miało na celu:

- oszacowanie związków między subiektywnym odczuciem zmęczenia zmierzonym przy pomocy skali Borga a obiektywnymi wskaźnikami opartymi o pomiary częstości pracy serca w czasie wysiłku związanego z wykonywaniem ćwiczeń fizycznych przez studentów;
- porównanie wartości częstości pracy serca i wskaźników pochodnych między grupami studentów o różnym nasileniu zmęczenia według skali Borga w trakcie wykonywanych ćwiczeń fizycznych;
- określenie wartości predykcyjnej tętna spoczynkowego i rozgrzewkowego dla stopnia odczuwanego zmęczenia według skali Borga w trakcie wykonywanych przez studentów ćwiczeń fizycznych;
- ocenę przydatności subiektywnej skali Borga w identyfikacji osiągnięcia wysiłku o co najmniej submaksymalnej intensywności w trakcie wykonywanych przez studentów ćwiczeń fizycznych.

W badaniu wzięło udział 565 zdrowych studentów uczestniczących w różnych formach zajęć z wychowania fizycznego w Studium Wychowania Fizycznego i Sportu Uniwersytetu Medycznego im. K. Marcinkowskiego w Poznaniu. Do badania włączono wyłącznie studentów, którzy wyrazili dobrowolną zgodę na udział. U wszystkich badanych zmierzono wzrost i ciężar ciała oraz obliczono wskaźnik masy ciała (BMI). Przed rozpoczęciem zajęć studentom założono naklatkowy pas do monitorowania częstości pracy serca (HR), który w czasie rzeczywistym wysyłał pomiary do zegarka Polar RS 100TM (Polar, Finlandia). U badanych oceniano spoczynkową częstość pracy serca (HR_r), po rozgrzewce (HR_{wu}) oraz wartość szczytową w trakcie zasadniczej części treningu (HR_p). Wyliczano również parametry pochodne takie jak zmiana między HR_r a

HR_{wu} (dHR_{r-wu}), zmiana między HR_{wu} a HR_p (dHR_{wu-p}), zmiana między HR_r a HR_p (dHR_{r-p}), przewidywana dla wieku maksymalna wartość HR (eHR_{max}), wskaźnik odpowiedzi chronotropowej serca na wysiłek (HR_{ci}) oraz stosunek HR_p do eHR_{max} (rHR_p/HR_{max}). Po zajęciach studenci oceniali intensywność wysiłku fizycznego w 15-punktowej skali Borga (zakres wartości 6-20).

W analizie statystycznej wzajemnych zależności między stopniem zmęczenia a HR mierzoną na różnych etapach ćwiczeń i parametrami pochodnymi wykorzystano parametryczną korelację Pearsona. Tę samą korelację wykorzystano w ocenie predykcji nasilenia zmęczenia w czasie wysiłku przy pomocy HR_r i HR_{wu} . Porównano także między sobą wartości HR_r , HR_{wu} , HR_p i wskaźników pochodnych między 4 grupami studentów, którzy odczuwali w czasie zajęć zmęczenie od niskiego (G1), poprzez średnie (G2), duże (G3) do bardzo dużego (G4) przy pomocy analizy kowariancji z odpowiednimi testami post-hoc, dostosowaną do płci, wieku i BMI. Po wyznaczeniu wartości odcinającej odczuwanego zmęczenia według skali Borga dla przewidywania wystąpienie wysiłku na co najmniej submaksymalnym poziomie, korzystając z regresji logistycznej dostosowanej do płci, wieku i BMI wyznaczono iloraz szans (ang. *odds ratio*; OR) z 95% przedziałem ufności (ang. *confidence interval*; CI) dla tej zależności.

We wszystkich analizach za istotne statystycznie różnice lub związki uznano wyłącznie te, dla których stwierdzono $p < 0,05$. Wyniki badania poddano analizie statystycznej z wykorzystaniem MedCalc Statistical Software version 19.1 (MedCalc Software by Ostend, Belgium; 2019).

Wśród badanych było 428 kobiet (75,8% całej grupy). Średni wiek studentów wynosił 21 lat, a BMI $21,4 \text{ kg/m}^2$. Zaobserwowano istotne związki między niemal wszystkimi (z wyjątkiem eHR_{max}) zmierzonymi i pochodnymi HR parametrami a odczuwanym zmęčeniem wg Borga. Wspomniane korelacje były dodatnie, w zakresie wartości współczynnika r od 0,19 (dla HR_r) do 0,46 (dla rHR_p/HR_{max}). Istnienie istotnych korelacji między HR_r oraz HR_{wu} a BS potwierdziło wartość predycyjną spoczynkowego i rozgrzewkowego tętna dla odczuwanego zmęczenia w czasie wysiłku. Jednocześnie zauważono istotne różnice w wartościach zmierzonego HR i parametrów pochodnych między grupami studentów o różnym stopniu zmęczenia. Ogólnie, studenci z grup o wyższym stopniu zmęczenia charakteryzowali się istotnie wyższymi wartościami wszystkich parametrów określających zachowanie się HR na każdym etapie wysiłku.

Wyznaczono, że punktem odcięcia odczuwanego zmęczenia, który najlepiej przewiduje pojawienie się co najmniej submaksymalnego wysiłku jest wartość co

najmniej 13 wg Borga, tj. około połowa zakresu tej skali. Iloraz szans dla BS 13 dla osiągnięcia rHR_p/HR_{max} co najmniej na poziomie 85% w modelu dostosowanym do płci, wieku i BMI wyniósł 3,75 (95% CI: 2,49 – 5,66; $p < 0,0001$).

Na podstawie przeprowadzonych badań potwierdzono istotny związek między HR mierzonym w czasie wysiłku a odczuwanym zmęczeniem. Ponadto stwierdzono, że studenci, którzy odczuwają większe zmęczenie w czasie ćwiczeń osiągają wyższe wartości mierzonego HR zarówno w spoczynku, w czasie rozgrzewki, jak i w czasie właściwej fazy ćwiczeń. Jednocześnie zaobserwowano, że HR mierzone przed ćwiczeniami i w czasie rozgrzewki ma wartość predykcyjną dla odczuwanego zmęczenia w czasie wysiłku – studenci z wyższymi wartościami HR_r i HR_{wu} w czasie ćwiczeń osiągają wyższy poziom zmęczenia. Poza tym wystąpienie zmęczenia na poziomie przynajmniej 13 wg skali Borga jest związane z niemal 4-krotnie większym prawdopodobieństwem osiągnięcia co najmniej submaksymalnego wysiłku niezależnie od wieku, płci i BMI ćwiczących studentów.

Przeprowadzone badanie potwierdza, że subiektywna ocena zmęczenia jest nie tylko przydatnym narzędziem do oceny intensywności wysiłku, ale także do przewidywania osiągnięcia wysiłku na co najmniej submaksymalnym poziomie intensywności. Jednak wartość predykcyjna uzyskanych obserwacji powinna być zweryfikowana w niezależnych badaniach prospektywnych w podobnej grupie młodych osób.

9. Summary

An individual approach to an exercising person is fundamental in the daily practice of each coach or trainer. Such an approach should be based, among other things, on a visual analysis of the behaviour and commitment of each participant to carried out instructions. It is equally important to assess whether an exerciser achieves the minimum expected intensity of effort which enables benefiting from each training session.

To monitor effort intensity, both subjective and objective measures can be applied. The assessment of perceived exertion is commonly employed as a subjective sensation of effort intensity. On the other hand, such intensity can be quantified by monitoring changes in heart rate, which accelerates in response to an increasing exercise load.

The study aims were:

- to estimate the relationship between subjectively perceived exertion using the Borg scale and objective parameters based on heart rate measurements recorded during physical exercise by students attending training sessions;
- to compare the values of heart rate and its derivatives between groups of students with different levels of perceived exertion according to the Borg scale during physical exercises;
- to determine the association between heart rate acquired at rest and warm-up with the severity of perceived exertion according to the Borg scale during physical activity;
- to assess the predictive value of the Borg scale in the identification of exercise intensity corresponding to the level of at least submaximal effort.

The study involved 565 healthy students participating in various forms of physical education classes at the Department of Physical Education and Sport at the Poznan University of Medical Sciences in Poznan. Only those students who voluntarily agreed to participate were included in the study. Height, body weight, and body mass index (BMI) were measured in all subjects. Before the classes, students were put on a chest strap heart rate (HR) monitor transferring the signal to the Polar RS 100TM sports watch (Polar, Finland) in real-time. The resting heart rate (HR_r), warm-up (HR_{wu}) and peak training (HR_p) HR were recorded in each student. Derivative parameters such as the differences between HR_r and HR_{wu} (dHR_{r-wu}), HR_{wu} and HR_p (dHR_{wu-p}), and HR_r and HR_p (dHR_{r-p}), as well as the estimated maximum HR for age (eHR_{max}), chronotropic index (HR_{ci}), and the HR_p to eHR_{max} ratio (rHR_p/HR_{max}) were also calculated. After the training session,

students rated the intensity of perceived exertion on the 15-point Borg scale (range of values 6-20).

The statistical analysis of the relationship between the severity of perceived exertion and HR with its derived parameters measured at various stages of the exercise used the parametric Pearson correlation. The same correlation was applied to predict perceived exertion by means of the values of HR_r and HR_{wu} . The values of HR_r , HR_{wu} , HR_p and their derivative parameters were compared between four groups of students with perceived exertion from a low (G1), medium (G2), high (G3) to very high (G4) level by means of the Analysis of Covariance with post-hoc tests adjusted to gender, age and BMI. After determining the best-fitted cut-off value of the Borg scale for exercise intensity corresponding to the submaximal effort, logistic regression adjusted to gender, age and BMI was used to compute an odds ratio (OR) with a 95% confidence interval (CI) for this relationship. Only the results with $p < 0.05$ were considered statistically significant. Statistical analyses were made using MedCalc Statistical Software version 19.1 (MedCalc Software by Ostend, Belgium; 2019).

Among the studied participants, there were 428 women (75.8% of the whole group). The average age of students was about 21 years and BMI 21.4 kg/m². Significant relationships were observed between almost all measured and derivative HR parameters, except for eHR_{max} , and perceived exertion according to the Borg scale. These correlations were positive, with a value of r coefficient ranging from 0.19 (for HR_r) to 0.46 (for rHR_p/HR_{max}). The significant relationships between HR_r and HR_{wu} and BS confirmed the predictive value of resting and warm-up HR for perceived exertion. At the same time, significant differences were noted in the measured HR values and derived parameters between groups of students with a various degree of perceived exertion. In general, students from groups with higher perceived exertion were characterised by significantly higher values of all parameters determining HR behaviour at each stage of the training session. The cut-off value for perceived exertion which best predicted the presence of at least submaximal effort was at least 13 and corresponded to nearly the middle value of the Borg scale. The odds ratio for BS 13 to achieve rHR_p/HR_{max} at a level of at least 85% in the model adjusted to gender, age and BMI was 3.75 (95% CI: 2.49 - 5.66; $p < 0.0001$).

This study confirmed a significant association between HR measured during exercise and reported exertion. Besides, students who experienced stronger perceived exertion during training had higher HR at rest, during warm-up, and the exercise phase. HR measured before exercise and during warm-up has a predictive value for perceived

exertion – students with higher HR_r and HR_{wu} during training felt more tired than other individuals. The occurrence of fatigue at the level of 13 according to the Borg scale is associated with a nearly 4-fold higher probability of achieving at least submaximal effort regardless of age, gender and BMI of the students.

In summary, this study confirms that subjectively perceived exertion is not only a useful tool to assess effort intensity, but it may also predict the occurrence of exercise intensity at least at the level of submaximal exercise. However, the predictive value of these observations should be verified in an independent prospective study in a similar group of young people.

10. Piśmiennictwo

1. Macera CA, Hootman JM, Sniezek JE. Major public health benefits of physical activity. *Arthritis Rheum.* 2003;49:122.
2. Physical Activity and Health: A Report of the Surgeon General. Centers for Disease Control and Prevention. Dostęp: <https://www.cdc.gov/nccdphp/sgr/index.htm>; sprawdzono 20.10.2019.
3. Warburton DER, Bredin SSD. Health benefits of physical activity: a systematic review of current systematic reviews. *Curr Opin Cardiol.* 2017;32:541.
4. Warburton DER, Bredin SSD. Reflections on Physical Activity and Health: What Should We Recommend?. *Can J Cardiol.* 2016;32:495.
5. Warburton DER, Bredin SSD, Jamnik VK, Shephard RJ, Gledhill N. Consensus on Evidence-Based Preparticipation Screening and Risk Stratification. *Annul Rev Gerontol Geriatr.* 2016;36:53.
6. Warburton DER, Charlesworth S, Ivey A, Nettlefold L, Bredin SSD. A systematic review of the evidence for Canada's Physical Activity Guidelines for Adults. *Int J Behav Nutr Phys Act.* 2010;7:39.
7. Paterson DH, Warburton DER. Physical activity and functional limitations in older adults: a systematic review related to Canada's Physical Activity Guidelines. *Int J Behav Nutr Phys Act.* 2010;7:38.
8. Wytyczne UE dotyczące aktywności fizycznej. Dostęp: https://erasmusplus.org.pl/wp-content/uploads/2014/01/Wytyczne_UE_dot_aktywnosci_fizycznej.pdf; sprawdzono 01.12.2019.
9. Jaskólski Artur, Jaskólska Anna. *Podstawy Fizjologii Wysiłku Fizycznego z Zarysem Fizjologii Człowieka*. Wrocław: Wydawnictwo Akademii Wychowania Fizycznego; 2006.

10. Sharkey BJ, Gaskill SE. *Fitness & Health*. Champaign, IL: Human Kinetics; 2013.
11. Corbin CB, Welk GJ, Corbin WR, Welk KA. *Fundamental Concepts of Fitness and Wellness*. Boston: McGraw-Hill; 2006.
12. Sharkey BJ, Gaskill S. *Fizjologia Sportu Dla trenerów*. Warszawa: Centralny Ośrodek Sportu; 2013.
13. Birch K, MacLaren D, George K. *Fizjologia Sportu*. Warszawa: Wydawnictwo Naukowe PWN; 2012.
14. Füzéki E, Banzer W. Physical Activity Recommendations for Health and Beyond in Currently Inactive Populations. *Int J Environ Res Public Health*. 2018;15:1042.
15. Hambrecht R, Niebauer J, Marburger C, Grunze M, Kälberer B, Hauer K, Schlierf G, Kübler W, Schuler G. Various intensities of leisure time physical activity in patients with coronary artery disease: Effects on cardiorespiratory fitness and progression of coronary atherosclerotic lesions. *J Am Coll Cardiol*. 1993;22:468.
16. Franklin BA, Swain DP, Shephard RJ. New Insights in the Prescription of Exercise for Coronary Patients. *J Cardiovasc Nurs*. 2003;18:116.
17. Warburton DER, Nicol CW, Bredin SSD. Health benefits of physical activity: the evidence. *CMAJ*. 2006;174:801.
18. Wannamethee SG, Shaper AG, Walker M. Physical Activity and Mortality in Older Men With Diagnosed Coronary Heart Disease. *Circulation*. 2000;102:1358.
19. Jolliffe JA, Rees K, Taylor RS, Thompson D, Oldridge N, Ebrahim S. Exercise-based rehabilitation for coronary heart disease. *Cochrane Database Syst Rev* 2001;1:CD001800.
20. Sagiv M, Goldhammer E, Ben-Sira D, Amir R. Factors defining oxygen uptake at peak exercise in aged people. *Eur Rev Aging Phys Act*. 2010;7:1.

21. Osiński W. *Antropomotoryka*. Poznań: Wydawnictwo Akademii Wychowania Fizycznego im. E. Piaseckiego; 2018.
22. World Health Organization. About World Health Organization. Constitution. Dostęp: <http://www.who.int/governance/eb/constitution/en/>; sprawdzono 10.11.2019.
23. Poirel E. Psychological benefits of physical activity for optimal mental health. *Sante Ment Que.* 2017;42:147.
24. Aune D, Norat T, Leitzmann M, Tonstad S, Vatten LJ. Physical activity and the risk of type 2 diabetes: a systematic review and dose-response meta-analysis. *Eur J Epidemiol.* 2015;30:529.
25. Piercy KL, Troiano RP, Ballard RM, Carlson SA, Fulton JE, Galuska DA, George SM, Olson RD. The Physical Activity Guidelines for Americans. *JAMA.* 2018;320:2020.
26. Kahlmeier S, Wijnhoven TMA, Alpiger P, Schweizer C, Breda J, Martin BW. National physical activity recommendations: systematic overview and analysis of the situation in European countries. *BMC Public Health.* 2015;15:133.
27. Co to jest wysiłek wytrzymałościowy i oporowy? Dostęp: <https://www.profilaktykawmalopolsce.pl/centrum-wiedzy-dzieci/873-co-to-jest-wysiłek-wytrzymalosciowy-i-oporowy>; sprawdzono 30.11.2019.
28. Birch K, MacLaren D, George K. *Fizjologia sportu. Krótkie wykłady*. Wydawnictwo Naukowe PWN; 2008.
29. Caputa M, Górski J, Celichowski J, Chabowski A, Górski M, Jefimow M, Jurkowska G, Knapp M, Krutki P, Rogowski ME, Smoleński O, Wierzba TH, Zalewska R, Żendzian-Piotrowska M. *Fizjologia Człowieka*. Warszawa: PZWL Wydawnictwo Lekarskie; 2019.

30. Piotrowicz R, Podolec P, Kopeć G, Drygas W, Mamcarz A, Stańczyk J, Zdrojewski T, Kozek E, Godycki-Ćwirko M, Narusiewicz M, Undas A, Pająk E, Czarnecka D, Opala G, Grodzicki T. Wytyczne Polskiego Forum Profilaktyki dotyczące aktywności fizycznej. Podręcznik Polskiego Forum Profilaktyki tom 2. *Medycyna Praktyczna*. 2010;435.
31. Wojtasik W, Szulc A, Kołodziejczyk M, Szulc A. Wybrane zagadnienia dotyczące wpływu wysiłku fizycznego na organizm człowieka. *Journal of Education, Health and Sport*. 2015;5:350.
32. Rybak P. *Podstawy fizjologii wysiłku dynamicznego i statycznego*. Warszawa;2012.
33. Szubert J, Szubert S, Koszada-Włodarczyk W, Bortkiewicz A. Nowe metody wyznaczania względnego obciążenia wysiłkiem fizycznym organizmu człowieka. *Medycyna Pracy*. 2014;65:189.
34. Traczyk WZ. *Fizjologia Człowieka w Zarysie*. Warszawa: Wydawnictwo Lekarskie PZWL; 2018.
35. Brzozowski TM, Konturek S, Chabowski A, Dembińska-Kieć A, Góralska J, Górski J, Gutowski P, Mirecka J, Pawlik WW, Sadowski B, Szczepańska-Sadowska E, Szlachcic A, Żołądź JA. *Fizjologia Człowieka: Podręcznik Dla Studentów Medycyny*. Wrocław: Edra Urban & Partner; 2018.
36. Górski J, Celichowski J, Krutki P, Pilaczyńska-Szczęśniak Ł, Czyżewska E, Nazar K, Stasiewicz J, Górski M, Spodaryk K, Smoleński O, Duda K, Kaciuba-Uściłko H, Żołądź JA. *Fizjologiczne podstawy wysiłku fizycznego*. PZWL, Warszawa 2007.
37. Acharya UR, Joseph KP, Kannathal N, Lim CM, Suri JS. Heart rate variability: a review. *Med Biol Eng Comput*. 2006;44:1031.
38. Nanchen D. Resting heart rate: what is normal? *Heart* 2018;104:1048.

39. Almeida M, Bottino A, Ramos P, Araujo CG. Measuring Heart Rate During Exercise: From Artery Palpation to Monitors and Apps. *Int J Cardiovasc Sci.* 2019;32:396.
40. Guzik P, Piekos C, Pierog O, Fenech N, Krauze T, Piskorski J, Wykretowicz A. Classic electrocardiogram-based and mobile technology derived approaches to heart rate variability are not equivalent. *Int J Cardiol.* 2018;258:154.
41. Guzik P, Malik M. ECG by mobile technologies. *J Electrocardiol.* 2016;49:894.
42. Gillinov S, Etiwy M, Wang R, Blackburn G, Phelan D, Gillinov AM, Houghtaling P, Javadikasgari H, Desai MY. Variable Accuracy of Wearable Heart Rate Monitors during Aerobic Exercise. *Med Sci Sports Exerc.* 2017;49:1697.
43. Sarzynski MA, Rankinen T, Earnest CP, Leon AS, Rao DC, Skinner JS, Bouchard C. Measured maximal heart rates compared to commonly used age-based prediction equations in the heritage family study. *Am J Hum Biol.* 2013;25:695.
44. Cleary M, Hetzler R, Wages JJ, Lentz MA, Stickley CD, Kimura IF. Comparisons of Age-Predicted Maximum Heart Rate Equations in College-Aged Subjects. *J Strength Cond Res.* 2011;25:2591.
45. Nikolaidis PT. Maximal heart rate in soccer players: measured versus age-predicted. *Biomed J.* 2015;38:84.
46. Karvonen MJ, Kentala E, Mustala O. The effects of training on heart rate: a "longitudinal" study. *Ann Med Exp Biol Fenn.* 1957;35:307.
47. Fox 3rd SM, Naughton JP, Haskell WL. Physical activity and the prevention of coronary heart disease. *Ann Clin Res.* 1971;3:404.
48. Sporis G, Vucetic V, Jukic I, Omrcen D, Bok, D, Custonja Z. How Reliable Are the Equations for Predicting Maximal Heart Rate Values in Military Personnel? *Mil Med.* 2011;176:347.

49. Londeree BR, Moeschberger ML. Effect of Age and Other Factors on Maximal Heart Rate. *Res Q Exerc Sport*. 1982;53:297.
50. Miller WC, Wallace JP, Eggert KE. Predicting max HR and the HR-VO₂ relationship for exercise prescription in obesity. *Med Sci Sports Exerc*. 1993;25:1077.
51. Gellish RL, Goslin BR, Olson RE, McDonald A, Russi GD, Moudgil VK. Longitudinal modeling of the relationship between age and maximal heart rate. *Med Sci Sports Exerc*. 2007;39:822.
52. Whyte GP, George K, Shave R, Middleton N, Nevill AM. Training Induced Changes in Maximum Heart Rate. *Int J Sports Med*. 2008;29:129.
53. Tanaka H, Monahan KD, Seals DR. Age-predicted maximal heart rate revisited. *J Am Coll Cardiol*. 2001;37:153.
54. Creek S: Target heart rate calculator. Dostęp: <http://www.stevenscreek.com/goodies/hr.shtml>; sprawdzono 29.08.2010.
55. Riebe D, Ehrman JK, Liguori G, Magal M. *ACSM's Guidelines for Exercise Testing and Prescription*. Philadelphia: Wolters Kluwer;2018.
56. Policarpo FB, Fernandes Filho J. Usar ou não a equação de estimativa "220 - idade?". *Rev Bras Cienc Mov*. 2004;12:77.
57. Nikolaidis PT, Rosemann T, Knechtle B. Age-Predicted Maximal Heart Rate in Recreational Marathon Runners: A Cross-Sectional Study on Fox's and Tanaka's Equations. *Front Physiol*. 2018;9:226.
58. Borg G. Perceived exertion as an indicator of somatic stress. *Scand J Rehabil Med*. 1970;2:92.
59. Borg G. Physical performance and perceived exertion. *Studia Psychologica et Paedagogica*, 1962; Series altera, Investigations XI 1–63.

60. Borg G. Perceived exertion: a note on 'history' and methods. *Sci Sports*. 1973;5:90.
61. Borg G. Psychophysical bases of perceived exertion. *Med Sci Sports Exerc*. 1982;14:377.
62. Noble BJ, Robertson RJ. *Perceived Exertion*. Champaign, IL: Human Kinetics; 1996.
63. Borg G, Karlsson J-G, Lindblad I. *Quantitative Variation of Subjective Symptoms during Ergometer Work*. Stockholm, Sweden: University of Stockholm, Institute of Applied Psychology; 1976.
64. Nieman DC, Carlson KA, Brandstater ME, Naegelte RT, Blankenship JW. Running endurance in 27-h-fasted humans. *J Appl Physiol*. 1987;63:2502.
65. Maresh CM, Deschenes MR, Seip RL, Armstrong LE, Robertson KL, Noble BJ. Perceived exertion during hypobaric hypoxia in low- and moderate-altitude natives. *Med Sci Sports Exerc*. 1993;25:945.
66. Morishita S, Tsubaki A, Nashimoto S, Fu JB, Onishi H. Face scale rating of perceived exertion during cardiopulmonary exercise test. *BMJ Open Sport Exerc Med*. 2018;4:e000474
67. Robertson RJ, Metz KF. Ventilatory precursors for central signals of perceived exertion. In: Borg G, Ottoson D (eds) *The perception of exertion in physical work*. Macmillan, London. 1986:111.
68. Yorllo JM, Dishman RK, Forbus WR, Cureton KJ, Graham RE. Breathlessness predicts perceived exertion in young women with mild asthma. *Med Sci Sports Exerc*. 1992;24:860.
69. Winter EM, Jones AM, Davison RCR, Bromley PD, Mercer T. *Sport and Exercise Physiology Testing Guidelines: Exercise and Clinical Testing*. London: Routledge; 2007.

70. Bernhardt V, Wood HE, Moran RB, Babb TG. Dyspnea on exertion in obese men. *Respir Physiol Neurobiol.* 2013;185:241.
71. Robertson RJ, Falkel JE, Drash AL, Swank AM, Metz KF, Spungen SA, LeBoeuf JR. Effect of blood pH on peripheral and central signals of perceived exertion. *Med Sci Sports Exerc.* 1986;18:114.
72. Spodaryk K, Szmatlan U, Berger L. The relationship of plasma ammonia and lactate concentrations to perceived exertion in trained and untrained women. *Eur J Appl Physiol Occup Physiol.* 1990;61:309.
73. Noble BJ, Robertson RJ. *Perceived Exertion*. Champaign, IL: Human Kinetics, 1996.
74. Kostka CE, Cafarelli E. Effect of pH on sensation and vastus lateralis electromyogram during cycling exercise. *J Appl Physiol Respir Environ Exerc Physiol.* 1982;52:1181.
75. Gondoni LA, Nibbio F, Caetani G, Augello G, Titon AM. What are we measuring? Considerations on subjective ratings of perceived exertion in obese patients for exercise prescription in cardiac rehabilitation programs. *Int J Cardiol.* 2010;140:236.
76. Coutts AJ, Rampinini E, Marcora SM, Castagna C, Impellizzeri FM. Heart rate and blood lactate correlates of perceived exertion during small-sided soccer games. *J Sci Med Sport.* 2009;12:79.
77. Psycharakis SG. A longitudinal analysis on the validity and reliability of ratings of perceived exertion for elite swimmers. *J Strength Cond Res.* 2011;25:420.
78. Thibault G, Peronnet F. *It is not lactic acids fault. New Studies in Athletics.* 2006;21:9.
79. Spurway NC. Aerobic exercise, anaerobic exercise and the lactate threshold. *Br Med Bull.* 1992;48:569.

80. Rieu M, Miladi J, Ferry A, Duvallet A. Blood lactate during submaximal exercises. Comparison between intermittent incremental exercises and isolated exercises. *Eur J Appl Physiol Occup Physiol*. 1989;59:73.
81. Mayes R, Hardman AE, Williams C. The influence of training on endurance and blood lactate concentration during submaximal exercise. *Br J Sports Med*. 1987;21:119.
82. Gerdle B, Larsson B, Forsberg F, Ghafouri N, Karlsson L, Stensson N, Ghafouri B. Chronic widespread pain: increased glutamate and lactate concentrations in the trapezius muscle and plasma. *Clin J Pain*. 2014;30:409.
83. Ishii H, Nishida Y. Effect of Lactate Accumulation during Exercise-induced Muscle Fatigue on the Sensorimotor Cortex. *J Phys Ther Sci*. 2013;25:1637.
84. Gleeson M, Blannin AK, Walsh NP., Field CNE, Pritchard JC. Effect of exercise-induced muscle damage on the blood lactate response to incremental exercise in humans. *Eur J Appl Physiol Occup Physiol*. 1998;77:292.
85. Goodwin ML, Harris JE, Hernández A, Gladden LB. Blood lactate measurements and analysis during exercise: a guide for clinicians. *J Diabetes Sci Technol*. 2007;1:558.
86. Beneke R, Leithäuser RM, Ochentel O. Blood lactate diagnostics in exercise testing and training. *Int J Sports Physiol Perform*. 2011;6:8.
87. Heuberger JAAC, Gal P, Stuurman FE, de Muinck Keizer WAS, Miranda YM, Cohen AF. Repeatability and predictive value of lactate threshold concepts in endurance sports. *PLoS One*. 2018;13:e0206846.
88. Donato AJ, Uberoi A, Wray DW, Nishiyama S, Lawrenson L, Richardson RS. Differential effects of aging on limb blood flow in humans. *Am J Physiol Heart Circ Physiol*. 2006;290:H272.
89. Mueller SM, Knechtle B, Knechtle P, Toigo M. Physiological alterations after a marathon in the first 90-year-old male finisher: case study. *Springerplus*. 2014;3:608.

90. Blomqvist CG, Saltin B. Cardiovascular adaptations to physical training. *Annu Rev Physiol.* 1983;45:169.
91. Pate RR, Pratt M, Blair SN, Haskell WL, Macera CA, Bouchard C, Buchner D, Ettinger W, Heath GW, King AC. Physical activity and public health. A recommendation from the Centers for Disease Control and Prevention and the American College of Sports Medicine. *JAMA.* 1995;273:402.
92. Orlander J, Kiessling KH, Karlsson J, Ekblom B. Low intensity training, inactivity and resumed training in sedentary men. *Acta Physiol Scand.* 1977;101:351.
93. Kantanista A, Kusy K, Zarębska E, Włodarczyk M, Ciekot-Sołtysiak M, Zieliński J. Blood ammonia and lactate responses to incremental exercise in highly-trained male sprinters and triathletes. *Biomed Hum Kinet.* 2016;8:32.
94. Kantanista A, Kusy K, Dopierała K, Trinschek J, Król H, Włodarczyk M, Zieliński J. Blood lactate, ammonia and kinematic indices during a speed-endurance training session in elite sprinters. *Trends Sport Sci.* 2016;2:73.
95. Eknoyan G. Adolphe Quetelet (1796-1874) the average man and indices of obesity. *Nephrol Dial Transplant.* 2007;23:47.
96. Keys A, Fidanza F, Karvonen MJ, Kimura N, Taylor HL. Indices of relative weight and obesity. *J Chronic Dis.* 1972;25:329.
97. Mosteller RD. Simplified Calculation of Body-Surface Area. *N Engl J Med.* 1987;317:1098.
98. Du Bois D, Du Bois EF. A formula to estimate the approximate surface area if height and weight be known. *Arch Intern Med.* 1916;17:863.
99. Burtcher M, Philadelphia M, Gatterer H, Burtcher J, Likar R. Submaximal exercise testing at low altitude for prediction of exercise tolerance at high altitude. *J Travel Med.* 2018;25.

100. Kusy K, Zieliński J. Aerobic capacity in speed-power athletes aged 20-90 years vs endurance runners and untrained participants. *Scand J Med Sci Sports*. 2014;24:68.
101. Smarż K, Jaxa-Chamiec T, Bednarczyk T, Bednarz B, Eysymontt Z, Gałaszek M, Jegier A, Korzeniowska-Kubacka I, Mamcarz A, Mawlichanów A, Piotrowicz R, Rybicki J, Straburzyńska-Migaj E, Szalewska D, Wolaskiewicz J. Electrocardiographic exercise testing in adults: performance and interpretation. An expert opinion of the Polish Cardiac Society Working Group on Cardiac Rehabilitation and Exercise Physiology. *Kardiol Pol*. 2019;77:399.
102. Garcin M, Billat V. Perceived exertion scales attest to both intensity and exercise duration. *Percept Mot Skills*. 2001;93:661.
103. Eston R. Use of ratings of perceived exertion in sports. *Int J Sports Physiol Perform*. 2012;7:175.
104. Garber CE, Blissmer B, Deschenes MR, Franklin BA, Lamonte MJ, Lee I, Nieman DC, Swain DP. American College of Sports Medicine position stand. Quantity and quality of exercise for developing and maintaining cardiorespiratory, musculoskeletal, and neuromotor fitness in apparently healthy adults: guidance for prescribing exercise. *Med Sci Sports Exerc*. 2011;43:1334.
105. Arena S. Rate Perceived Exertion as a Measure of Exercise Intensity. *Home Healthc Now*. 2017;35:570.
106. Follador L, Alves RC, Ferreira SDS, Silva AC, da Silva SG. Perceived Exertion and Affect From Tai Chi, Yoga, and Stretching Classes for Elderly Women. *Percept Mot Skills*. 2019;126:223.
107. Wanigatunga AA, Simonsick EM, Zipunnikov V, Spira AP, Studenski S, Ferrucci L, Schrack JA. Perceived Fatigability and Objective Physical Activity in Mid- to Late-Life. *J Gerontol A Biol Sci Med Sci*. 2018;73:630.

108. Coquart JB, Tourny-Chollet C, Lemaître F, Lemaire C, Grosbois JM, Garcin M. Relevance of the measure of perceived exertion for the rehabilitation of obese patients. *Ann Phys Rehabil Med*. 2012;55:623.
109. Heartonline.org.au. Rating of perceived exertion: Borg scales. Dostęp: http://www.heartonline.org.au/media/DRL/Rating_of_perceived_exertion_org_scale.pdf; sprawdzono 24.08.2019.
110. Eston RG, Thompson M. Use of ratings of perceived exertion for predicting maximal work rate and prescribing exercise intensity in patients taking atenolol. *Br J Sports Med*. 1997;3:114.
111. Cleland BT, Ingraham BA, Pitluck MC, Woo D, Ng AV. Reliability and Validity of Ratings of Perceived Exertion in Persons With Multiple Sclerosis. *Arch Phys Med Rehabil*. 2016;97:974.
112. Soriano-Maldonado A, Ruiz JR, Álvarez-Gallardo IC, Segura-Jiménez V, Santalla A, Munguía-Izquierdo D. Validity and reliability of rating perceived exertion in women with fibromyalgia: exertion-pain discrimination. *J Sports Sci*. 2014;33:1515.
113. Dunbar CC, Robertson RJ, Baun R, Blandin MF, Metz K, Burdett R, Goss FL. The validity of regulating exercise intensity by ratings of perceived exertion. *Med Sci Sports Exerc*. 1992;24:94.
114. Allman BL, Rice CL. Perceived exertion is elevated in old age during an isometric fatigue task. *Eur J Appl Physiol*. 2003;89:191.
115. Eston RG, Williams JG. Exercise intensity and perceived exertion in adolescent boys. *Br J Sports Med*. 1986;20:27.
116. Yelling M, Lamb KL, Swaine IL. Validity of a Pictorial Perceived Exertion Scale for Effort Estimation and Effort Production During Stepping Exercise in Adolescent Children. *Eur Phy Educ Rev*. 2002;8:157.

117. Scherr J, Wolfarth B, Christle JW, Pressler A, Wagenpfeil S, Halle M. Associations between Borg's rating of perceived exertion and physiological measures of exercise intensity. *Eur J Appl Physiol.* 2012;113:147.
118. Zinoubi B, Zbidi S, Vandewalle H, Chamari K, Driss T. Relationships between rating of perceived exertion, heart rate and blood lactate during continuous and alternated-intensity cycling exercises. *Biol Sport.* 2018;35:29.
119. Tillfors M, Furmark T, Marteinsdottir I, Fredrikson M. Cerebral blood flow during anticipation of public speaking in social phobia: a PET study. *Biol Psychiatry.* 2002;52:1113.
120. Berglund IJ, Sørås SE, Relling BE, Lundgren KM, Kiel IA, Moholdt T. The relationship between maximum heart rate in a cardiorespiratory fitness test and in a maximum heart rate test. *J Sci Med Sport.* 2019;22:607.
121. Croft RJ, Gonsalvez CJ, Gander J, Lechem L, Barry RJ. Differential relations between heart rate and skin conductance, and public speaking anxiety. *J Behav Ther Exp Psychiatry.* 2004;35:259.
122. Nes BM, Janszky I, Wisløff U, Støylen A, Karlsen T. Age-predicted maximal heart rate in healthy subjects: The HUNT fitness study. *Scand J Med Sci Sports.* 2013;23:697.
123. Al'Absi M, Bongard S, Buchanan T, Pincomb GA, Licinio J, Lovallo WR. Cardiovascular and neuroendocrine adjustment to public speaking and mental arithmetic stressors. *Psychophysiology.* 1997;34:266.
124. Guzik P. Wpływ stresu na układ krążenia. *Cardiovasc Forum.* 2001;6:53.
125. Grün V, Gimunová M, Válková H. Cardiorespiratory Fitness and Intellectual Disability. *Cardiorespiratory Fitness.* Published 2019 Jun 26. Dostęp: <https://www.intechopen.com/books/cardiorespiratory-fitness/cardiorespiratory-fitness-and-intellectual-disability>; sprawdzono 07.01.2020.

126. Mendes WB, Park J. Neurobiological concomitants of motivation. *Adv Motiv Sci.* 2014;1:233.
127. Behnke M, Kosakowski M, Kaczmarek LD. Social challenge and threat predict performance and cardiovascular responses during competitive video gaming. *Psychol Sport Exerc.* 2020;46:101584.
128. Abel JL, Larkin KT. Anticipation of performance among musicians: Physiological Arousal, Confidence, and State-Anxiety. *Psychol Music.* 1990;18:171.
129. Blascovich J, Mendes WB, Hunter SB, Lickel B, Kowai-Bell N. Perceiver threat in social interactions with stigmatized others. *J Pers Soc Psychol.* 2001;80:253.
130. Behnke M, Tomczak M, Kaczmarek LD, Komar M, Gracz J. The Sport Mental Training Questionnaire: Development and Validation. *Curr Psychol.* 2017;38:504.
131. Coquart JB, Garcin M, Parfitt G, Tourny-Chollet C, Eston RG. Prediction of maximal or peak oxygen uptake from ratings of perceived exertion. *Sports Med.* 2014;44:563.
132. Wang R, Blackburn G, Desai M, Phelan D, Gillinov L, Houghtaling P, Gillinov M. Accuracy of wrist-worn heart rate monitors. *JAMA Cardiol.* 2017;2:104.