

**Akademia Wychowania Fizycznego
im. Jerzego Kukuczki w Katowicach**

Natalia Kędra

**WPLYW TRENINGU OPOROWEGO ORAZ ZMIENNYCH WARUNKÓW
ŚRODOWISKOWYCH NA WYBRANE STĘŻENIA HORMONÓW
ORAZ SIŁĘ MIĘŚNIOWĄ U PIŁKARZY NOŻNYCH PO REKONSTRUKCJI
WIĘZADŁA KRZYŻOWEGO PRZEDNIEGO**

Rozprawa na stopień doktora nauk o kulturze fizycznej

Promotor:

prof. dr hab. n. med. Krzysztof Ficek

Promotor pomocniczy:

dr n. med. Grzegorz Hajduk

Katowice 2025

Spis treści

WYKAZ ZASTOSOWANYCH SKRÓTÓW	5
WSTĘP.....	7
1. CZYNNIKI WPLYWAJĄCE NA USZKODZENIE WIĘZADŁA KRZYŻOWEGO PRZEDNIEGO.....	8
1.1. Urazowość wśród zawodników piłki nożnej.....	10
2. TRENING WYSOKOGÓRSKI.....	13
3. WYKORZYSTANIE PERIODYZACJI TRENINGU OPOROWEGO W PROTOKOLE REHABILITACYJNYM.....	16
3.1. Czas pod napięciem (TUT).....	16
3.2. Superkompensacja.....	17
3.3. Rozkład obciążeń treningowych - obciążenie krokowe.....	19
3.4. Cykliczność procesu treningowego oraz rehabilitacyjnego.....	20
4. BIOLOGICZNE STYMULATORY WPLYWAJĄCE NA METABOLIZM TKANEK	21
4.1. Insulinopodobny czynnik wzrostu-1 (IGF-1).....	21
4.2. Hormon wzrostu (GH).....	23
4.3. Erytropoetyna (EPO).....	23
5. PROBLEM BADAWCZY	26
5.1. Cel badań.....	30
5.2. Pytania badawcze.....	31
5.3. Hipotezy badawcze.....	31
6. MATERIAŁ, METODY I NARZĘDZIA BADAWCZE.....	33
6.1. Projekt badawczy	33
6.2. Uczestnicy projektu	35
6.3. Narzędzia pomiarowe.....	36
6.3.1. Pomiar stężenia hormonu wzrostu (GH), insulinopodobnego czynnika wzrostu - 1 (IGF-1) oraz erytropoetyny (EPO).....	37
6.3.2. Badanie z wykorzystaniem dynamometru izokinetycznego.....	37
6.4. Protokół treningu oporowego.....	39
7. NARZĘDZIA ANALIZY STATYSTYCZNEJ	43
8. WYNIKI BADAŃ.....	44
8.1. Analizy wstępne – statystyki opisowe dla stężenia insulinopodobnego czynnika wzrostu-1 (IGF-1), hormonu wzrostu (GH) oraz erytropoetyny (EPO)	44
8.2. Analiza wartości stężenia insulinopodobnego czynnika wzrostu-1 (IGF-1).....	45

8.3.	Analiza wartości stężenia hormonu wzrostu (GH).....	46
8.4.	Analiza wartości stężenia erytropoetyny (EPO).....	47
8.5.	Analizy wstępne – statystyki opisowe dla różnicy wartości szczytowego momentu obrotowego prostowników (APTP) oraz zginaczy (APTZ) stawu kolanowego kończyny dolnej operowanej względem kończyny nieoperowanej oraz w zależności od prędkości kątowej ocenianej z wykorzystaniem dynamometru izokinetycznego.....	49
8.6.	Analiza dla różnicy w wartości szczytowego momentu obrotowego prostowników stawu kolanowego kończyny dolnej operowanej względem kończyny nieoperowanej (APTP) ocenianej przy prędkości kątowej 60°/s z wykorzystaniem dynamometru izokinetycznego	50
8.7.	Analiza dla różnicy w wartości szczytowego momentu obrotowego zginaczy stawu kolanowego kończyny dolnej operowanej względem kończyny nieoperowanej (APTZ) oceniana przy prędkości kątowej 60°/s z wykorzystaniem dynamometru izokinetycznego	51
8.8.	Analiza dla różnicy wartości szczytowego momentu obrotowego prostowników stawu kolanowego kończyny dolnej operowanej względem kończyny nieoperowanej (APTP) oceniana przy prędkości kątowej 120°/s z wykorzystaniem dynamometru izokinetycznego	53
8.9.	Analiza dla różnicy wartości szczytowego momentu obrotowego zginaczy stawu kolanowego kończyny dolnej operowanej względem kończyny nieoperowanej (APTZ) przy prędkości kątowej 120°/s z wykorzystaniem dynamometru izokinetycznego	54
8.10.	Analiza dla różnicy wartości szczytowego momentu obrotowego prostowników stawu kolanowego kończyny dolnej operowanej względem kończyny nieoperowanej (APTP) oceniana przy prędkości kątowej 180°/s z wykorzystaniem dynamometru izokinetycznego	56
8.11.	Analiza dla różnicy wartości szczytowego momentu obrotowego zginaczy stawu kolanowego kończyny dolnej operowanej względem kończyny nieoperowanej (APTZ) oceniana przy prędkości kątowej 180°/s z wykorzystaniem dynamometru izokinetycznego	57
8.12.	Analizy wstępne – statystyki opisowe stosunku szczytowego momentu obrotowego mięśni prostowników stawu kolanowego względem zginaczy (RTPZ) kończyny operowanej oraz nieoperowanej	59
8.13.	Analiza dla stosunku szczytowego momentu obrotowego mięśni prostowników stawu kolanowego względem zginaczy (RTPZ) oceniane przy prędkości kątowej 60°/s z wykorzystaniem dynamometru izokinetycznego.....	60
8.14.	Analiza dla stosunku szczytowego momentu obrotowego mięśni prostowników stawu kolanowego względem zginaczy (RTPZ) oceniana przy prędkości kątowej 120°/s z wykorzystaniem dynamometru izokinetycznego.....	62
8.15.	Analiza dla stosunku szczytowego momentu obrotowego mięśni prostowników stawu kolanowego względem zginaczy (RTPZ) oceniana przy prędkości kątowej 180°/s z wykorzystaniem dynamometru izokinetycznego.....	64
9.	DYSKUSJA	66
9.1.	Ograniczenia w badaniu własnym	75
10.	PODSUMOWANIE I WNIOSKI.....	77
11.	PIŚMIENNICTWO.....	80

STRESZCZENIE	91
SUMMARY	93
SPIS TABEL.....	95
SPIS RYCIN	97

WYKAZ ZASTOSOWANYCH SKRÓTÓW

APTP – różnica w wartości szczytowego momentu obrotowego prostowników stawu kolanowego kończyny dolnej operowanej w stosunku do kończyny nieoperowanej

APTZ – różnica w wartości szczytowego momentu obrotowego zginaczy stawu kolanowego kończyny dolnej operowanej względem kończyny nieoperowanej

BIL – ćwiczenia bilateralne

EPO – erytropoetyna (z ang. Erythropoietin)

EPO – przed – wartość stężenia erytropoetyny przed przystąpieniem do eksperymentu

EPO – 30 min po treningu – średnia wartość stężenia erytropoetyny 30 min po każdym ostatnim treningu z każdego mezocyklu

EPO – po – wartość stężenia erytropoetyny 48 h po zakończeniu eksperymentu

GH – hormon wzrostu (z ang. Growth Hormone)

GH – przed – wartość stężenia hormonu wzrostu przed przystąpieniem do eksperymentu

GH - 30 min po treningu – średnia wartość stężenia hormonu wzrostu 30 min po każdym ostatnim treningu z każdego mezocyklu

GH – po – wartość stężenia hormonu wzrostu 48 h po zakończeniu eksperymentu

GHS – grupa wykonująca trening oporowy w warunkach hipoksji normobarycznej

GK – grupa kontrolna

GNS – grupa wykonująca trening oporowy w warunkach normoksji

IGF-1 – insulinopodobny czynnik wzrostu-1 (z ang. Insulin-like Growth Factor 1)

IGF-1 – przed – wartość stężenia insulinopodobnego czynnika wzrostu-1 przed przystąpieniem do eksperymentu

IGF-1 – 30 min po treningu – średnia wartość stężenia insulinopodobnego czynnika wzrostu-1 30 min po każdym ostatnim treningu z każdego mezocyklu

IGF-1 – po – wartość stężenia insulinopodobnego czynnika wzrostu-1 48 h po zakończeniu eksperymentu

PT – szczytowy moment obrotowy (z ang. Peak Torque)

RTPZ – stosunek szczytowego momentu obrotowego mięśni prostowników względem zginaczy stawu kolanowego

RIR – powtórzenia w rezerwie (z ang. Reps In Reserve)

RPE – subiektywne odczucie zmęczenia (z ang. Rating of Perceived Exertion)

ST – mięsień półścięgnisty

TUT – czas pod napięciem (z ang. Time Under Tension)

UNI – ćwiczenia unilateralne

WKP – więzadło krzyżowe przednie (z ang. Anterior Cruciate Ligament, ACL)

1RM – jedno maksymalne powtórzenie (z ang. 1 Repetition Max)

WSTĘP

Zdrowie stanowi fundamentalną wartość, która często bywa naruszona w wyniku urazów. Regularna aktywność fizyczna przynosi liczne korzyści, poprawiając wydolność organizmu oraz działając jako profilaktyka chorób i urazów. Jednakże, wykonywana niewłaściwie lub zbyt intensywnie, może prowadzić do przeciążeń, urazów, a nawet konieczności przeprowadzenia zabiegu operacyjnego.

Uszkodzenie więzadła krzyżowego przedniego (WKP) jest jednym z najczęstszych urazów w sporcie wyczynowym. Całkowite uszkodzenie WKP nierzadko wiąże się z długą absencją na treningach i zawodach sportowych. Czas potrzebny na powrót do pełnej sprawności najczęściej wynosi między 8, a 18 miesięcy od momentu rekonstrukcji WKP (Gans i in. 2018). Zależy on od wielu czynników wewnętrznych i zewnętrznych, a w szczególności od indywidualnych predyspozycji organizmu, poziomu sprawności zawodnika przed urazem, a także zaangażowania w proces terapeutyczny. Długi okres rekonwalescencji pozabiegowej skłania badaczy do ciągłego poszerzania wiedzy na temat epidemiologii. Nadrzędną wartością jest nie tylko powrót zawodnika do treningu i zawodów, lecz przede wszystkim zapobieganie ponownemu urazowi. Protokoły rehabilitacyjne obejmują procesy terapeutyczne i treningowe, które umożliwiają powrót do pełnej sprawności. Jednak poziom mistrzowski zawodników skłania do poszukiwania środków udoskonalających ten proces.

1. CZYNNIKI WPLYWAJĄCE NA USZKODZENIE WIĘZADŁA KRZYŻOWEGO PRZEDNIEGO

Stale rosnąca popularność sportu sprawia, że coraz więcej osób zaczyna regularnie angażować się w aktywność fizyczną. W efekcie wzrasta konkurencja zawodnicza zarówno w sporcie amatorskim, jak i na poziomie elitarnym. Trenerzy i zawodnicy poszukują coraz lepszych środków i metod na rozwijanie umiejętności sportowców oraz wczesną specjalizację dzieci i młodzieży. Dążenie do maksymalnego wykorzystania potencjału motorycznego prowadzi do nadmiernej eksploatacji układu ruchu poprzez zwiększoną intensywność i objętość treningową.

W Polsce największą popularnością cieszy się piłka nożna. Według danych PZPN (Polski Związek Piłki Nożnej) z 2021 roku, w kraju zarejestrowanych jest 434 216 piłkarzy, co stanowi 1,14% całej populacji. Szacuje się ponadto, że 25% dzieci w wieku 7-14 lat uprawia piłkę nożną uwzględniając zarówno chłopców, jak i dziewczęta. W 2021 roku w Polsce mieszkało blisko 7 000 600 dzieci w wieku 0-17 lat (Główny Urząd Statystyczny, 2022). Dane te pokazują jak niewielki odsetek dzieci zostaje w elitarnym sporcie. Najczęstszą z przyczyn jest rzeczywisty brak motywacji, predyspozycji lub talentu oraz urazy sportowe. Piłka nożna jest jednym z najpopularniejszych sportów na świecie, a jednocześnie należy do dyscyplin z bardzo wysokim współczynnikiem ryzyka urazów stawu kolanowego. Ogólny indeks urazów mężczyzn szacuje się na 5,70 urazów na 1000 godzin gry. Współczynnik incydentu urazowego podczas meczu jest znacznie wyższy (14,43 urazów/ 1000 godzin gry), niż podczas treningu (2,77 urazów/ 1000 godzin gry). Częstsze uszkodzenia WKP podczas rozgrywek meczowych mogą wynikać z większego zaangażowania zawodników, zmęczenia oraz czynników psychospołecznych, takich jak stres i presja (Roth i Osbahr 2018; Chia i in. 2022).

W piłce nożnej niezależnie od poziomu rozgrywkowego uszkodzenie WKP należy do najczęstszych urazów stawu kolanowego zaraz po urazach mięśniowo-ścięgnistych. Częstość występowania szacuje się na 100-200 tys. urazów WKP rocznie. Jest to około 1 na 3500 w populacji sportowców. Istotność tego urazu w piłce nożnej może być definiowana przez okres w jakim dany sportowiec jest wyłączony z treningów oraz zawodów. W przypadku WKP szacuje się ten okres na 7-12 miesięcy. W ujęciu długoterminowym można spodziewać się konsekwencji w formie wykształcenia się zmian zwyrodnieniowych

stawu kolanowego, a co za tym idzie przedłużenie absencji lub całkowite wyeliminowanie zawodnika z podejmowanej aktywności fizycznej (Wang i in. 2020; Krutsch i in. 2020).

Analiza video uszkodzeń WKP oraz regularne wykonywanie testów motorycznych u zawodników jest kluczowe w celu zrozumienia biomechaniki urazu (Dingenen i in. 2015). Z dotychczasowych danych wynika, że najczęściej do uszkodzenia WKP dochodzi w mechanizmie bezkontaktowym z komponentą rotacyjną i ustawieniem stawu kolanowego w przeproście. Ważniejsze od mechanizmu wydają się być czynniki ryzyka, które mogą wpływać na uszkodzenie WKP. Wielu autorów próbuje zdefiniować najważniejsze czynniki ryzyka, aby ograniczyć ewentualność wystąpienia urazu. Najszerzej rozpatrywanym czynnikiem ryzyka jest dynamiczna koślawość stawu kolanowego, która podczas obciążenia nakłada znacząco większe siły rozciągające na WKP, w szczególności podczas lądowania i zmian kierunku biegu. Dynamiczna koślawość stawu kolanowego może być wtórną przyczyną już istniejących zaburzeń w całym łańcuchu kinematycznym, takich jak: osłabiona siła odwodźcicieli stawu biodrowego, nieprawidłowa kontrola motoryczna miednicy, rotacja wewnętrzna kości udowej, rotacja zewnętrzna kości piszczelowej, szersza miednica, zwiększona mobilność przodostopia oraz zwiększony kąt Q (kąt utworzony przez linię przeprowadzoną od kolca biodrowego przedniego górnego do środka rzepki oraz drugą linię od środka rzepki do guzowatości kości piszczelowej). Z punktu widzenia anatomicznego kobiety posiadają szerszą miednicę, co predysponuje je do wyższej wartości kąta Q, co zwiększa ryzyko uszkodzenia WKP. Zjawisko to pokrywa się z aktualnymi doniesieniami statystycznymi z badań naukowych nad epidemiologią uszkodzeń WKP (Krosshaug i in. 2007; Hewett i in. 2009; Chia i in. 2022). Wśród anatomicznych czynników ryzyka autorzy wymieniają również tylne nachylenie kości piszczelowej, zmniejszoną głębokość przyśrodkowego plateau kości piszczelowej, jak również zmniejszony rozmiar wcięcia międzykłykciowego kości udowej (Hudek i in. 2009; Shelbourne, Facibene, i Hunt 1997; Ficek i in. 2021).

Innymi czynnikami ryzyka uszkodzeń WKP może być słaba kontrola motoryczna tułowia, gdzie podczas dużych obciążeń dochodzi do większych wychyleń ciała poza płaszczyznę podparcia, zarazem wychylając środek ciężkości i generując większe obciążenie na stawy kończyn dolnych, w tym WKP (Timothy E. Hewett i in. 2005; Zazulak i in. 2007).

W odniesieniu do urazów WKP podczas lądowania, jako znaczący czynnik ryzyka wskazuje się nadmiernie pionowe lądowanie. W takim przypadku dochodzi do zmniejszonej

aktywności mięśni kulszowo-goleniowych, które są synergistami WKP. Większość sił zewnętrznych zostaje wówczas amortyzowana przez strukturę WKP, zamiast przez struktury kurczliwe zdolne do kumulowania energii kinetycznej (G. Li i in. 1999; Timothy E. Hewett i in. 2017).

W badaniach wskazuje się dużą zależność uszkodzeń WKP podczas promocji zawodnika do wyższej ligi rozgrywkowej. Transfer na wyższy poziom umiejętności rozgrywkowej wpływa na większe wymagania motoryczne zawodnika, jak i czynniki psychospołeczne, takie jak zwiększona motywacja lub presja. Nierzadko zmiana poziomu rozgrywkowego łączy się z intensyfikacją wysiłku, chociażby w formie zwiększonej ilości meczy. Znacząco przekłada się to na stres metaboliczny nakładany na sportowca, zdolności regeneracyjne, a co za tym idzie na gotowość do podejmowania aktywności sportowej na maksymalnym poziomie (Szymski i in. 2022).

1.1. URAZOWOŚĆ WŚRÓD ZAWODNIKÓW PIŁKI NOŻNEJ

Analiza urazowości WKP wybranych czołowych lig europejskich piłki nożnej uwzględniając rozgrywki ligowe, pucharowe i sesje treningowe w sezonach:

➤ Premier League:

- 2012/2013 – 12 uszkodzeń WKP;
- 2015/2016 – 12 uszkodzeń WKP;
- 2016/2017 – 12 uszkodzeń WKP;
- 2017/2018 – 2022/2023 – od 5 do 9 uszkodzeń WKP;
- 2023/2024 – 11 uszkodzeń WKP;
- 2024/2025 (pozostało 6 kolejek do końca sezonu) – 10 uszkodzeń WKP („Premier League Braces for Record ACL Injuries with Ten Players Already out in 2024-25” 2025).

➤ **Bundesliga:**

- 2009/2010 – 15 uszkodzeń WKP;
- 2010/2011 – 7 uszkodzeń WKP;
- 2011/2012 – 6 uszkodzeń WKP;
- 2012/2013 – 7 uszkodzeń WKP;
- 2013/2014 – 15 uszkodzeń WKP;
- 2014/2015 – 14 uszkodzeń WKP;
- 2015/2016 – 5 uszkodzeń WKP (Schiffner i in. 2018).

➤ **Seria A:**

- 2011/2012 – 11 uszkodzeń WKP;
- 2012/2013 – 10 uszkodzeń WKP;
- 2013/2014 – 14 uszkodzeń WKP;
- 2014/2015 – 12 uszkodzeń WKP;
- 2015/2016 – 12 uszkodzeń WKP;
- 2016/2017 – 12 uszkodzeń WKP;
- 2017/2018 – 13 uszkodzeń WKP (Grassi i in. 2019).

➤ **La Liga:**

- W sezonach od 2010/2011 do 2019/2020 doszło średnio do 11 uszkodzeń WKP na sezon (Requejo-Herrero, Pineda-Galan, i Medina-Porqueres 2023).

➤ **Süper League:**

- 2010/2011 – 15 uszkodzeń WKP;
- 2011/2012 – 13 uszkodzeń WKP;
- 2012/2013 – 10 uszkodzeń WKP;
- 2013/2014 – 11 uszkodzeń WKP;
- 2014/2015 – 13 uszkodzeń WKP;
- 2015/2016 – 7 uszkodzeń WKP;
- 2016/2017 – 8 uszkodzeń WKP;
- 2017/2018 – 10 uszkodzeń WKP;

- 2018/2019 – 9 uszkodzeń WKP;
- 2019/2020 – 4 uszkodzeń WKP (Mısır i in. 2022).

➤ **Ekstraklasa:**

- 2024/2025 (pozostało 8 kolejek do końca sezonu) – 9 uszkodzeń WKP (<https://www.transfermarkt.pl>).

2. TRENING WYSOKOGÓRSKI

Trening wysokogórski jest coraz częściej stosowaną metodą treningową u sportowców. Wywołując szereg reakcji fizjologicznych wpływa na wydolność organizmu, poprzez indukowanie globalnego niedotlenienia tkanek przez wysiłek fizyczny w warunkach niższego ciśnienia parcjalnego tlenu (PO_2). Wchodzenie na większą wysokość wiąże się z pogorszeniem wydolności tlenowej organizmu (Hamlin, Hopkins, i Hollings 2015; Hollings, Hopkins, i Hume 2012), jednakże przebywając na wysokościach dochodzi do szeregu zmian adaptacyjnych w obrębie procesów zaangażowanych w wytworzenie i magazynowanie energii, a co za tym idzie poprawę wydolności tlenowej i beztlenowej (McLean i in. 2013; Saunders i in. 2010). Podczas przebywania w warunkach hipoksji w organizmie wytwarzany jest czynnik indukowany hipoksją 1- α (HIF-1- α) powodujący tworzenie nowych naczyń krwionośnych, waskularyzację oraz stymulujący glikolizę. HIF-1 α aktywowany jest podczas urazów powstałych np. w trakcie uprawiania sportu. Czynnik ten zwiększa przepływ krwi poprzez poszerzenie naczyń krwionośnych, zwiększenie ciśnienia parcjalnego tlenu we krwi oraz indukuje syntezę proteoglikanów i fibronektyn, a także produkcję kolagenu (Ishii i in. 2005). Świadczy to zatem, że środowisko niedotlenienia może korzystnie wpływać na proces przebudowy tkanek oraz na hipertrofię i siłę mięśniową. Ponadto trening oporowy jest również istotnym elementem procesu budowania siły mięśniowej i poprawy wydolności beztlenowej. Zasadne wydaje się zatem, żeby wykorzystać odpowiedź organizmu podczas warunków kontrolowanego niedotlenienia w treningu oporowym ukierunkowanym na protokół rehabilitacyjny. W bardzo niewielu badaniach oceniano wpływ indukowanego niedotlenienia na metabolizm beztlenowy i tlenowy lub zdolność do regeneracji w różnych proporcjach pracy do odpoczynku podczas systematycznego treningu oporowego na wysokościach 2000-4500 m n.p.m. (Faiss, Girard, i Millet 2013; Brocherie i in. 2015). W badaniach oceny hipertrofii i przyrostu siły mięśniowej, szukano zwiększonego obrzęku w obrębie komórek mięśniowych, a także akumulacji metabolitów. W tej metodzie oceny postępów treningowych stosowano odpowiednią metodologię treningową. Plan treningowy opierał się na 6-12 ćwiczeniach, z których każde zawierało przedział od 8 do 12 powtórzeń o odpowiednio wydłużonym czasie pod napięciem – TUT (z ang. Time Under Tension), jednocześnie bazując na obciążeniu zewnętrznym wynoszącym 65-80% jednego maksymalnego powtórzenia (1RM). Czas przerwy wypoczynkowej pomiędzy seriami wynosił wówczas 1-3 minuty w zależności od doboru powyższych parametrów (Kraemer

i Ratamess 2004; Schoenfeld 2010). Natomiast w celu oceny odpowiedzi na ogólną hipoksję ukierunkowaną na zmiany nerwowo-mięśniowe i proces uniknięcia zmęczenia metabolicznego zastosowano sesje, które łączą 4-6 serii po 4-6 powtórzeń z obciążeniem zewnętrznym 0-50% 1RM dla ćwiczeń balistycznych (Cormie, McGuigan, i Newton 2011). Czas przerwy wypoczynkowej pomiędzy seriami wynosił wówczas od 3 do 5 minut w zależności od doboru intensywności i objętości treningowej. Zdarzało się, że metoda ta zawierała dodatkowo przerwy między powtórzeniami trwające 10-60 s. Biorąc pod uwagę różne cele treningu oporowego i niewielką liczbę badań, w których oceniano adaptację mięśniową w warunkach niedotlenienia, konieczne jest przeprowadzanie dalszych badań w tym zakresie zwracając uwagę na periodyzację treningu oraz rodzaj i nasilenie niedotlenienia. Obecne trendy treningowe w hipoksji łączą różne rodzaje i zakresy niedotlenienia, co daje wiele możliwych rozwiązań treningowych (Millet i in. 2013; Wilber 2007):

- **Hipoksja hipobaryczna** powoduje efekt zmniejszenia dostępności tlenu w tkankach poprzez obniżenie ciśnienia barometrycznego, głównie przez pobyt (stały, bądź tymczasowy) na wysokości lub przy użyciu komór hipobarycznych. Obniżenie ciśnienia barometrycznego zmniejsza opór powietrza w wyniku jego mniejszej gęstości, co sprzyja wysiłkom szybkościowym. Wznoszenie się na wysokość powoduje również obniżenie temperatury i wilgotności powietrza, a zmiana tych parametrów może znacząco wpłynąć na efekty treningu. Efektem ćwiczeń fizycznych na wysokościach jest hiperwentylacja, co powoduje zwiększenie zapotrzebowania na płyny;
- **Hipoksja normobaryczna** polega na sztucznym obniżeniu w mieszance powietrza procentowej zawartości tlenu, podczas gdy ciśnienie barometryczne utrzymuje się na stałym poziomie. Zapewnia to efekt hipoksji poprzez zmniejszenie ciśnienia tlenu we wdychanym powietrzu (rozcieńczanie azotu lub filtracja tlenu).

Mając na celu maksymalne wyeksponowanie potencjału motorycznego zawodnika, w literaturze coraz częściej zauważa się wykorzystywanie innowacyjnych metod i środków treningowych w procesie dochodzenia do mistrzostwa sportowego. Przegląd aktualnych publikacji dotyczących treningu oporowego w warunkach hipoksji normobarycznej wykazuje obiecującą optymalizację treningową, która wpływa na zwiększenie siły i mocy mięśniowej,

co bezpośrednio przekłada się na czynnik prewencyjny. Autorzy zauważają, iż zwiększona akumulacja metabolitów i czynników wzrostu (IGF) w wyniku niedotlenienia jest głównym mechanizmem odpowiedzialnym za ten efekt (Feriche i in. 2017; Amann i in. 2007; Scott i in. 2014; Mayo i in. 2018).

We współczesnym piśmiennictwie nie ma danych opisujących i porównujących skuteczność różnych strategii treningu oporowego w warunkach hipoksji normobarycznej, bazujących na wykorzystaniu zaplanowanego doboru obciążenia i jego wpływie na siłę mięśniową. Opracowanie takiego planu treningowego jest kluczowym elementem wyznaczającym optymalizację poszczególnych mikro i mezocykli treningowych. W zależności od czasu obciążenia treningowego i stanu pacjenta należy zwiększać stopniowo i okresowo zmieniać je (zgodnie z zasadami periodyzacji – Bompa i Buzzichelli (2015)), dostosowując do możliwości adaptacyjnych danego sportowca. Dodatkowo w trakcie programowania poszczególnych jednostek treningowych treningu oporowego, oprócz podstawowych zmiennych, takich jak: obciążenie zewnętrzne, liczba powtórzeń, serii, tempo ruchu, czas przerw wypoczynkowych, które mają bezpośredni wpływ na efektywność procesu treningowego, istotną rolę pełni również wybór charakteru pracy mięśniowej (Lorenz i in. 2010; Harries i in. 2015; Kraemer i in. 2017). Sposób wykonywania ćwiczeń jest jedną z podstawowych zmiennych w modyfikacji planu treningowego, który odgrywa fundamentalną rolę w procesie intensyfikacji poszczególnych mikro i mezocykli treningowych, które powinny być implikowane w protokołach rehabilitacyjnych (Kraemer i Ratamess 2004). Porównanie między ćwiczeniami obustronnymi (bilateralnymi – BIL) z jednostronnymi (unilateralnymi – UNI) jest dodatkową zmienną, która może zostać wykorzystana w protokołach i pozwala różnicować rodzaj wykonywanego ćwiczenia ze względu na charakter pracy i bezpośredni wpływ na poziom siły i mocy mięśniowej (Sollanek i in. 2017; Speirs i in. 2016). Ćwiczenia BIL angażują jednocześnie obie kończyny, wywołując ten sam rodzaj skurczu mięśniowego np. przysiad ze sztangą, rumuński martwy ciąg itp. Z kolei ćwiczenia UNI wykonywane są asymetrycznie tj. jednorącz (wyciskanie hantala) czy jedno nogą, angażujące jedną stronę w większym stopniu (całe ciało i druga strona dążą do stabilizacji). W obrębie ćwiczeń UNI, ze względu na wykorzystane obciążenie wyróżnia się: kontralateralne, które wykorzystują ruchy kończyną przeciwną i ipsilateralne, które obejmują ruchy kończyną po tej samej stronie (Liao i in. 2022). Reasumując – podczas układania protokołu rehabilitacyjnego należy wykorzystywać obie formy ćwiczeń celem wywołania głębszych i bardziej wszechstronnych zmian adaptacyjnych.

3. WYKORZYSTANIE PERIODYZACJI TRENINGU OPOROWEGO W PROTOKOLE REHABILITACYJNYM

Speriodyzowanie protokołu rehabilitacyjnego wydaje się zadaniem trudnym, gdyż każdy przypadek pacjenta wymaga indywidualnego podejścia, tym bardziej biorąc pod uwagę docelowy poziom wytrenowania, który należy osiągnąć na koniec tego procesu. Zostało to podkreślone w pracy Hoover i in. (2016), gdzie według opinii autorów „Większość specjalistów błędnie uważa, że sam środek treningowy jako ćwiczenie jest wystarczającym efektem w procesie rehabilitacji. Każdą formę aktywności należy definiować jako fizjologiczny stresor”. Zrozumienie całości postępowania, gdzie w sposób celowy sterujemy zmiennymi treningowymi, umożliwia to trenerom i fizjoterapeutom na wywołanie efektu zwiększonej superkompensacji w określonych etapach mezocykli. Ponadto pozwala na uniknięcie maladaptacji, czyli obniżenia sprawności zawodnika, która mogłaby skutkować niekontrolowanym przeciążeniem kończyny pooperacyjnej i przedłużyć proces powrotu pacjenta do pełnej sprawności, bądź też powtórzyć uraz. Dlatego też, przesłanki ku wykorzystaniu i ułożeniu speriodyzowanego protokołu rehabilitacyjnego wydają się być właściwe, a zdefiniowanie kluczowych specyficznych zmiennych wykorzystywanych będzie istotne podczas określania szczegółów planu treningowego.

3.1. CZAS POD NAPIĘCIEM (TUT)

TUT definiowany jest jako łączna ilość czasu, w którym mięśnie znajdują się w napięciu podczas jednego powtórzenia, serii, ćwiczenia lub treningu. TUT jako jeden z najistotniejszych parametrów ćwiczeń oporowych doprowadza do istotnych odpowiedzi ze strony organizmu na bodziec treningowy. Odgrywa kluczową rolę w rozwoju siły, a także hipertrofii mięśniowej (Wilk i in. 2018). Stosowanie tempa ruchu z wykorzystaniem przedłużonej fazy ekscentrycznej wydaje się bardziej wpływać na zmiany adaptacyjne w maksymalnej sile mięśniowej i umożliwia kontrolowane wykonanie ćwiczenia, co z perspektywy rehabilitacji pacjenta jest kluczowe. Poniżej zaprezentowany został sposób zapisu TUT.

TUT 2/0/X/0:

- „2” – czas fazy ekscentrycznej (tj. 2 sekundy);
- „0” – czas zatrzymania lub skurczu izometrycznego między fazą przejścia ze skurczu ekscentrycznego w koncentryczny (tj. 0 sekund);
- „X” – możliwie najkrótszy czas fazy koncentrycznej.

3.2.SUPERKOMPENSACJA

Superkompensacja to odbudowa z nadmiarem, pozwalająca organizmowi sukcesywnie zwiększać możliwości wysiłkowe. Stanowi zjawisko, które przy odpowiedniej proporcji wysiłku do regeneracji przynosi oczekiwane korzystne efekty przekraczające aktualne możliwości wysiłkowe zawodnika. W opisywanym protokole pozwala to na celowe bodźcowanie zawodnika zmiennymi treningowymi działając z jednej strony w sposób prewencyjny (unikając zbędnego i nadmiernego obciążania rehabilitowanej kończyny), a z drugiej na celową intensyfikację jednostek treningowych, które mają wywołać niezbędne adaptacyjne zmiany w operowanej kończynie dolnej. Ponadto samo zjawisko sprzyja również opanowaniu stresu metabolicznego i neuropsychologicznego przed kolejnym wysiłkiem (Goto i in. 2005; Bompa i Buzzichelli 2015).

Fazy superkompensacji (Bompa i Buzzichelli 2015) (Ryc.1):

- **Faza I – trwa od 1 do 2 godzin**

Wysiłek fizyczny wywołuje zmęczenie organizmu i dochodzi do mikrouszkodzeń tkanek mięśniowych. Mechanizmy obwodowe i ośrodkowe zmęczenia indukują zmiany w ustroju organizmu. Wzrasta stężenie hormonów katabolicznych, takich jak kortyzol;

- **Faza II – trwa od 24 do 48 godzin**

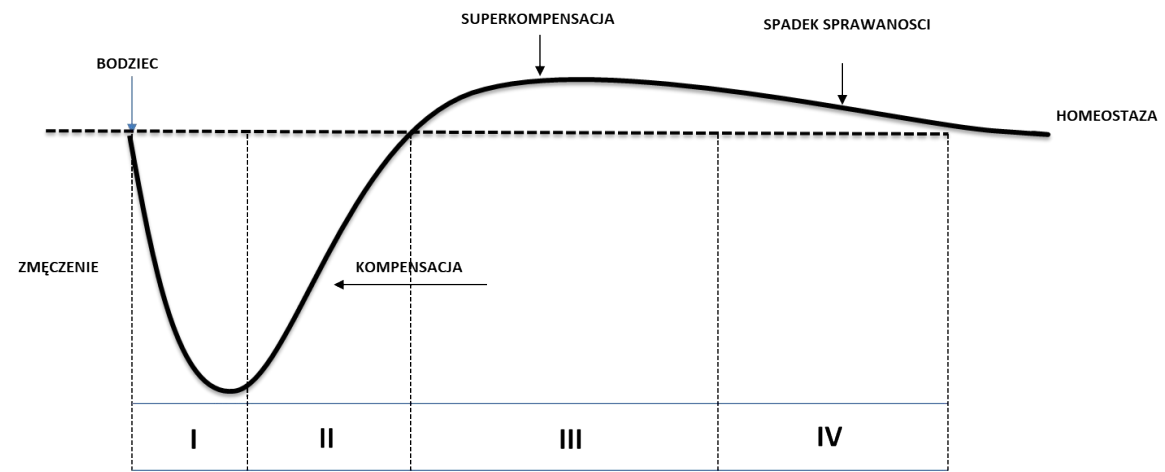
Faza ta powiązana jest z efektem kompensacji rozpoczętym natychmiast po zakończeniu jednostki treningowej. Organizm rozpoczyna proces regeneracji, odbudowując zużyte zasoby energetyczne i naprawiając mikrouszkodzenia w mięśniach. Wzrost stężenia hormonów anabolicznych, takich jak testosteron i GH, wspiera odbudowę tkanek. Wydolność organizmu wraca do poziomu sprzed wysiłku;

- **Faza III – trwa od 36 do 72 godzin**

W tej fazie następuje wzrost predyspozycji do wysiłku zwany zjawiskiem superkompensacji. Organizm przewyższa poziom wyjściowy zdolności fizycznych (np. siły, wytrzymałości) w odpowiedzi na wcześniejsze obciążenie treningowe. Adaptacje te są wynikiem reakcji na stres treningowy – organizm przygotowuje się na ewentualne przyszłe obciążenia. Jest to moment optymalny dla zastosowania kolejnego bodźca treningowego w celu maksymalizacji efektów;

- **Faza IV – trwa od 3 do 7 dni**

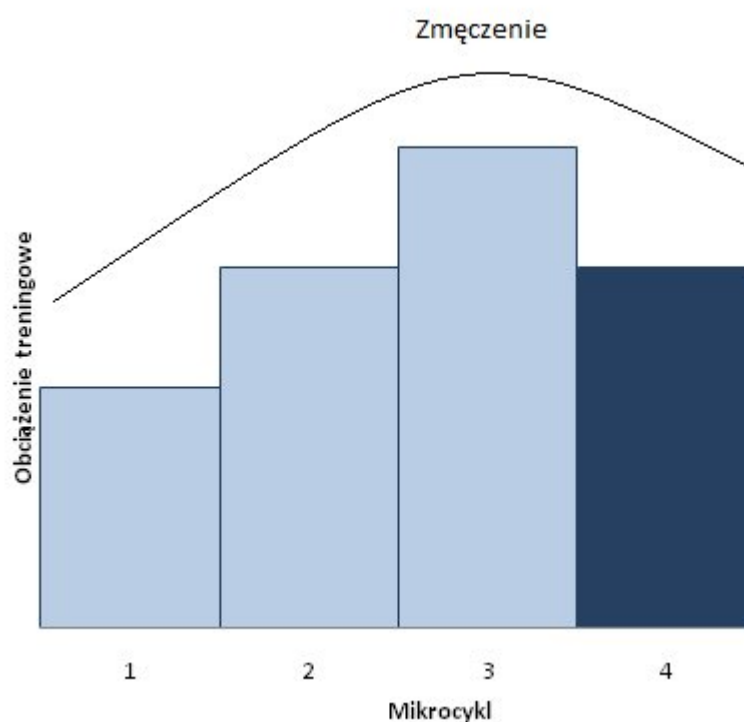
Brak zastosowania kolejnego bodźca dla organizmu prowadzi do niwelowania korzyści otrzymanych w procesie superkompensacji. Organizm powraca do stanu wyjściowego lub nawet niższego poziomu wydolności (w przypadku długiego okresu bez treningu). Zjawisko to pokazuje, jak ważne jest odpowiednie planowanie regularności treningów.



Ryc. 1 Cykl odpowiedzi superkompensacyjnej na bodziec treningowy.

3.3. ROZKŁAD OBCIĄŻEŃ TRENINGOWYCH - OBCIĄŻENIE KROKOWE

Obciążenie krokowe (z ang. step loading) polega na zwiększaniu wielkości obciążenia w poszczególnych mikrocyklach, po których następuje mikrocykl regeneracyjny. Pozwala to na wywołanie adaptacji oraz odnowy fizycznej, jak i psychicznej. Zazwyczaj w sporcie wyczynowym wykorzystuje się zasadę 3:1. Obciążenia treningowe narastają kolejno w pierwszym, drugim i trzecim mikrocyklu treningowym, po czym następuje czwarty mikrocykl, będący okresem zmniejszonego wysiłku w celu zaadaptowania do kolejnych bardziej wymagających mikrocykli, odnowy, jak i zniwelowania ryzyka przeciążenia zawodnika (Ryc. 2). Dlatego rozkład ten, z punktu widzenia periodyzacji i optymalizacji protokołu treningowego został oparty o tenże rozkład obciążenia (Bompa i Buzzichelli 2015; Plisk i Stone 2003). Badania potwierdzają zasadność planowania bloków treningowych składających się z 4, a także 2 do 6 odpowiednio skorelowanych mikrocykli (Plisk i Stone 2003; Sands i in. 2007; Laursen i Jenkins 2002).



Ryc. 2 Rozkład obciążenia 3:1 (Sands, Stone, i Stone 2007).

3.4.CYKLICZNOŚĆ PROCESU TRENINGOWEGO ORAZ REHABILITACYJNEGO

Mikrocykl stanowi narzędzie w periodyzacji mające znaczący wpływ na jakość procesu treningowego. Budowa mikrocykli uzależniona jest od celowości, intensywności, objętości i metod treningowych, które determinowane są poprzez daną fazę przygotowań. Aby uniknąć maladaptacji mikrocykle treningowe, mimo względnie stałej formy w kontekście protokołów rehabilitacyjnych, w odniesieniu do poszczególnych mezocykli muszą uwzględniać stan rehabilitowanej kończyny, siły mięśniowej, zakresu ruchu, wrażliwości na zmiany zapalne w obrębie danej kończyny spowodowane ingerencją treningową oraz predyspozycje fizyczne i potrzeby kompensacji, które będą wynikały z procesu rehabilitacji zawodnika. Periodyzacja mikrocyklu powinna być elastyczna, tak aby poszczególne jednostki treningowe można było modyfikować wedle potrzeb (Goto i in. 2005; Bompa i Buzzichelli 2015; Plisk i Stone 2003).

Mezocykl, to pośredni cykl struktury procesu treningowego, który składa się z kilku mikrocykli. Najczęściej obejmuje okres 1 miesiąca. Celem mezocyklu jest osiągnięcie głównych założeń treningowych i maksymalizacja osiągnięć. Pozwala on na uzyskanie i utrzymanie formy sportowej zawodnika.

Makrocykl najczęściej obejmuje okres roku, bądź pół roku, niejednokrotnie również może trwać 2 lata, gdy zawodnik przygotowuje się do zawodów cyklicznych. W poruszonym problemie będzie zakładał cały proces rehabilitacyjny uwzględniony w protokole. Odpowiednia periodyzacja ma wpływać pozytywnie na zmiany adaptacyjne wywołane jednostkami treningowymi, jak i niedopuszczyć do przetrenowania, co mogłoby skutkować odnowieniem się urazu. Mezocykle planowane są na podstawie ich celów nadrzędnych, determinowanych przez okres w sezonie, a więc miejsce w makrocyklu. Mezocykl wykorzystany w niniejszej pracy planowany był na podstawie monitorowania aktualnego stanu zdrowia pacjenta z wykorzystaniem aparatury diagnostycznej (Goto i in. 2005; Bompa i Buzzichelli 2015; Plisk i Stone 2003).

4. BIOLOGICZNE STYMULATORY WPLYWAJĄCE NA METABOLIZM TKANEK

Podczas rekonstrukcji WKP przeszczep przeprowadzany jest przez kanał kostny, a wgajanie przeszczepu czyli kontakt pomiędzy jego zewnętrzną częścią, a wewnętrzną częścią kanału kostnego jest istotnym czynnikiem osiągnięcia stabilizacji stawu i tym samym powrotu do jego sprawności. Przyjmuje się, że 11,7% pacjentów po rekonstrukcji doznaje zerwania przeszczepu. Kluczowe znaczenie dla zadowalających wyników ma regeneracja strefy chrząstki włóknistej (Xu i in. 2021; Shengnan i in. 2021). Połączenie to goi się powoli w związku z niedostatecznym unaczynieniem. Zagrożeniem dla tego połączenia jest niewystarczające unaczynienie przeszczepu, tendencja do bliznowacenia włóknistego w tych odcinkach. Gojenie się jej następuje poprzez tkankę bliznowatą (tworzenie kolagenu typu I).

Badacze aktualnie szukają sposobu na zmniejszenie prawdopodobieństwa ponownego zerwania przeszczepu WKP stosując różne techniki rekonstrukcji, zachowanie pierwotnych kikutów WKP oraz doprowadzenie przez nie przeszczepu. Innymi sposobami będzie również inżynieria tkankowa, komórki macierzyste badane na modelach zwierzęcych czy stosowanych już u ludzi, jak również kontrola hormonalna wpływająca na metabolizm tkanek. Skuteczność jest jednak ograniczona w związku ze słabym unaczynieniem pobranego ścięgna, a proces gojenia połączenia ścięgno-kość w porównaniu z procesem gojenia kości do kości jest zdecydowanie trudniejszy (Zou i in. 2023).

4.1. INSULINOPODOBNY CZYNNIK WZROSTU-1 (IGF-1)

Insulinopodobny czynnik wzrostu-1 – IGF-1 (ang. Insulin-like Growth Factor-1) jest peptydem zasadowym, zbudowanym z 70 aminokwasów, charakteryzującym się strukturalnym podobieństwem do insuliny, co wyjaśnia zdolność do łączenia się tego związku z receptorami insulinowymi i jego czynności insulinopodobne. IGF-1 charakteryzuje plejotropowość działania. Peptyd ten nie wykazuje cech charakterystycznych wyłącznie dla klasycznego hormonu. Jako czynnik wzrostu produkowany lokalnie odznacza się działaniem para- i autokrynnym w wielu tkankach (Niedźwiedzka 2000; Józefiak i in. 2008). IGF-1 obecny jest w komórce już we wczesnym stadium rozwoju embrionalnego. Wydaje się

on kluczowym czynnikiem wpływającym na różnicowanie i dojrzewanie tkanek, podczas gdy inne czynniki wzrostu często oddziałują na komórki przez regulację ekspresji IGF-1 (Niedźwiedzka 2000; Józefiak i in. 2008). Pobudza układy enzymatyczne komórek, stymulując ich podziały kariokinetyczne warunkujące rozrost tkanek miękkich i kości. IGF-1 stanowi główny czynnik pośredniczący w działaniu hormonu wzrostu – GH (z ang. Growth Hormone) na komórki docelowe, a przede wszystkim chondrocyty, osteoblasty i komórki gruczołów dokrewnych. Odgrywa istotną rolę w zwiększeniu masy kostnej. Syntetyzowany w osteoblastach ma znaczenie w utrzymaniu odpowiedniej gęstości tkanki kostnej. Udowodniono, iż IGF-BP3 (z ang. Insulin-like Growth Factor-Binding Protein 3) zwiększa aktywność IGF-1 w jego działaniu mitogennym na osteoblasty i w wytwarzaniu przez te komórki kolagenu typu 1 (Niedźwiedzka 2000; Józefiak i in. 2008). IGF-1 wpływa na metabolizm węglowodanów, kwasów tłuszczowych i aminokwasów. Dzięki podobieństwu budowy do insuliny wykazuje on działanie hipoglikemizujące, choć słabsze niż insulina. Silny efekt obniżający stężenie glukozy we krwi odnotowano natomiast w przypadku IGF-2 (z ang. Insulin-like Growth Factor-2) (Niedźwiedzka 2000). IGF-1 hamuje „wytwarzanie” glukozy w wątrobie, zwiększa glikolizę, zmniejsza lipolizę i wpływa stymulująco na układ immunologiczny.

IGF-1 odgrywa kluczową rolę w regeneracji tkanki mięśniowej (Barton i in. 2002; Barton-Davis i in. 1998). Efekty te wydają się być w dużej mierze związane z proliferacją i różnicowaniem komórek satelitarnych (Engert i in. 1996) oraz rekrutacją proliferujących komórek macierzystych szpiku kostnego do regionów uszkodzenia tkanki mięśniowej (Engert i in. 1996). Ponadto IGF-1 i GH biorą udział w wielu różnych funkcjach fizjologicznych promując gojenie i naprawę kości, chrząstki, mięśni, skóry i ścięgien (Engert i in. 1996). Działanie to jest w dużej mierze spowodowane tym, że GH i IGF-1 bezpośrednio wpływają na komórki biorące udział w odpowiedzi leczniczej. IGF-1 wykazuje działanie endokrynnie, a także lokalną ekspresję, co skutkuje autokrynną i/lub parakrynną sygnalizacją, która odgrywa rolę w proliferacji, apoptozie, różnicowaniu komórkowym i migracji komórek (Engert i in. 1996). IGF-1 stymuluje również syntezę przez fibroblasty cząsteczek macierzy zewnątrzkomórkowej, takich jak proteoglikany i kolagen typu I (Ghahary i in. 2000), a poziom mRNA i białka IGF-1 jest zwiększony odpowiednio w gojących się więzadłach i ścięgnach. W związku z tym IGF-1 jest szczególnie istotny w regeneracji tkanek ze względu na jego wpływ na zachowanie komórek i rolę w ekspresji kolagenu typu I (Ghahary i in. 2000).

4.2.HORMON WZROSTU (GH)

GH jest jednołańcuchowym polipeptydem składającym się ze 191 aminokwasów, produkowanym i wydzielanym pulsacyjnie przez przedni płat przysadki mózgowej (Gou i in. 2022). GH odpowiada za stymulowanie rozwoju oraz wzrostu różnych tkanek w organizmie człowieka, w tym również kości, gdyż w warunkach fizjologicznych zwiększa jednocześnie wytwarzanie i resorpcję kostną z przewagą procesów kościotwórczych: gęstość mineralną kości i zawartość minerałów w kościach (Nicholls i Holt 2016). Wykazuje on również działanie anaboliczne, w dużym stopniu wywoływane pośrednio przez IGF-1 (zwiększenie wychwytu aminokwasów, przyspieszenie transkrypcji i translacji mRNA, hamowanie proteolizy, zwiększenie ilości jąder w komórkach mięśniowych oraz wzrost objętości i masy włókien mięśniowych). Hormon ten odgrywa zasadniczą rolę u pacjentów po rekonstrukcji WKP wpływając na proces odbudowy oraz gojenia struktury kości. Stymuluje osteoblasty do tworzenia większej ilości substancji mineralnych – fosforu oraz wapnia – co sprzyja odbudowie i wzmocnieniu struktury, szczególnie w obrębie kanałów kostnych. GH pobudza proliferację komórek w rejonie operowanym do tworzenia nowych komórek tkanki łącznej oraz kości. Sprzyja syntezie kolagenu, będącego głównym składnikiem więzadeł (Dixit i in. 2021). Kolagen, z kolei, stanowi niezbędne białko do naprawy, przebudowy i wzmocnienia przeszczepu WKP. Ponadto zwiększa liczbę i różnicowanie osteoklastów. Pośrednie działanie GH na kości zachodzi z udziałem IGF-1 produkowanego w wątrobie i wytwarzanego miejscowo przez osteoblasty. Syntetyzowany w osteoblastach IGF-1 może działać w sposób autokrynnny i parakrynnny, odgrywając ważną rolę w regulacji gęstości tkanki kostnej. Ponadto GH poprawia skład ciała, prowadząc do zmniejszenia całkowitej zawartości tkanki tłuszczowej i zwiększenia beztłuszczowej masy ciała.

4.3.ERYTROPOETyna (EPO)

Erytropoetyna – EPO (z ang. erythropoietin) jest endogennym glikoproteinowym hormonem białkowym, który odpowiada za indukowanie erytropoezy, czyli procesu namnażania i dojrzewania erytrocytów w szpiku kostnym. W organizmie człowieka EPO syntetyzowana jest w wątrobie i korze nerek, a wykorzystywana jest do kontrolowania liczby erytrocytów krążących w krwiobiegu, co pozwala na utrzymanie transportu tlenu do tkanek na

odpowiednim poziomie. W laboratorium powstała sztucznie syntetyzowana wersja erytropoetyny, nazwana rekombinowaną ludzką erytropoetyną (rHuEPO) i podawana głównie w późnych stadiach niewydolności nerek. Zastosowanie rHuEPO zainteresowało środowisko sportowe, przez co już w roku 1980 zaczęto stosować ją jako formę dopingu, a następnie zakazano jej użycia we wczesnych latach 90. W świetle aktualnych badań nie ma jednoznacznych dowodów na istotne korzyści z działania ergogenicznej wersji EPO u profesjonalnych sportowców. W związku z tym zaczęto badać wpływ EPO na wybrane zdolności motoryczne, której syntezę pobudzano czynnikami zewnętrznymi, takimi jak np. hipoksja normobaryczna (Trinh i in. 2020).

Największe korzyści z zastosowania EPO obserwuje się w sportach wytrzymałościowych, co z kolei skłania do analizy wpływu zwiększonej syntezy EPO na możliwości efektywnego zwiększania siły mięśniowej. W warunkach hipoksji normobarycznej dochodzi do szeregu zmian morfologicznych, w tym do stymulowania wydzielania EPO. Ze względu na różny czas i częstotliwość pobierania krwi przez badaczy w trakcie i po treningu wysokościowym ujednolicenie wyników kinetyki EPO jest trudne, jednakże dane prezentowane w literaturze ocenianej na wysokościach w zakresie 1800-3500 m n.p.m. pozwalają wykryć pewne trendy. Podczas trwania treningu wytrzymałościowego w warunkach hipoksji poziom EPO znacząco wzrasta od pierwszej do trzeciej doby po treningu. Po osiągnięciu szczytowej wartości EPO zaczyna stopniowo obniżać się, utrzymując jednak wartości powyżej wyjściowej przez kilka dni lub tygodni. Po cyklu treningowym w warunkach hipoksji, podczas powrotu do treningu na poziomie morza, stężenie EPO spada do wartości normatywnych natychmiast lub po paru dniach, a niektóre badania pokazują, że obniża się ono nawet do niższych wartości, niż te sprzed treningu (Czuba i in. 2014; Płoszczyca i in. 2018).

W badaniach Törpela i in. (2020) otrzymano podobne wyniki. Oceniono wpływ treningu oporowego w warunkach hipoksji normobarycznej. Stężenie EPO znacząco wzrosło przez cały czas trwania eksperymentu, lecz największe wartości osiągnęło w końcowym etapie interwencji. Zaobserwowano obniżenie stężenia EPO we krwi do wartości wyjściowych zaraz po zakończeniu badania. Eksperyment ten wykazał jednak brak wpływu treningu oporowego w warunkach hipoksji na poziom siły mięśniowej, wytrzymałości oddechowej oraz poprawy parametrów morfologicznych krwi. To z kolei stoi w opozycji do badań przeprowadzonych przez Nishimurę i in. (2010), który dowiódł istotny wzrost hipertrofii i siły mięśniowej w odpowiedzi na trening oporowy w warunkach hipoksji ($\text{FiO}_2 = 16\%$). Różnice w wynikach

badania mogą wynikać z różnej metodyki, w szczególności sposobu programowania treningu. Badacze zauważyli ponadto, że kinetyka stężenia EPO w odpowiedzi na niedotlenienie jest podobna do kinetyki stężenia czynnika indukowanego niedotlenieniem (HIF-1). Lundby, i in. (2009) wykazali, że w odpowiedzi na hipoksję stężenie białka HIF-1 α osiąga maksimum wartości w ciągu pierwszych godzin ekspozycji i stopniowo obniża się do wartości wyjściowych po jej zakończeniu. Zatem postępujący spadek stężenia EPO wiąże się ze zjawiskiem stabilizacji HIF-1 α .

Ekspozycja na trening w warunkach niedotlenienia prowadzi do zmniejszenia ciśnienia parcjalnego tlenu (PaO₂), a co za tym idzie zmiany nasycenia tlenem krwi tętniczej (SaO₂). Zmiana ciśnienia parcjalnego tlenu indukuje syntezę EPO w nerkach, co inicjuje proces erytropoezy. Mechanizm ten nie jest do końca poznany, lecz uważa się, że HIF-1 α jest głównym i kluczowym mediatorem kaskady erytropoetycznej (Jelkmann 2011; Płoszczyca i in. 2018; Ambroży i in. 2020).

HIF-1 α jest głównym regulatorem ekspresji genów reagujących na niedotlenienie. Inicjuje transkrypcję czynnika wzrostu śródbłonna naczyń, który reguluje proces angiogenezy (globalny proces tworzenia nowych naczyń). Z tego względu wzajemna korelacja pomiędzy EPO, a HIF-1 α jest istotnym czynnikiem regulującym proces angiogenezy i kapilaryzacji (zwiększenie liczby, gęstości lub funkcjonalności naczyń włosowatych w tkance), co może przyczynić się pośrednio do zwiększonej wydolności, a w konsekwencji większej wytrzymałości tlenowej w trakcie treningu w warunkach hipoksji (Ohno i in. 2012; Fernandes i in. 2022).

5. PROBLEM BADAWCZY

Zrozumienie eksperymentalnego podejścia do analizowanego problemu badawczego wymaga uwzględnienia skali urazowości w obrębie WKP oraz złożoności procesu rehabilitacji i związanych z nim zagrożeń. Omawiając ten problem należy odnieść się do pracy Kakavas i in. (2021) gdzie wykazano, iż statystycznie w USA dochodzi do ok 250 000 urazów WKP, a około 65% tych urazów jest leczonych za pomocą rekonstrukcji. Natomiast jedna z metaanaliz oceniająca urazowość WKP wśród piłkarzy wykazała, iż częstotliwość urazów wynosi średnio 1,7 na 10 000 wydarzeń sportowych, gdzie pośród zawodników płci męskiej częstość występowania wynosiła 0,9/ 10 000 (Montalvo i in. 2019). Dlatego spójne podejście bazujące na wykorzystaniu periodyzacji wraz z zastosowanym środowiskiem hipoksji normobarycznej może być jedną z kluczowych zmiennych w kontekście rehabilitacji po rekonstrukcji WKP, zwłaszcza wśród wyczynowych sportowców, gdyż średni czas powrotu do rozgrywek meczowych u elitarnych piłkarzy waha się od 6 do 13 miesięcy (Mazza i in. 2022). W rezultacie urazy WKP skutkują długimi okresami rehabilitacji gdzie zawodnicy nie mogą brać udziału w rozgrywkach mistrzowskich, co związane jest z utratą produktywności i rentowności dla klubów, a także wpływają na długość kariery zawodników. Aby zrozumieć skalę owego zjawiska, dla porównania, koszty rekonstrukcji WKP i jej rehabilitacji szacuje się nawet na 1 miliard dolarów rocznie dla sportowców szkół średnich w USA (Joseph i in. 2013). Dlatego holistyczne podejście do problemu badawczego miało na celu porównania efektywności zastosowanej periodyzacji w warunkach hipoksji normobarycznej i normoksji na szczytowy moment obrotowy – PT (z ang. Peak Torque) prostowników i zginaczy stawu kolanowego, jak i stężenie hormonów 30 min po ostatniej jednostce każdego mezcycyku oraz 48h po zakończonym eksperymencie. Ponadto grupa badanych była wyselekcjonowana w oparciu o ściśle określone kryteria i składała się wyłącznie z piłkarzy nożnych poziomu ekstraklasy oraz 1 ligi.

Mając na uwadze, iż sam zabieg rekonstrukcji nie minimalizuje prawdopodobieństwa kolejnych urazów, gdyż częstość występowania ponownego zerwania przeszczepu wg. Hui i in. (2011) wynosi 8%, a urazów WKP po stronie przeciwnej sięga nawet 24%. Ponadto istnieją badania dostarczające pomocnych statystyk powrotu do rozgrywek meczowych dla zawodowych piłkarzy po rehabilitacji po przebytej rekonstrukcji WKP. Badanie opublikowane w 2022 roku w *Orthopedic Journal of Sports Medicine* (Mazza i in. 2022) na 195 zawodowych piłkarzach, którzy doznali urazów WKP w ciągu trzech sezonów z ośmiu

najlepszych europejskich lig piłkarskich wykazało, iż 95% zawodników powróciło do sportu wyczynowego, ze średnim czasem powrotu wynoszącym nieco ponad osiem miesięcy. Jednak w trzecim sezonie pooperacyjnym 36% tych zawodników grało w niższej lidze krajowej, a 13,6% zakończyło karierę. We wszystkich trzech sezonach pooperacyjnych stwierdzono znaczną redukcję minut gry na sezon. Fakt ten podkreśla istotę problemu badawczego.

Kolejnym argumentem było zastosowanie periodyzacji treningowej. Warto odnieść się do pracy Kakavas i in. (2021) dotyczącej wykorzystania periodyzacji w protokołach rehabilitacyjnych po rekonstrukcji WKP. Autorzy wskazują w niej, iż większość fizjoterapeutów uważa same ćwiczenia czy daną aktywność ruchową za wystarczający bodziec, który ma korzystny wpływ na rehabilitację pourazową. Wskazują oni, iż ten punkt widzenia jest tylko częściowo poprawny, gdyż każdy rodzaj aktywności fizycznej można interpretować jako stresor fizjologiczny (Gamble 2006; Kakavas i in. 2021). Dlatego postanowiono wykorzystać w pracy jeden z modeli periodyzacji, który ma na celu optymalizację całego procesu, w którym układ nerwowo-mięśniowy adaptuje się do nietypowych obciążeń lub stresorów, a takim niewątpliwie jest środowisko hipoksji normobarczynej (Motowidło i in. 2024; Bompa i Buzzichelli 2015). Wykorzystując takie zmienne jak intensywność, objętość i częstotliwość i ich wzajemne interakcje możemy w sposób kontrolowany doprowadzać do przeciążenia zawodnika. Oczekując również odpowiedniej reakcji układu nerwowo-mięśniowego w postaci wystąpienia korzystnych zmian adaptacyjnych. Stąd należy uwzględnić takie aspekty, jak: dyscyplina sportu, płeć, wiek gdzie w połączeniu z indywidualizacją może prowadzić do szeregu zmian homeostazy wewnątrzustrojowej organizmu, gdzie końcowym efektem jest planowe wystąpienie zjawiska superkompensacji. Natomiast odwrotne skutki mogą wystąpić w momencie braku stosowania owej periodyzacji opóźniając jednocześnie szybkość powrotu zawodnika do pełnych obciążeń treningowych gdyż mogą pojawić się krytyczne zmiany przeciążeniowe, których następstwem może być ponowny uraz lub wydłużenie procesu rehabilitacji. Dlatego postanowiono w pracy wykorzystać rozkład obciążenia krokowego posługując się w mezocyklach takimi zmiennymi jak tempo ruchu i TUT (Bompa i Buzzichelli 2015; Wilk i in. 2018).

W literaturze spotykamy koncepcje, w których brakuje konkretnych wytycznych dotyczących zmiennych treningu oporowego. Jednym z najczęściej stosowanych protokołów jest protokół Melbourne ACL Rehabilitation Guide 2.0 (Cooper i Hughes). Jest on podzielony na 6 faz, składających się z celów i zmiennych, które należy osiągnąć na koniec każdego etapu, aby przejść do następnego. Fazy te przedstawiają się następująco:

- **Faza 0** – Przedoperacyjna: rekonwalescencja po urazie i gotowość do zabiegu operacyjnego;
- **Faza 1** – Rekonwalescencja po operacji (wyprost stawu kolanowego w ciągu pierwszych 2-3 tygodni, kontrola wysięku). Zgięcie może postępować stopniowo;
- **Faza 2** – Siła i kontrola nerwowo-mięśniowa;
- **Faza 3** – Bieganie, zwinność i lądowanie;
- **Faza 4** – Powrót do sportu;
- **Faza 5** – Zapobieganie ponownym urazom.

Dla porównania w pracy Lemiesz i in. (2011) dokonano oceny efektywności norweskiego protokołu rehabilitacyjnego, który również składa się z sześciu faz:

- **Faza 0** – Wczesna faza pooperacyjna (tygodnie 1-2).
Cel: przywrócenie pełnego biernego wyprost kolana i zmniejszenie obrzęku stawów;
- **Faza 1** – Faza chodu (tygodnie 2-4).
Cel: osiągnięcie prawidłowego wzorca chodu bez kul; kontrolowanie równowagi z podparciem obu kończyn; kontrolowanie równowagi przy pomocy jednej kończyny; stabilizacja dynamiczna kończyny zdrowej;
- **Faza 2** – Faza równowagi i stabilizacji dynamicznej (tygodnie 5-8).
Cel: kontrolowanie równowagi początkowo przy pomocy obu kończyn, a następnie unilateralnie wsparcie na niestabilnym podłożu, kontrolowanie stabilizacji dynamicznej, wchodzenie i schodzenie w dół, przysiady, chodzenie na boki i do tyłu;
- **Faza 3** – Faza kształtowania siły mięśniowej (tygodnie 9-12).
Cel: zwiększenie siły mięśniowej z wykorzystaniem takich ćwiczeń jak przysiady na desce wobbler, przysiady i wypady z obciążeniem zewnętrznym;
- **Faza 4** – Faza biegu (tygodnie 13-16).
Cel: rozpoczęcie działającego programu po pozytywnych wynikach testów na systemie Biodex, Humac Norm, skok dosiężny z zamachem ramion obunóż, kontrolowane wyskoki obunóż z obrotem i lądowaniem na trampolinie, bieg na bieżni;
- **Faza 5** – Faza lotu (tygodnie 17-19).
Cel: bieganie ze zmianą kierunku, skok dosiężny z zamachem ramion z lądowaniem na płaską powierzchnię, skok dosiężny z zamachem ramion na skrzynię;
- **Faza 6** – Faza treningu plyometrycznego i zwinności (tygodnie 20-24).

Cel: skok dosiężny z zamachem ramion jednonóż, wykonywanie wzorców ruchowych specyficznych dla danej dyscypliny sportowej.

Dlatego lekarz i fizjoterapeuta ma jedynie ogólne cele dla każdej fazy. W kilku badaniach porównywano trening ekscentryczny ze standardowym protokołem rehabilitacyjnym po rekonstrukcji WKP, ćwiczenia w otwartym i zamkniętym łańcuchu kinematycznym w rehabilitacji kolana z bólem stawu rzepkowo-udowego, a nawet rehabilitację domową i nadzorowaną przez fizjoterapeutę w oparciu o standardowy protokół rehabilitacyjny (Naclerio i in. 2013; Lorenz i in. 2010; Gamble 2006). Stosując w protokołach po rekonstrukcji WKP kilka modeli periodyzacji liniowej i nieliniowej przy użyciu standardowych protokołów rehabilitacyjnych badacze doszli do wniosków, iż tradycyjne protokoły rehabilitacyjne można porównać z programami opartymi na wydłużonej fazie ekscentrycznej. Dokonując podziału na wytrzymałość, hipertrofię, siłę i moc mięśniową, stosując przy tym metodę stopniowania trudności oraz ćwiczenia o strukturze ruchu zbliżonej do danej dyscypliny sportu, z uwzględnieniem etapu w jakim znajduje się zawodnik (Gabbett 2016). W kilku pracach wskazano jaki rodzaj treningu należy implikować pacjentom w zależności od czasu, który minął od zabiegu, gdzie w czwartym tygodniu po rekonstrukcji WKP, powinno się skupiać na wytrzymałości mięśniowej (Harries i in. 2015). Następnie etap hipertrofii powinno rozpocząć się od około 8 tygodnia po zabiegu, ponieważ początkowa hipertrofia mięśniowa wynika z mechanizmów związanych z adaptacją nerwowo-mięśniową, a nie samą hipertrofią. Trening siły mięśniowej powinien być wdrożony między 12, a 16 tygodniem bezpośrednio przed treningiem mocy mięśniowej (Kakavas i in. 2021).

Kolejnym aspektem jest wpływ speriodyzowanego protokołu treningu oporowego i ekspozycji na hipoksję, które powodują wzrost stężenia hormonów anabolicznych, takich jak GH i IGF-1 (Nicholls i Holt 2016; Dixit i in. 2021). Z przeglądu dostępnej literatury dotyczącej wpływu treningu oporowego w warunkach hipoksji uzyskujemy niejednoznaczne wyniki badań. W jednej z prac, która dotyczyła porównania wpływu treningu oporowego w warunkach hipoksji i normoksji, stwierdzono, że stężenie GH nie wzrosło znacząco po 6 mikrocyklach (Chycki i in. 2016). Jest to sprzeczne z pracą Kon i in. (2012), którzy stwierdzają istotny wzrost stężenia GH. Potwierdzają to również Kurobe i in. (2015), którzy przeprowadzili badanie, w którym podzielili uczestników na dwie grupy, jedną trenującą w warunkach hipoksji normobarycznej, a drugą w normoksji. Trening obejmował 8 mikrocykli po 3 jednostki treningowe na mikrocykl. Grupa trenująca w warunkach hipoksji normobarycznej uzyskała wyższe stężenie GH. Dodatkowo mając na uwadze stosowane

środowisko hipoksji, jak i grupę badanych (piłka nożna) zostało monitorowane stężenie EPO, które ma również wymierne efekty w końcowym etapie wprowadzania zawodników w pełne obciążenia treningowe.

Powyższe protokoły zawierają ogólnikowe informacje dotyczące postępowania w poszczególnych etapach rehabilitacji bez szczegółowej periodyzacji postępowania. Dodatkowym argumentem w podjęciu problemu badawczego jest porównanie wykorzystania warunków hipoksji normobarycznej i normoksji na zmiany stężenia hormonów, jak i zmiany siły mięśniowej. Podjęcie tematyki uwzględniającej protokół treningowy z wykorzystaniem rozkładu obciążenia krokowego oraz uwzględnieniem warunków hipoksji normobarycznej i normoksji wydaje się być zasadne w kontekście sprawności pacjenta.

5.1. CEL BADAŃ

Celem niniejszej rozprawy doktorskiej była ocena wpływu speriodyzowanego treningu oporowego oraz ekspozycji na warunki hipoksji normobarycznej, zastosowanych w okresie pooperacyjnym po rekonstrukcji więzadła krzyżowego przedniego (WKP), na wybrane parametry biomechaniczne i biochemiczne u zawodowych piłkarzy nożnych występujących na poziomie ekstraklasy oraz 1 ligi. Badaniem objęto trzy grupy: GHS (grupa poddana treningowi w warunkach hipoksji normobarycznej), GNS (grupa trenująca w warunkach normoksji) oraz GK (grupa kontrolna). Analizie poddano wpływ zastosowanych interwencji na redukcję różnicy w wartości szczytowego momentu siły prostowników (AFTP) i zginaczy (APTZ) stawu kolanowego kończyny dolnej operowanej w odniesieniu do kończyny nieoperowanej, a także na stosunek momentu siły prostowników do zginaczy (RTPZ). Dodatkowo oceniano zmiany stężeń wybranych markerów biologicznych: insulinopodobnego czynnika wzrostu-1 (IGF-1), hormonu wzrostu (GH) oraz erytropoetyny (EPO), pełniących istotną rolę w procesach regeneracyjnych.

5.2. PYTANIA BADAWCZE

Na podstawie przedstawionego celu badań sformułowano następujące pytania badawcze:

1. Czy zastosowanie protokołu treningowego w warunkach hipoksji normobarycznej, w porównaniu do warunków normoksji, wpływa na różnicę w wartości szczytowego momentu siły prostowników stawu kolanowego kończyny dolnej operowanej względem kończyny nieoperowanej (AFTP)?
2. Czy zastosowanie protokołu treningowego w warunkach hipoksji normobarycznej, w porównaniu do warunków normoksji, wpływa na różnicę w wartości szczytowego momentu siły zginaczy stawu kolanowego kończyny dolnej operowanej względem kończyny nieoperowanej (APTZ)?
3. Czy zastosowanie protokołu treningowego w warunkach hipoksji normobarycznej, w porównaniu do normoksji, wpływa na stosunek szczytowego momentu siły mięśni prostowników do zginaczy stawu kolanowego (RTPZ)?
4. Jakie zmiany w stężeniu hormonów anabolicznych – hormonu wzrostu (GH) oraz insulinopodobnego czynnika wzrostu-1 (IGF-1) – zachodzą w odpowiedzi na zastosowanie protokołu treningowego w warunkach normoksji i hipoksji normobarycznej?
5. Jakie zmiany w stężeniu erytropoetyny (EPO) zachodzą w odpowiedzi na zastosowanie protokołu treningowego w warunkach normoksji i hipoksji normobarycznej?

5.3. HIPOTEZY BADAWCZE

Postawiono następujące hipotezy badawcze:

1. Zastosowanie protokołu treningowego w warunkach hipoksji normobarycznej przyczyni się do największej redukcji asymetrii wartości szczytowego momentu siły prostowników stawu kolanowego między kończyną operowaną, a kończyną nieoperowaną (AFTP).

2. Zastosowanie protokołu treningowego w warunkach hipoksji normobarycznej przyczyni się do największej redukcji asymetrii wartości szczytowego momentu siły zginaczy stawu kolanowego między kończyną operowaną, a kończyną nieoperowaną (APTZ).
3. Zastosowanie protokołu treningowego w warunkach hipoksji normobarycznej przyczyni się do największej poprawy stosunku szczytowego momentu siły prostowników do zginaczy stawu kolanowego (RTPZ).
4. Największy wzrost stężenia hormonu wzrostu (GH) oraz insulinopodobnego czynnika wzrostu-1 (IGF-1) zostanie odnotowany 30 minut po zakończeniu sesji treningowej realizowanej w warunkach hipoksji normobarycznej.
5. Największy wzrost stężenia erytropoetyny (EPO) zostanie odnotowany 30 minut po zakończeniu sesji treningowej realizowanej w warunkach hipoksji normobarycznej.

6. MATERIAŁ, METODY I NARZĘDZIA BADAWCZE

6.1. PROJEKT BADAWCZY

Protokół badań został zaakceptowany przez Uczelnianą Komisję Bioetyczną ds. Badań Naukowych Akademii Wychowania Fizycznego im. Jerzego Kukuczki w Katowicach (Uchwała Nr 3/2021 Uczelnianej Komisji Bioetycznej ds. Badań Naukowych przy Akademii Wychowania Fizycznego im. Jerzego Kukuczki w Katowicach z dnia 21 stycznia 2021 roku).

W badaniach wykorzystano dobór celowy. Ze względu na wymagania co do grupy badanej (rodzaj urazu, dyscyplina sportu, prezentowany poziom sportowy) badania odbyły się w latach 2021-2023. Dokonano rekrutacji uczestników na podstawie poniższych kryteriów.

Kryteria włączenia do badań:

- płeć męska;
- udział w rozgrywkach organizowanych na poziomie ekstraklasy oraz 1 ligi;
- piłkarski staż treningowy minimum 10 lat;
- uraz wystąpił na skutek jednostronnej, pourazowej, izolowanej przedniej niestabilności stawu kolanowego;
- rekonstrukcja WKP do 10 dni od urazu;
- przeszczep do zabiegu pobrany ze ścięgien mięśni grupy kulszowo-goleniowej (mięśnia półścięgnistego – ST oraz smukłego – GR);
- brak chorób współistniejących np. choroby układu krążenia, oddechowego, itp.;
- zgoda lekarza prowadzącego na udział w badaniu;
- pisemna zgoda zawodnika na udział w badaniu.

Kryteria wyłączenia z grupy badanej:

- płeć żeńska;
- czas od urazu do zabiegu rekonstrukcji WKP dłuższy niż 10 dni;
- choroby współistniejące np. choroby układu krążenia, oddechowego, itp.;
- brak zgody lekarza prowadzącego na udział w badaniu.

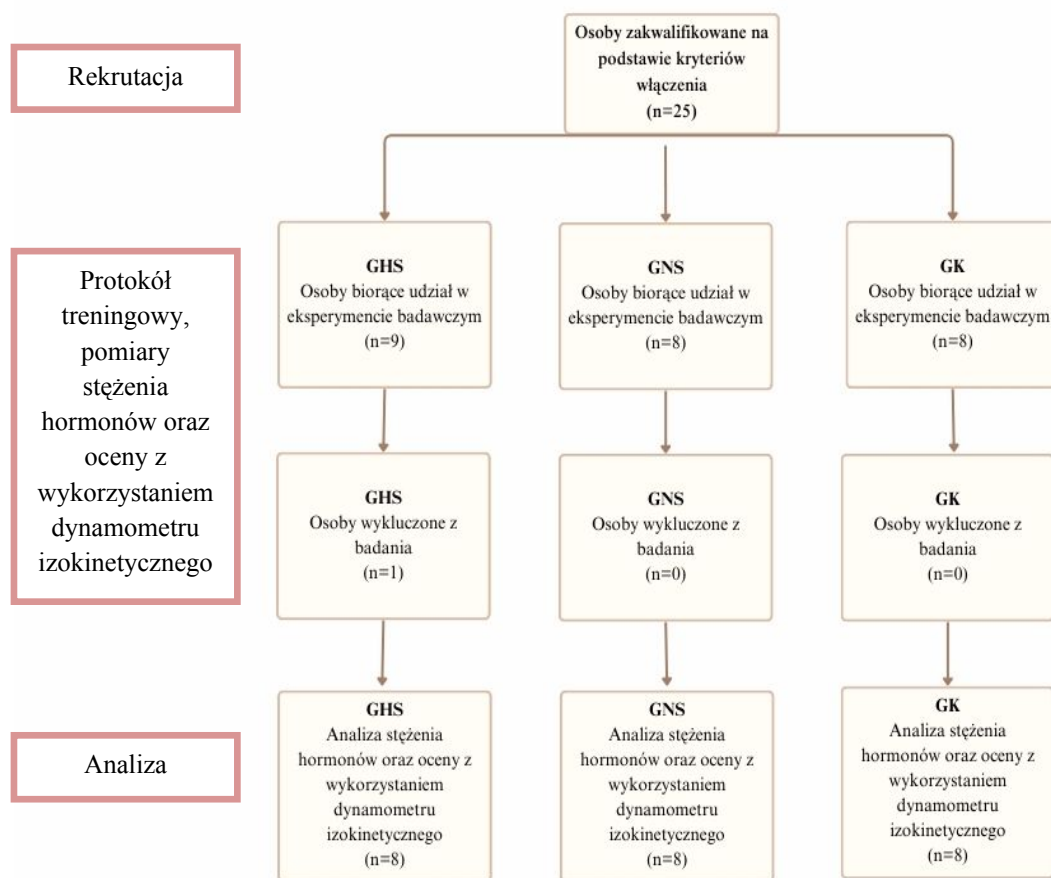
Osobą odpowiedzialną za kwalifikowanie pacjentów do badań był lekarz ortopeda. Żaden z uczestników nie był narażony na działanie warunków atmosferycznych lub niedotlenienia na wysokości większej niż 1800 m n.p.m. w ciągu 4 miesięcy poprzedzających udział w eksperymencie. Zawodnicy zostali podzieleni na 3 grupy, każda po 8 osób (każdy z badanych był poddawany zabiegowi do 10 dni od momentu powstania urazu, co stanowiło również o podziale zawodników na poszczególne podgrupy) (Ryc. 3):

- **GHS** – grupa trenująca w warunkach hipoksji normobarycznej (3000 m n.p.m., $FiO_2=15\%$, ± 1586 ppm, wilgotność 33,6%, 985 hPa, 19°C);
- **GNS** – grupa trenująca w normoksji (placebo). Grupa została poinformowana, że realizuje protokół treningowy w warunkach hipoksji normobarycznej. W rzeczywistości jednak trening odbywał się w niewłączonej komorze hipoksyjnej, a panel sterowania pozostawał ustawiony na ekranie startowym, co miało na celu utrzymanie efektu zaślepienia uczestników względem faktycznych warunków środowiskowych;
- **GK** – grupa kontrolna prowadzona protokołem rehabilitacyjnym Melbourne ACL Rehabilitation Guide 2.0 w macierzystych klubach.

Badani zostali poinformowani o protokole badań i wynikających z niego zagrożeń i korzyści, a następnie wyrazili pisemną zgodę na uczestnictwo w badaniach. Każdy zawodnik miał prawo zrezygnować z uczestnictwa w badaniach na dowolnym etapie ich trwania. Rezygnacja mogła nastąpić również na prośbę lekarza prowadzącego.

Badania przeprowadzono w dwóch placówkach. Interwencja GHS i GNS odbywała się w pracowni hipoksji w Akademii Wychowania Fizycznego w Katowicach. Natomiast GK realizowana była w macierzystych ośrodkach sportowych zawodników. Część diagnostyczna odbywała się w ośrodku Galen Rehabilitacja Sp. z o. o. pod kontrolą i nadzorem fizjoterapeuty oraz trenera przygotowania motorycznego.

Badani przystąpili do protokołu rehabilitacyjnego 8 tygodni od artroskopowej rekonstrukcji WKP. Natomiast do 8 tygodnia każda z grup była poddana protokołowi Melbourne ACL Rehabilitation Guide 2.0 (Cooper i Hughes). Dodatkowo grupy GHS oraz GNS zostały podzielone na 3 podgrupy składające się z 2-3 zawodników (dobór celowy uzależniony czasem 7 dni od zabiegu), dzięki czemu trener jak i fizjoterapeuta dysponował większą kontrolą nad badanymi.



GHS – grupa wykonująca trening oporowy w warunkach hipoksji normobarycznej, **GNS** – grupa wykonująca trening oporowy w warunkach normoksji, **GK** – grupa kontrolna.

Ryc. 3 Przebieg badania.

6.2. UCZESTNICY PROJEKTU

Grupę badaną stanowili zawodnicy piłki nożnej płci męskiej poziomu ekstraklasy oraz 1 ligi o medianie wieku 24,6 lat. W badaniu wzięło udział 25 zawodników. W trakcie badań na skutek choroby niewynikającej z prowadzonych badań wyeliminowany został 1 zawodnik. W każdej z grup została wyznaczona średnia wieku, masy ciała i wysokości ciała.

Tab. 1 Opis poszczególnych grup badanych.

Zmienna	Grupa											
	GHS				GNS				GK			
	M	SD	-95% CI	+95% CI	M	SD	-95% CI	+95% CI	M	SD	-95% CI	+95% CI
Wiek [lata]	25,13	3,27	22,39	27,86	25,38	3,42	22,52	28,23	23,25	2,92	20,81	25,69
Wysokość ciała [cm]	176,75	5,06	172,52	180,98	180,13	5,44	175,58	184,67	178,38	3,74	175,25	181,50
Masa ciała [kg]	73,63	8,02	66,92	80,33	77,25	6,14	72,12	82,38	79,88	8,32	72,92	86,83

M – średnia arytmetyczna, **SD** – odchylenie standardowe, **95% CI** – przedział ufności dla wartości średniej, **GHS** – grupa wykonująca trening oporowy w warunkach hipoksji normobarycznej, **GNS** – grupa wykonująca trening oporowy w warunkach normoksji, **GK** – grupa kontrolna

Przeprowadzona analiza nie wykazała istotnych statystycznie różnic w wyżej wymienionych zmiennych między grupami (wiek ($p=0,364$), wysokość ciała ($p=0,475$), masa ciała ($p=0,349$)). Można zatem uznać, że dobór próby jest właściwy i ekwiwalentny.

Analiza wyników zawartych w tabeli 1 pozwoliła na stwierdzenie, iż wiek zawodników w grupie GHS wynosił $25,13 \pm 3,27$ lat, w grupie GNS $25,38 \pm 3,42$ lat, natomiast w grupie GK $23,25 \pm 2,92$ lat. Wysokość ciała w grupie GHS wyniosła $176,75 \pm 5,06$ cm, w grupie GNS $180,13 \pm 5,44$ cm, a w grupie GK $178,38 \pm 3,74$ cm. Masa ciała w grupie GHS wyniosła $73,63 \pm 8,02$ kg, w grupie GNS $77,25 \pm 6,14$ kg, a w grupie GK $79,88 \pm 8,32$ kg.

6.3. NARZĘDZIA POMIAROWE

Przed przystąpieniem do badań uczestników poddano analizie składu ciała opartej na metodzie impedancji elektrycznej przy użyciu urządzenia InBody 370 (Biospace Co., Tokio, Japonia). Rejestrowano następujące zmienne: masę ciała (BM), masę beztłuszczową (FFM) oraz masę tłuszczową (FM). Pomiarów dokonano na czczo w godzinach porannych (8:00-9:00), z 72-godzinnym ograniczeniem treningów i spożywania alkoholu oraz płynów zawierających kofeinę i węglowodany.

6.3.1. POMIAR STĘŻENIA HORMONU WZROSTU (GH), INSULINOPODOBNEGO CZYNNIKA WZROSTU - 1 (IGF-1) ORAZ ERYTROPOETYNY (EPO)

Wyjściowo, 24 godziny przed przystąpieniem do badań od 8 tygodnia, każdy z zawodników zobligowany był do wykonania badania stężenia hormonów, gdzie za pomocą próbki krwi żyłnej o objętości 6 ml, pobranej w okolicy dołu łokciowego, z żyły przyśrodkowej przedramienia, określono spoczynkowe stężenie GH, IGF-1 oraz EPO. Bezpośrednio po pobraniu, próbki krwi zostały przetransportowane do laboratorium diagnostycznego wyznaczonego przez kierownika projektu. Określone zostały wyjściowe wartości stężenia hormonów przed przystąpieniem do protokołu treningowego, próbki krwi zostały pobrane na czczo i po całonocnym poście. Ponownych badań dokonano 30 min po każdej ostatniej jednostce mezocyklu oraz 48 h po zakończeniu protokołu treningu oporowego w celu określenia wpływu wysiłku na stężenia hormonów.

Stężenie hormonów: GH oznaczano w surowicy za pomocą aparatu Beckman Coulter IV D IRMA GH Ref. Zestaw IM 1397 (GH, ($\mu\text{g/L}$) mIU/L), z zastosowaniem metody immunoradiometrycznej (ImmunoTech spółka z ograniczoną odpowiedzialnością Praha, Czechy). Zakres kalibracji wynosił 0;0,5-100 mIU/l, a czułość wynosiła 0,1 mIU/l. IGF-1 (IGF-1 α , ng/ml) mierzono przy użyciu zestawu Beckman Coulter spółka z ograniczoną odpowiedzialnością Warszawa, Polska IV D IRMA IGF-1 nr ref. A15729 ImmunoTech spółka z ograniczoną odpowiedzialnością Praga, Czechy. Zakres kalibracji wynosił 0;25-1600 ng/ml, a czułość wynosiła 4,55 ng/ml. EPO mierzono za pomocą systemu Sandwich ELISA (zestaw) BioVentor-Laboratorium medicina. Zakres kalibracji wynosił 1,6–100 mIU/ml, a czułość wynosiła 0,14 mIU/ml.

6.3.2. BADANIE Z WYKORZYSTANIEM DYNAMOMETRU IZOKINETYCZNEGO

Uwzględniając krótki okres pozabiegowy (8 tyg.) po konsultacji z lekarzem prowadzącym oraz przeglądzie literatury odstąpiono od oceny siły mięśniowej w warunkach izokinetycznych (Ong i in. 2024; Lemiesz i in. 2011; Wenning i in. 2023). Działanie to umożliwiło analizę skuteczności zastosowanej koncepcji periodyzacji w protokole rehabilitacyjnym, ze szczególnym uwzględnieniem prewencji maladaptacji (krytycznych zmiany przeciążeniowych). Dodatkowo pierwszy mezocykl w warunkach hipoksji

normobarycznej miał za zadanie wywołać adaptacje nerwowo-mięśniowe dzięki periodyzacji bazującej na wydłużonej fazie ekscentrycznej, jak i adaptacji metabolicznej wynikającej z holistycznych założeń struktury periodyzacji oraz symulowanych warunków wysokogórskich. Dlatego pierwszych pomiarów będących jednocześnie pomiarami wyjściowymi dokonano w 12 tygodniu od zabiegu, natomiast drugi, będący końcowym 48 h po ostatnim mezocyklu (32 tygodnie od zabiegu) w godzinach popołudniowych. Zawodnicy zostali poddani badaniu na urządzeniu izokinetycznym Humac Norm (dokładność pomiaru $\pm 3,4$ Nm) (humacnorm.com) w celu określenia PT (Nm). Dzięki czemu wyznaczono:

- różnicę wartości PT zginaczy stawu kolanowego kończyny dolnej operowanej w stosunku do kończyny nieoperowanej – **APTZ**;
- różnicę wartości PT prostowników stawu kolanowego kończyny dolnej operowanej w stosunku do kończyny nieoperowanej – **ATP**;
- stosunek PT mięśni prostowników względem zginaczy stawu kolanowego – **RTPZ**.

Wiarygodność pomiarów siły mięśniowej przy użyciu izokinetycznego dynamometru Humac Norm u pacjentów po rekonstrukcji WKP oceniana jest jako dobra do bardzo dobrej. W badaniach dotyczących pomiarów siły mięśni zginaczy i prostowników stawu kolanowego, współczynniki korelacji wewnątrzklasowej (ICC) mieszczą się w zakresie od 0,74 do 0,89, co wskazuje na wysoką powtarzalność wyników. W badaniu Habets i in. (2018) oceniano wiarygodność pomiarów siły mięśni zginaczy i prostowników stawu przy użyciu dynamometru Humac Norm. Wyniki wykazały dobre do bardzo dobrej wiarygodności, z wartościami ICC dla testów kolana w zakresie od 0,74 do 0,89.

Poddano ocenie grupy mięśniowe aktywowane w pracy koncentrycznej przy obciążeniu izokinetycznym (stałym) w warunkach klinicznych. Urządzenie skalibrowano zgodnie z instrukcją producenta. Przed badaniem uczestnicy wykonywali 10-minutową rozgrzewkę na cykloergometrze stacjonarnym (70-80 obrotów/min). W celu zapoznania się z urządzeniem Humac Norm i procedurami badania, zawodnicy przed właściwym testem wykonywali trzy powtórzenia submaksymalne i dwa maksymalne. Pomiedzy powtórzeniami zapewniono 30-sekundową przerwę wypoczynkową, a pomiędzy seriami 3-minutową przerwę wypoczynkową. Przed rozpoczęciem testu udzielono ustnych instrukcji, aby podczas testu wygenerować jak największy moment siły mięśniowej. Ponadto w trakcie badania stosowano motywację werbalną, natomiast ekran komputera ustawiono tak, aby uczestnicy mogli otrzymywać informację zwrotną w czasie rzeczywistym (feedback).

Dokonano oceny prostowników oraz zginaczy stawów kolanowych przy prędkościach kątowych:

- 60°/s – 1 powtórzenie próbne oraz 5 powtórzeń testowych;
- 120°/s – 1 powtórzenie próbne oraz 5 powtórzeń testowych;
- 180°/s – 1 powtórzenie próbne oraz 15 powtórzeń testowych.

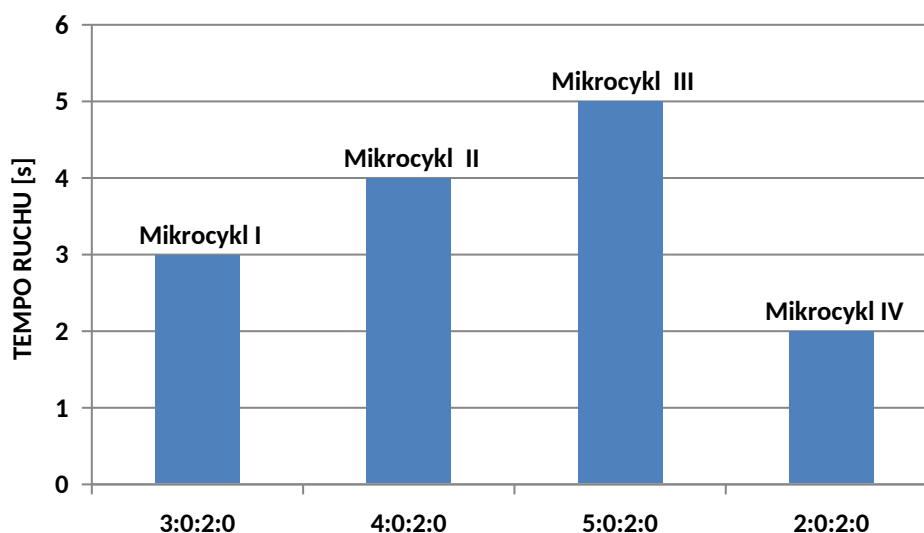
Oceniany zakres ruchomości stawu ustalany był od pełnego wyprostu do 90° zgięcia stawu kolanowego przez zawodnika. W trakcie badania zwracano uwagę by wykonywać ruch w pełnym ustalonym zakresie.

Zawodnicy do testu ustawieni byli w pozycji siedzącej przy kącie oparcia 85°. Tułów ustabilizowany został pasami do oparcia celem minimalizacji kompensacji. Dobór pozostałych parametrów dotyczących ustawienia fotela oraz dynamometru został dobrany zgodnie z zaleceniami producenta z uwzględnieniem budowy ciała osób testowanych. Kończyny dolne ustabilizowane były pasami. Pierwszy przytwierdzono do siedziska na wysokości dystalnej części uda, a drugi w dystalnej części podudzia, gdzie dźwignia znajdowała się nad górną krawędzią kostki przyśrodkowej badanej kończyny. Badanie każdorazowo oceniano zaczynając od kończyny dolnej nieoperowanej, następnie oceniając operowaną celem minimalizacji ryzyka manipulacji wynikami.

6.4. PROTOKÓŁ TRENINGU OPOROWEGO

Protokół obejmował 5 mezocykli. Każdy z nich składał się z 4 mikrocykli trwających 7 dni. Osoby badane wykonywały po 3 jednostki treningowe (poniedziałek, środa, piątek) w obrębie każdego mikrocyklu. We wszystkich mezocyklach został wykorzystany rozkład obciążenia krokowego 3:1 celem uniknięcia maladaptacji (Motowidło i in. 2024; Bompa i Buzzichelli 2015). Rozkład zakładał wydłużanie czasu trwania napięcia mięśniowego w fazie ekscentrycznej (Ryc. 4):

- I mikrocykl 3:0:2:0;
- II mikrocykl 4:0:2:0;
- III mikrocykl 5:0:2:0;
- IV mikrocykl odciążeniowy 2:0:2:0.



Ryc. 4 Tempo ruchu (3:0:2:0) faza ekscentryczna: faza izometryczna: faza koncentryczna: faza izometryczna.

Z braku możliwości wyznaczenia ciężaru 1RM zawodnicy posługiwali się w protokole treningowym doбором obciążenia zewnętrznego w postaci skali RPE (z ang. Rating Perceived Exertion) (Tab. 2), która stanowi ocenę postrzeganego wysiłku z wykorzystaniem skali opartej na powtórzeniach w rezerwie, czyli RIR (z ang. Reps In Reserve) (Tab. 2). Bezpośrednio przed rozpoczęciem każdego mikrocyklu uczestnicy badania byli poddawani 20-minutowej terapii manualnej ukierunkowanej na mobilizację blizn pozabiegowych w warunkach hipoksji, co jednocześnie stanowiło formę adaptacji do symulowanego środowiska wysokogórskiego. Następnie wykonywana była dwuetapowa rozgrzewka: pierwszy etap zakładający 10 min rozgrzewki o charakterze krążeniowo-oddechowym (marsz 5 km/h wznos 5°) z wykorzystaniem bieżni ruchomej w celu adaptacji czynności fizjologicznych z poziomu spoczynkowego na wysiłkowy w zakresie mechanizmów zaopatrzenia tlenowego, termoregulacji, zapotrzebowania energetycznego i gospodarki wodno-elektrolitowej oraz gruczołu wydzielania wewnętrznego. Drugi końcowy trwał 5 min i polegała na wykonaniu kilku ćwiczeń oporowych składających się z 2 serii, takich jak: przysiad, przysiad w wykroku, uginanie ramion w podporze przodem w oparciu o skalę RPE uwzględniającą strefę 1-4 nisko intensywną. Blok treningowy każdego mezocyklu składał się z 3 oddzielnych jednostek treningowych (poniedziałek – trening bilateralny, środa – trening krążeniowo-oddechowy, piątek – trening unilateralny). Każda jednostka treningowa składała się z 6 ćwiczeń, z czego 4 ukierunkowane były na kończyny dolne, które zostały wymienione w poniższej tabeli 4 oraz przedstawione na rycinach

zamieszczonych w aneksie na końcu pracy (Ryc. 17-69). Osoba na rycinach wyraziła zgodę na opublikowanie wizerunku. Każde z ćwiczeń składało się z 3 serii po 12 powtórzeń w przypadku ćwiczeń BIL, natomiast ćwiczenia UNI 3 serii po 12 powtórzeń na kończyne (RPE 8, RIR 2). Przerwa wypoczynkowa pomiędzy seriami wynosiła 50 s natomiast pomiędzy ćwiczeniami 2:30 min. Po zakończonym treningu zawodnicy wykonywali 5 min rolowania.

Tab. 2 Skala RPE wraz z odpowiednim RIR oraz opisem intensywności wysiłku.

RPE	RIR	Znaczenie
10	0	Wysiłek maksymalny
9,5	0-1	
9	1	Wysiłek ciężki
8,5	1-2	
8	2	Wysiłek mocny
7,5	2-3	
7	3	Wysiłek średni
5-6	4-6	Wysiłek lekki
1-4	>6	

RPE – subiektywna ocena postrzeganego wysiłku, RIR – powtórzenia w zapasie

Tab. 3 Całkowita objętość treningu oporowego zastosowana w protokole.

Tempo ruchu	TUT w serii (s/min)		Całkowity TUT w trakcie jednostki treningowej (s/min)		Całkowity czas jednostki treningowej (min)		Całkowity czas przebywania w komorze hipoksji (min)	
	BIL	UNI	BIL	UNI	BIL	UNI	BIL	UNI
3:0:2:0	60/1	120/2	1080/18	2160/36	40,5	58,5	80,5	98,5
4:0:2:0	72/1,2	144/2,4	1296/21,6	2592/43,2	44,1	65,7	84,1	105,7
5:0:2:0	84/1,4	168/2,8	1512/25,2	3024/50,4	47,7	72,9	87,7	112,9
2:0:2:0	48/0,8	96/1,6	864/14,4	1728/28,8	36,9	51,3	76,9	91,3

TUT – łączny czas pod napięciem, BIL – ćwiczenia bilateralne, UNI – ćwiczenia unilateralne

Tab. 4 Program ćwiczeń wykonywany przez zawodników w trakcie badań w grupach GHS oraz GNS.

M	I		II		III		IV		V	
UNI/ BIL	UNI	BIL	UNI	BIL	UNI	BIL	UNI	BIL	UNI	BIL
1	DSS (Ryc. 17)	DS (Ryc. 23)	GSSD (Ryc. 29)	DGS (Ryc. 35)	DL (Ryc. 41)	BSHB (Ryc. 47)	BSS (Ryc. 53)	BSLB (Ryc. 57)	WPS (Ryc. 60)	FS (Ryc. 65)
2	SBLC (Ryc. 18)	BSLD (Ryc. 24)	SSTB RDL (Ryc. 30)	TBD (Ryc. 36)	SLEHT (Ryc. 42)	EHT (Ryc. 48)	SSD (Ryc. 54)	DEL (Ryc. 58)	DSLJS (Ryc. 61)	DJS (Ryc. 66)
3	SADFP (Ryc. 19)	FP (Ryc. 25)	SSDMP (Ryc. 31)	SOHDP (Ryc. 37)	BSADR (Ryc. 43)	SBDR (Ryc. 49)	SBSACP (Ryc. 55)	SBDGP (Ryc. 59)	HHSAFP (Ryc. 62)	HHFP (Ryc. 67)
4	SLGB (Ryc. 20)	GB (Ryc. 26)	SLHT (Ryc. 32)	HT (Ryc. 38)	SLCR (Ryc. 44)	CR (Ryc. 50)	DSU (Ryc. 56)	DS (Ryc. 23)	SLEHTJ (Ryc. 63)	EHTJ (Ryc. 68)
5	SATGLR (Ryc. 21)	TGLR (Ryc. 27)	SAFP (Ryc. 33)	DFP (Ryc. 39)	SBSLGB (Ryc. 45)	SBLCU (Ryc. 51)	SATGLR (Ryc. 21)	TGLR (Ryc. 27)	SBSLC (Ryc. 64)	SWBLC (Ryc. 69)
6	SLP (Ryc. 22)	LP (Ryc. 28)	LSAT (Ryc. 34)	LT (Ryc. 40)	SBSACF (Ryc. 46)	SBDGP (Ryc. 52)	SLP (Ryc. 22)	LP (Ryc. 28)	LSAT (Ryc. 34)	LT (Ryc. 40)

BIL – ćwiczenia bilateralne, **UNI** – ćwiczenia unilateralne, **DSS** – przysiad wykroczny z hantlami (ruch inicjowany z kończyny zakrocznej), **SBLC** – uginanie kończyny dolnej w pozycji siedzącej z taśmą oporową, **SADFP** – wyciskanie hantla jednorącz sprzed klatki piersiowej w pozycji leżącej, **SLGB** – wznos bioder jednonóż ze sztangą, **SATGLR** – wiosłowanie półsztangą jednorącz w opadzie tułowia, **SLP** – wypychanie jednonóż na suwnicy, **DS** – przysiad z hantlami, **BSLD** – martwy ciąg ze sztangą o prostych nogach, **FP** – wyciskanie sztangi leżąc, **GB** – wznos bioder ze sztangą, **TGLR** – wiosłowanie półsztangą w opadzie tułowia, **LP** – wypychanie kończyn dolnych na suwnicy obunóż, **SSTB RDL** – rumuński martwy ciąg z wykorzystaniem sztangi, haksagonalnej z pozycji wykroczno-zakrocznej, **SSDMP** – wyciskanie hantla jednorącz nad głowę w pozycji siedzącej z napięciem izometrycznym (przeciwny hantel), **SLHT** – unoszenie bioder jednonóż w oparciu o skrzynię, **SAFP** – przyciąganie jednorącz gumy oporowej, **LSAT** – przysiad z jednoczesnym wyciskaniem półsztangi sprzed klatki piersiowej jednorącz, **DGS** – przysiad z hantlem, **TBD** – martwy ciąg obunóż z wykorzystaniem sztangi haksagonalnej, **SOHDP** – wyciskanie hantli nad głowę w pozycji siedzącej, **HT** – unoszenie bioder w oparciu o skrzynię, **DFP** – przyciąganie hantli do twarzy w opadzie tułowia, **LT** – przysiad z jednoczesnym wyciskaniem półsztangi sprzed klatki piersiowej oburącz, **DL** – przysiad wykroczny z hantlami, **SLEHT** – unoszenie bioder jednonóż ze sztangą w oparciu o skrzynię, stopa oparta na podwyższeniu, **BSADR** – wiosłowanie jednorącz hantlem w oparciu o skrzynię, **SLCR** – wspięcie na palce jednonóż z hantlami, **SBSLGB** – unoszenie bioder jednonóż ze stopą opartą o piłkę szwedzką, **SBSACF** – rozpiętki jednorącz z hantlem na piłce szwedzkiej, druga kończyna górna napięcie izometryczne, **BSHB** – przysiad ze sztangą z tyłu, **EHT** – unoszenie bioder ze sztangą w oparciu o skrzynię, stopa oparta na podwyższeniu, **SBDR** – uginanie oburącz hantli z leżenia na piłce szwedzkiej, **CR** – wspięcie na palce obunóż z hantlami, **SBLCU** – wznos bioder z jednoczesnym ugięciem kończyn dolnych w stawie kolanowym na piłce szwedzkiej, **SBDGP** – rozpiętki z hantlami na piłce szwedzkiej, **BSS** – przysiad bułgarski, **SSD** – martwy ciąg z pozycji wykroczno-zakrocznej, **SBSACP** – wyciskanie hantla jednorącz na piłce szwedzkiej z izometrycznym utrzymaniem hantla w przeciwstawnej kończynie górnej, **DSU** – wejście na skrzynię z hantlami, **BSLB** – przysiad tylny ze sztangą ustawioną nisko, **DEL** – martwy ciąg, **SBDGP** – wyciskanie hantli leżąc na piłce szwedzkiej, **WPS** – przysiad jednonóż z kettlelem (chwyt kielichowy), **DSLJS** – unilateralny przysiad z jednoczesnym wyskokiem jednonóż z hantlami, **HHSAFP** – wyciskanie hantla jednorącz z pozycji leżącej (z uniesionym tułowiem i kończynami dolnymi), **SLEHTJ** – unilateralny wznos bioder (sztanga na biodrach) na podwyższeniu z jednoczesnym wybiciem w końcowej fazie ruchu koncentrycznego, **SBSLC** – wznos bioder z jednoczesnym ugięciem kończyny dolnej w stawie kolanowym na piłce szwedzkiej, **FS** – przysiad ze sztangą z przodu, **DJS** – przysiad z jednoczesnym wyskokiem obunóż z hantlami, **HHFP** – wyciskanie hantli oburącz w pozycji leżącej (z uniesieniem tułowia i kończynami dolnymi), **EHTJ** – unoszenie bioder ze sztangą w oparciu o skrzynię na podwyższeniu, **SWBLC** – zginanie kończyn dolnych na piłce szwedzkiej leżąc.

7. NARZĘDZIA ANALIZY STATYSTYCZNEJ

W dysertacji ocenom poddano zmienne o charakterze ilościowym (skala ilorazowa) (Mayntz i in. 1985). Analiza takich danych posiada swoją specyfikę, polegającą na zastosowaniu do porównań adekwatnych narzędzi statystycznych. W celu scharakteryzowania struktury badanych zmiennych obliczono podstawowe statystyki opisowe w postaci miar położenia (średnia arytmetyczna) i zmienności (odchylenie standardowe) oraz zweryfikowano normalności rozkładów analizowanych zmiennych przy pomocy testu Shapiro-Wilka przyjmując poziom istotności równy 0,001. Jednorodność wariancji zweryfikowano przy pomocy testu Levene'a. Obliczono również 95% przedziały ufności dla wartości średniej. Do weryfikacji istotności różnic zastosowano analizę wariancji z powtarzanymi pomiarami (Babbie, 2003). Weryfikacji poddano również założenia o sferyczności przy pomocy testu Mauchley'a, a gdy założenie nie było spełnione stosowano poprawkę Greenhousa-Geissera. Dla zmiennych z rozkładem odbiegającym od normalnego zastosowano nieparametryczny odpowiednik parametrycznego testu ANOVA czyli test Friedmana, który również stosowany jest do pomiarów powtarzanych. W przypadku wystąpienia istotnych statystycznie różnic w analizie wariancji, do weryfikacji pomiędzy którymi grupami wystąpiły istotne różnice, zastosowano testy wielokrotnych porównań post-hoc Tuckeya dla równych licznosci oraz test wielokrotnych porównań Durбина-Conovera. Siłę efektu dla interakcji obliczono przy pomocy współczynnika η^2 . Siła efektu była klasyfikowana jako słaba, gdy η^2 należała do przedziału 0,01-0,059; przeciętna 0,06-0,137 oraz duża $> 0,137$ (Prajzner, 2022). Wszystkie analizy wykonano przy pomocy pakietu Statistica 13.1. Dla testów z powtarzanymi pomiarami przyjęto poziom istotności równy 0,05 (Frankfort-Nachmias, Nachmias, 2001).

Ponieważ PT zostały wyrażone w wartościach uzyskanych z uwzględnieniem beztłuszczowej masy ciała (FFM) wartość FFM obliczona została ze wzoru:

$$\text{FFM} = \text{TBM} - \text{FM}$$

gdzie:

- FFM to beztłuszczowa masa ciała;
- TBM to całkowita masa ciała;
- FM to masa tłuszczowa.

8. WYNIKI BADAŃ

8.1. ANALIZY WSTĘPNE – STATYSTYKI OPISOWE DLA STĘŻENIA INSULINOPODOBNEGO CZYNNIKA WZROSTU-1 (IGF-1), HORMONU WZROSTU (GH) ORAZ ERYTROPOETYNY (EPO)

Analizę wyników rozpoczęto od obliczenia podstawowych statystyk opisowych dla stężenia IGF-1, GH oraz EPO przedstawionych w tabeli 5.

Tab. 5 Podstawowe statystyki opisowe dla stężenia insulinopodobnego czynnika wzrostu-1 (IGF-1), hormonu wzrostu (GH) oraz erytropoetyny (EPO).

Zmienna	Grupa														
	GHS					GNS					GK				
	M	SD	SWC	-95% CI	+95% CI	M	SD	SWC	-95% CI	+95% CI	M	SD	SWC	-95% CI	+95% CI
IGF-1 - przed	251,65	113,00	22,6	157,18	346,12	248,88	118,22	23,64	150,04	347,71	200,50	74,81	14,96	137,96	263,04
IGF-1 - 30 min po treningu	319,88	110,29		227,67	412,08	257,25	117,03		159,41	355,09	198,38	73,24		137,15	259,60
IGF-1 - po	260,38	111,14		167,46	353,29	249,50	118,84		150,14	348,86	200,38	75,01		137,66	263,09
GH – przed	2,39	0,71	0,14	1,79	2,98	1,91	1,15	0,23	0,95	2,87	0,66	0,79	0,16	0,001	1,31
GH - 30 min po treningu	17,24	4,82		13,21	21,26	4,26	1,78		2,77	5,75	0,75	0,82		0,061	1,43
GH – po	2,53	0,66		1,97	3,08	1,93	1,08		1,02	2,83	0,75	0,71		0,15	1,34
EPO – przed	7,17	4,09	0,82	3,75	10,58	8,40	2,73	0,55	6,12	10,68	7,57	2,30	0,46	5,64	9,49
EPO - 30 min po treningu	11,22	4,75		7,25	15,19	8,98	2,74		6,69	11,27	8,13	2,65		5,91	10,34
EPO – po	11,04	4,69		7,12	14,95	8,65	2,68		6,41	10,89	7,62	2,37		5,64	9,61

M – średnia arytmetyczna, SD – odchylenie standardowe, SWC – najmniejsza istotna zmiana, 95% CI – przedział ufności dla wartości średniej, GHS – grupa wykonująca trening oporowy w warunkach hipoksji normobarycznej, GNS – grupa wykonująca trening oporowy w warunkach normoksji, GK – grupa kontrolna, EPO – przed – wartość stężenia erytropoetyny przed przystąpieniem do eksperymentu, EPO – 30 min po treningu – średnia wartość stężenia erytropoetyny 30 min po każdym ostatnim treningu z każdego mezocyklu, EPO – po – stężenie erytropoetyny 48h po zakończeniu eksperymentu, GH – przed – wartość stężenia hormonu wzrostu przed przystąpieniem do eksperymentu, GH - 30 min po treningu – średnia wartość stężenia hormonu wzrostu 30 min po każdym ostatnim treningu z każdego mezocyklu, GH – po – wartość stężenia hormonu wzrostu 48h po zakończeniu eksperymentu, IGF-1 – przed – wartość stężenia insulinopodobnego czynnika wzrostu-1 przed przystąpieniem do eksperymentu, IGF-1 – 30 min po treningu – średnia wartość stężenia insulinopodobnego czynnika wzrostu-1 30 min po każdym ostatnim treningu z każdego mezocyklu, IGF-1 – po – wartość stężenia insulinopodobnego czynnika wzrostu-1 48h po zakończeniu eksperymentu.

Weryfikację normalności rozkładów przeprowadzono w oparciu o test Shapiro-Wilka, w przypadku wszystkich zmiennych nie stwierdzono podstaw do odrzucenia hipotezy zerowej o normalności rozkładu $p > 0,05$. Zweryfikowano również jednorodność wariancji przy

pomocy testu Levene'a, wyniki nie pozwoliły na odrzucenie hipotezy zerowej mówiącej o jednorodności wariancji $p > 0,05$. Z tego względu do analiz istotności różnic dla wartości średniej zastosowano analizę wariancji z powtarzanymi pomiarami.

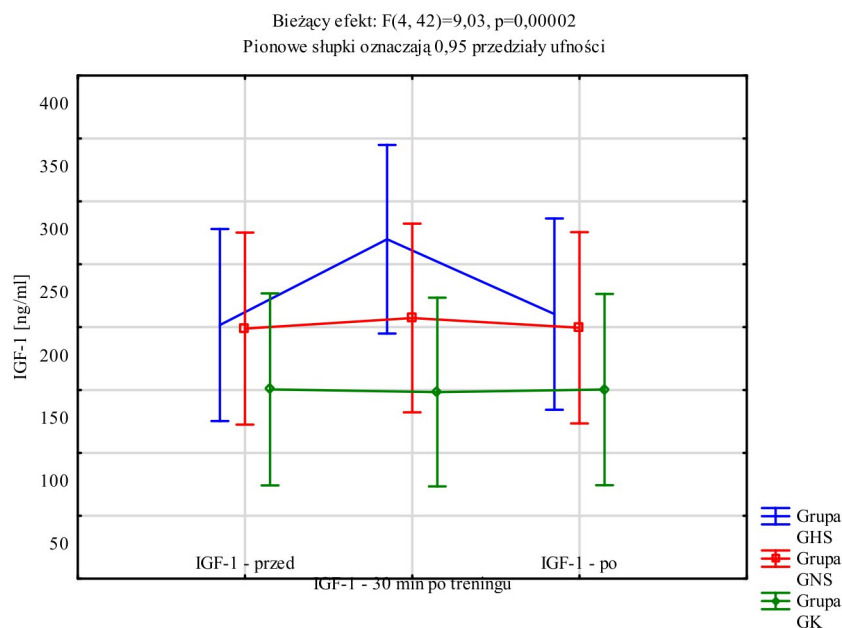
8.2. ANALIZA WARTOŚCI STĘŻENIA INSULINOPODOBNEGO CZYNNIKA WZROSTU-1 (IGF-1)

Tab. 6 Analiza wariancji z powtarzanymi pomiarami dla stężenia insulinopodobnego czynnika wzrostu-1 (IGF-1).

Efekt	F	p	η^2
Grupa	1,20	0,319	0,10
Przed-po	11,64	0,00001	0,36
Przed-po * grupa	9,029	0,000023	0,46

F – wyniki testu F, p – prawdopodobieństwo testowe, η^2 – siła efektu, **Grupa** – efekt główny porównujący różnice między badanymi grupami (GHS, GNS, GK) niezależnie od czasu pomiaru, **Przed-po** – efekt główny czasu, pokazujący zmianę pomiędzy pomiarem „przed” a „po” niezależnie od przynależności do grupy, **Przed-po * grupa** – efekt interakcji między czasem pomiaru, a grupą; informuje, czy zmiana pomiędzy pomiarem „przed” a „po” różni się w zależności od grupy (GHS, GNS, GK).

Analiza wyników zawartych w tabeli 6 pozwoliła na stwierdzenie istotnych różnic dla IGF-1 tylko w przypadku efektu głównego Przed-po $F=11,64$; $p=0,00001$; $\eta^2=0,36$ oraz dla interakcji $F=9,029$; $p=0,000023$; $\eta^2=0,46$. Aby stwierdzić pomiędzy którymi grupami wystąpiły istotne różnice w dalszych analizach zastosowano testy wielokrotnych porównań post-hoc Tuckeya. Istotne różnice stwierdzono tylko w przypadku grupy GHS pomiędzy wynikami IGF-1 przed, a 30 min po treningu $p=0,00014$ (istotnie statystycznie wyższy wynik 30 minut po treningu) oraz pomiędzy wynikami 30 min po treningu, a wynikami po eksperymencie $p=0,00014$ (istotnie wyższy wynik IGF-1 30 min po treningu). Nie stwierdzono istotnych różnic pomiędzy wynikami przed i po eksperymencie $p=0,99$. Wyniki te potwierdza również poniższa rycina 5.



Ryc. 5 Porównanie wartości średnich stężenia insulinopodobnego czynnika wzrostu-1 (IGF-1) w poszczególnych grupach badanych w kolejnych pomiarach.

8.3. ANALIZA WARTOŚCI STĘŻENIA HORMONU WZROSTU (GH)

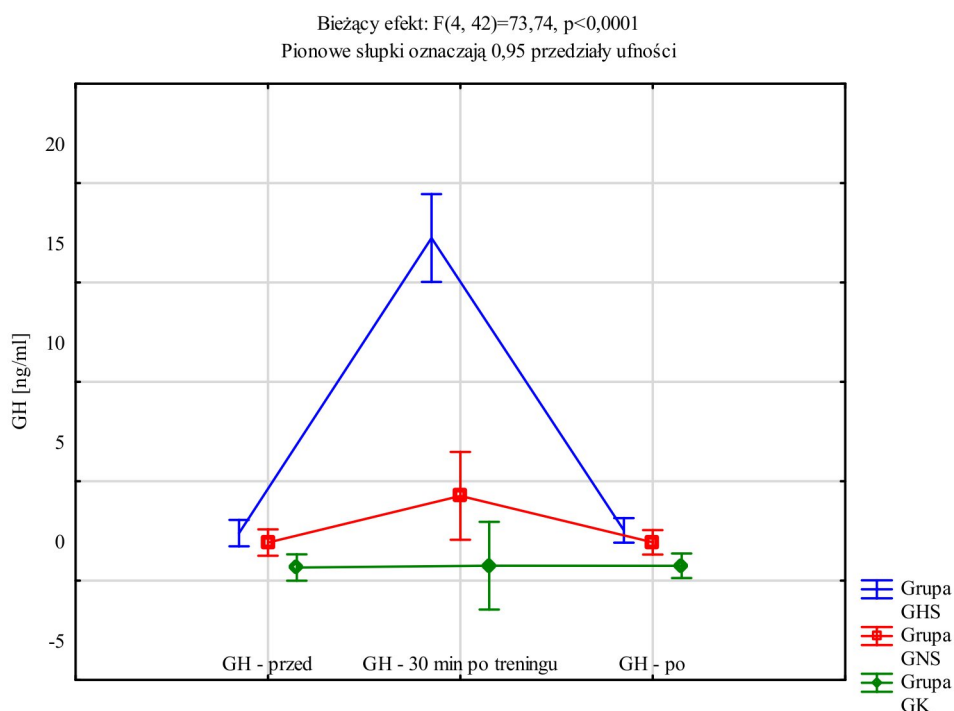
Tab. 7 Analiza wariancji z powtarzanymi pomiarami dla stężenia hormonu wzrostu (GH).

Efekt	F	p	η^2
Grupa	46,97	<0,00001	0,82
Przed-po	115,33	<0,00001	0,85
Przed-po *grupa	73,74	<0,00001	0,87

F – wyniki testu F, p – prawdopodobieństwo testowe, η^2 – siła efektu, **Grupa** – efekt główny porównujący różnice między badanymi grupami (GHS, GNS, GK) niezależnie od czasu pomiaru, **Przed-po** – efekt główny czasu, pokazujący zmianę pomiędzy pomiarem „przed”, a „po” niezależnie od przynależności do grupy, **Przed-po * grupa** – efekt interakcji między czasem pomiaru, a grupą; informuje, czy zmiana pomiędzy pomiarem „przed”, a „po” różni się w zależności od grupy (GHS, GNS, GK).

Analiza wyników zawartych w tabeli 7 pozwoliła na stwierdzenie istotnych różnic dla GH w przypadku efektu głównego Przed-po $F=115,33$; $p<0,00001$; $\eta^2=0,85$, efektu głównego grupa po $F=46,97$; $p<0,00001$; $\eta^2=0,82$ oraz dla interakcji $F=73,74$; $p<0,00001$; $\eta^2=0,87$. Istotne różnice stwierdzono w przypadku grupy GHS pomiędzy wynikami GH przed, a 30 min po treningu $p=0,00014$ (istotnie statystycznie wyższy wynik 30 minut po treningu) oraz pomiędzy wynikami 30 min po treningu, a wynikami po eksperymencie $p=0,00014$ (istotnie wyższy wynik GH 30 min po treningu). Nie stwierdzono istotnych różnic

między wynikami przed i po eksperymencie $p=0,99$. Stwierdzono również istotne statystycznie różnice pomiędzy wynikami 30 minut po treningu w grupie GHS, a wynikami 30 minut po treningu w grupach GNS $p=0,0001$ oraz GK $p=0,0001$. Istotnie statystycznie wyższe wyniki były w grupie GHS. Wyniki te potwierdza również poniższa rycina 6.



Ryc. 6 Porównanie wartości średnich stężenia hormonu wzrostu (GH) w poszczególnych grupach badanych w kolejnych pomiarach.

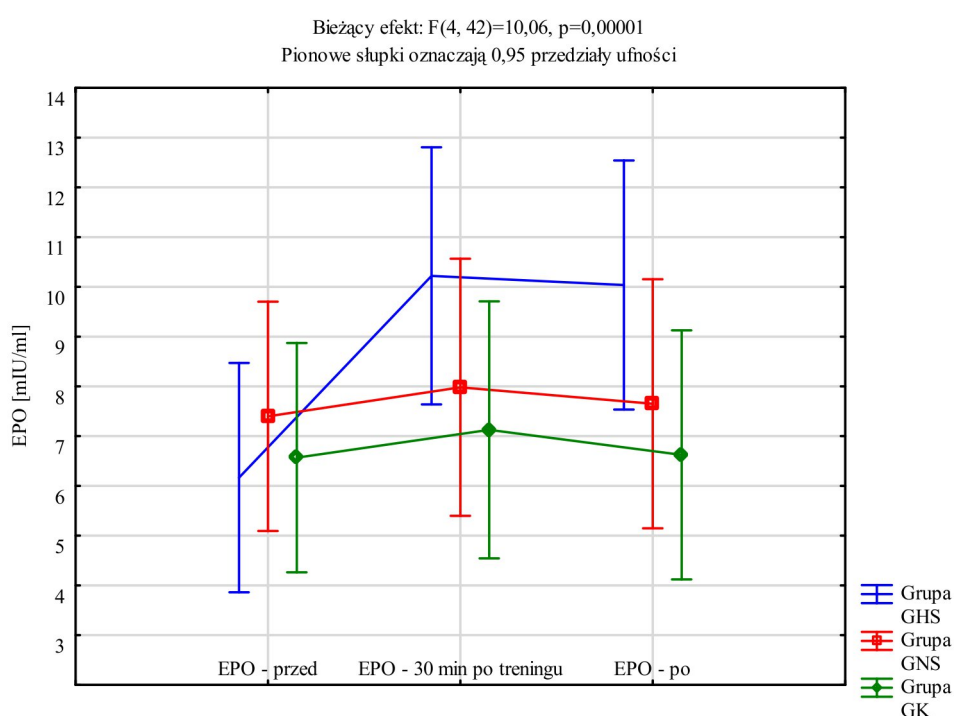
8.4. ANALIZA WARTOŚCI STĘŻENIA ERYTROPOETYNY (EPO)

Tab. 8 Analiza wariancji z powtarzanymi pomiarami dla stężenia erytropoetyny (EPO).

Efekt	F	p	η^2
Grupa	0,79	0,47	0,070
Przed-po	17,56	0,000003	0,46
Przed-po * grupa	10,061	0,00001	0,49

F – wyniki testu F, **p** – prawdopodobieństwo testowe, **η^2** – siła efektu, **Grupa** – efekt główny porównujący różnice między badanymi grupami (GHS, GNS, GK) niezależnie od czasu pomiaru, **Przed-po** – efekt główny czasu, pokazujący zmianę pomiędzy pomiarem „przed”, a „po” niezależnie od przynależności do grupy, **Przed-po * grupa** – efekt interakcji między czasem pomiaru, a grupą; informuje, czy zmiana pomiędzy pomiarem „przed”, a „po” różni się w zależności od grupy (GHS, GNS, GK).

Analiza wyników zawartych w tabeli 8 pozwoliła na stwierdzenie istotnych różnic dla EPO tylko w przypadku efektu głównego Przed-po $F=17,56$; $p=0,000003$; $\eta^2=0,46$ oraz dla interakcji $F=10,061$; $p=0,00001$; $\eta^2=0,49$. Istotne różnice stwierdzono tylko w przypadku grupy GHS pomiędzy wynikami EPO przed, a 30 min po treningu $p=0,00014$ (istotnie statystycznie wyższy wynik 30 minut po treningu) oraz pomiędzy wynikami przed, a wynikami po eksperymencie $p=0,00014$ (istotnie wyższy wynik EPO po eksperymencie). Nie stwierdzono istotnych różnic pomiędzy wynikami 30 minut po treningu, a wynikami po eksperymencie $p=0,99$. Wyniki te potwierdza również poniższa rycina 7.



Ryc. 7 Porównanie wartości średnich stężenia erytropoetyny (EPO) w poszczególnych grupach badanych w kolejnych pomiarach.

8.5. ANALIZY WSTĘPNE – STATYSTYKI OPISOWE DLA RÓŻNICY WARTOŚCI SZCZYTOWEGO MOMENTU OBROTOWEGO PROSTOWNIKÓW (APTP) ORAZ ZGINACZY (APTZ) STAWU KOLANOWEGO KOŃCZYNY DOLNEJ OPEROWANEJ WZGLĘDEM KOŃCZYNY NIEOPEROWANEJ ORAZ W ZALEŻNOŚCI OD PRĘDKOŚCI KĄTOWEJ OCENIANEJ Z WYKORZYSTANIEM DYNAMOMETRU IZOKINETYCZNEGO

W kolejnych analizach obliczono podstawowe statystyki dla asymetrii mięśniowej.

Tab. 9 Podstawowe statystyki opisowe dla oceny szczytowego momentu obrotowego (PT) z wykorzystaniem dynamometru izokinetycznego.

PT [%]	Zmienne	Grupa														
		GHS					GNS					GK				
		M	SD	SWC	-95% CI	+95% CI	M	SD	SWC	-95% CI	+95% CI	M	SD	SWC	-95% CI	+95% CI
60°/s	APTP - przed	22,38	16,51	3,30	8,57	36,18	28,88	16,24	3,25	15,30	42,45	34,25	26,35	5,27	12,22	56,28
	APTP - po	9,25	3,69		6,16	12,34	13,00	13,75		1,50	24,50	22,63	23,92		2,63	42,62
	APTZ - przed	13,88	11,38	2,28	4,36	23,39	20,88	13,27	2,65	9,78	31,97	16,25	8,41	1,68	9,22	23,28
	APTZ - po	6,50	4,81		2,48	10,52	13,50	9,58		5,49	21,51	11,13	8,18		4,28	17,97
120°/s	APTP - przed	21,63	20,04	4,01	4,88	38,37	24,75	15,84	3,17	11,51	37,99	30,38	26,13	5,23	8,53	52,22
	APTP - po	9,13	7,30		3,02	15,23	16,00	9,84		7,77	24,23	25,13	21,00		7,57	42,68
	APTZ - przed	11,88	9,72	1,94	3,75	20,00	13,75	7,74	1,55	7,28	20,22	17,38	8,63	1,73	10,16	24,59
	APTZ - po	7,13	8,13		0,33	13,92	10,88	9,09		3,27	18,48	14,63	13,86		3,04	26,21
180°/s	APTP - przed	18,00	12,96	2,59	7,16	28,84	25,25	16,10	3,22	11,79	38,71	27,63	23,62	4,72	7,88	47,37
	APTP - po	9,63	8,57		2,46	16,79	15,00	7,78		8,49	21,51	20,63	18,75		4,95	36,30
	APTZ - przed	7,88	5,28	1,06	3,46	12,29	15,75	7,15	1,43	9,78	21,72	13,63	11,77	2,35	3,78	23,47
	APTZ - po	7,13	5,57		2,47	11,78	13,25	6,14		8,12	18,38	9,75	9,90		1,48	18,02

M – średnia arytmetyczna, **SD** – odchylenie standardowe, **SWC** – najmniejsza istotna zmiana, **95% CI** – przedział ufności dla wartości średniej, **GHS** – grupa wykonująca trening oporowy w warunkach hipoksji normobarycznej, **GNS** – grupa wykonująca trening oporowy w warunkach normoksji, **GK** – grupa kontrolna, **PT** – szczytowy moment obrotowy, **APTP przed** – różnica w wartości szczytowego momentu obrotowego prostowników stawu kolanowego kończyny operowanej względem kończyny nieoperowanej w pierwszym pomiarze, **APTP po** – różnica w wartości szczytowego momentu obrotowego prostowników stawu kolanowego kończyny operowanej względem kończyny nieoperowanej w drugim pomiarze, **APTZ przed** – różnica w wartości szczytowego momentu obrotowego zginaczy stawu kolanowego kończyny operowanej względem kończyny nieoperowanej w pierwszym pomiarze, **APTZ po** – różnica w wartości szczytowego momentu obrotowego zginaczy stawu kolanowego kończyny operowanej względem kończyny nieoperowanej w drugim pomiarze.

W tabeli 9 przeprowadzono weryfikację normalności rozkładów w oparciu o test Shapiro-Wilka, w przypadku wszystkich zmiennych nie stwierdzono podstaw do odrzucenia hipotezy zerowej o normalności rozkładu $p > 0,05$. Zweryfikowano również jednorodność wariancji przy pomocy testu Levene'a, wyniki nie pozwoliły na odrzucenie hipotezy zerowej mówiącej

o jednorodności wariancji $p > 0,05$. Z tego względu do analiz istotności różnic dla wartości średniej zastosowano analizę wariancji z powtarzanymi pomiarami.

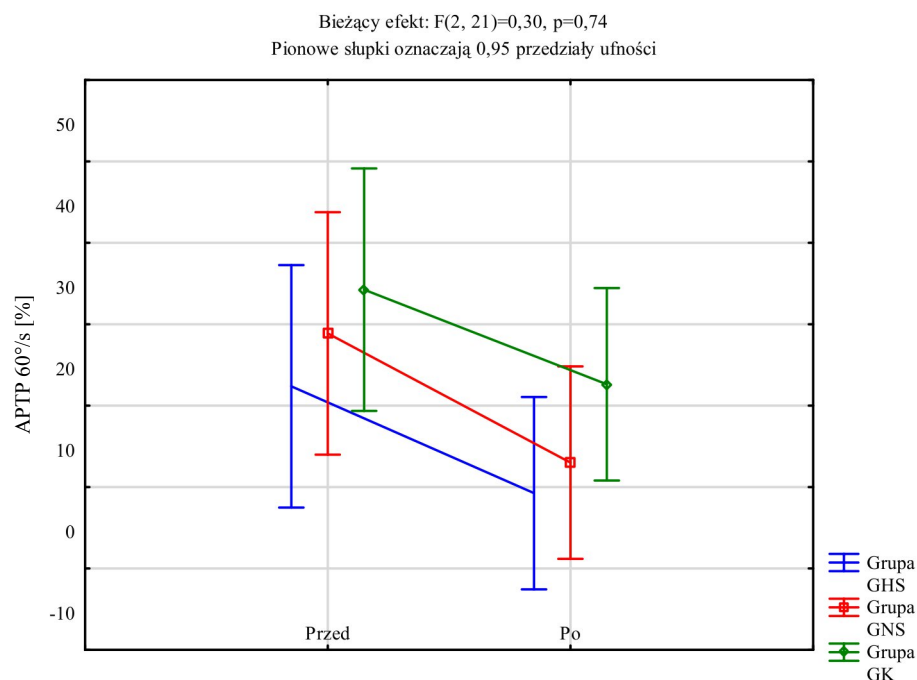
8.6. ANALIZA DLA RÓŻNICY W WARTOŚCI SZCZYTOWEGO MOMENTU OBROTOWEGO PROSTOWNIKÓW STAWU KOLANOWEGO KOŃCZINY DOLNEJ OPEROWANEJ WZGLĘDEM KOŃCZINY NIEOPEROWANEJ (APTP) OCENIENEJ PRZY PRĘDKOŚCI KĄTOWEJ 60°/S Z WYKORZYSTANIEM DYNAMOMETRU IZOKINETYCZNEGO

Tab. 10 Nieparametryczna analiza wariancji z powtarzanymi pomiarami dla różnicy w wartości szczytowego momentu obrotowego prostowników stawu kolanowego kończyny dolnej operowanej względem kończyny nieoperowanej oceniana przy prędkości kątowej 60°/s (APTP 60°/s).

Efekt	X^2	p	e^2
Grupa	2,33	0,313	0,05
Przed-po	19,17	0,0001	0,63
Przed-po*grupa	12,07	0,034	0,26

X^2 – wyniki testu Friedmana, p – prawdopodobieństwo testowe, η^2 – siła efektu, **Grupa** – efekt główny porównujący różnice między badanymi grupami (GHS, GNS, GK) niezależnie od czasu pomiaru, **Przed-po** – efekt główny czasu, pokazujący zmianę pomiędzy pomiarem „przed” a „po” niezależnie od przynależności do grupy, **Przed-po * grupa** – efekt interakcji między czasem pomiaru, a grupą; informuje, czy zmiana pomiędzy pomiarem „przed” a „po” różni się w zależności od grupy (GHS, GNS, GK).

Analiza wyników zawartych w tabeli 10 pozwoliła na stwierdzenie istotnych różnic dla APTP 60°/s tylko w przypadku pomiaru przed-po $X^2=19,17$; $p=0,0001$; $e^2=0,63$. Stwierdzono, że bez względu na grupę były istotne statystycznie różnice pomiędzy wynikami przed i po eksperymencie. Po eksperymencie stwierdzono istotnie statystycznie niższy APTP. Dodatkowo stwierdzono statystycznie istotne różnice dla interakcji Przed-po*grupa $X^2=12,07$; $p=0,034$; $e^2=0,26$. Wyniki te potwierdza również poniższa rycina 8.



Ryc. 8 Porównanie średnich wartości różnicy szczytowego momentu obrotowego prostowników stawu kolanowego kończyny dolnej operowanej względem kończyny nieoperowanej oceniane przy prędkości kątowej 60°/s (APTP 60°/s).

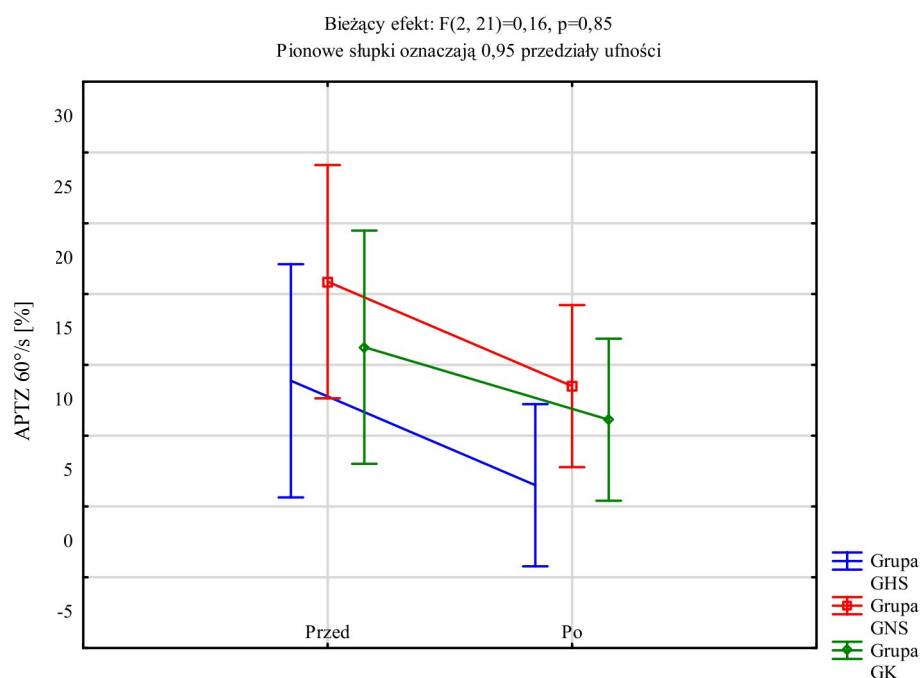
8.7. ANALIZA DLA RÓŻNICY W WARTOŚCI SZCZYTOWEGO MOMENTU OBROTOWEGO ZGINACZY STAWU KOLANOWEGO KOŃCZYNY DOLNEJ OPEROWANEJ WZGLĘDEM KOŃCZYNY NIEOPEROWANEJ (APTZ) OCENIANA PRZY PRĘDKOŚCI KĄTOWEJ 60°/S Z WYKORZYSTANIEM DYNAMOMETRU IZOKINETYCZNEGO

Tab. 11 Analiza wariancji z powtarzanymi pomiarami dla różnicy w wartości szczytowego momentu obrotowego zginaczy stawu kolanowego kończyny dolnej operowanej względem kończyny nieoperowanej oceniana przy prędkości kątowej 60°/s (APTZ 60°/s).

Efekt	F	p	η^2
Grupa	1,36	0,28	0,11
Przed-po	12,55	0,0019	0,37
Przed-po * grupa	0,16	0,85	0,015

F – wyniki testu F, p – prawdopodobieństwo testowe, η^2 – siła efektu, **Grupa** – efekt główny porównujący różnice między badanymi grupami (GHS, GNS, GK) niezależnie od czasu pomiaru, **Przed-po** – efekt główny czasu, pokazujący zmianę pomiędzy pomiarem „przed”, a „po” niezależnie od przynależności do grupy, **Przed-po * grupa** – efekt interakcji między czasem pomiaru, a grupą; informuje, czy zmiana pomiędzy pomiarem „przed”, a „po” różni się w zależności od grupy (GHS, GNS, GK).

Analiza wyników zawartych w tabeli 11 pozwoliła na stwierdzenie istotnych różnic dla APTZ 60°/s tylko w przypadku efektu głównego Przed-po $F=12,55$; $p=0,0019$; $\eta^2=0,37$. Stwierdzono, że bez względu na grupę były istotne statystycznie różnice pomiędzy wynikami przed i po eksperymencie. Po eksperymencie stwierdzono istotnie statystycznie niższy APTZ. Nie stwierdzono istotnych statystycznie różnic dla interakcji Przed-po*grupa $F=0,16$; $p=0,85$; $\eta^2=0,015$. Wyniki te potwierdza również poniższa rycina 9.



Ryc. 9 Porównanie średnich wartości różnicy szczytowego momentu obrotowego zginaczy stawu kolanowego kończyny dolnej operowanej względem kończyny nieoperowanej przy prędkości kątowej 60°/s (APTZ 60°/s).

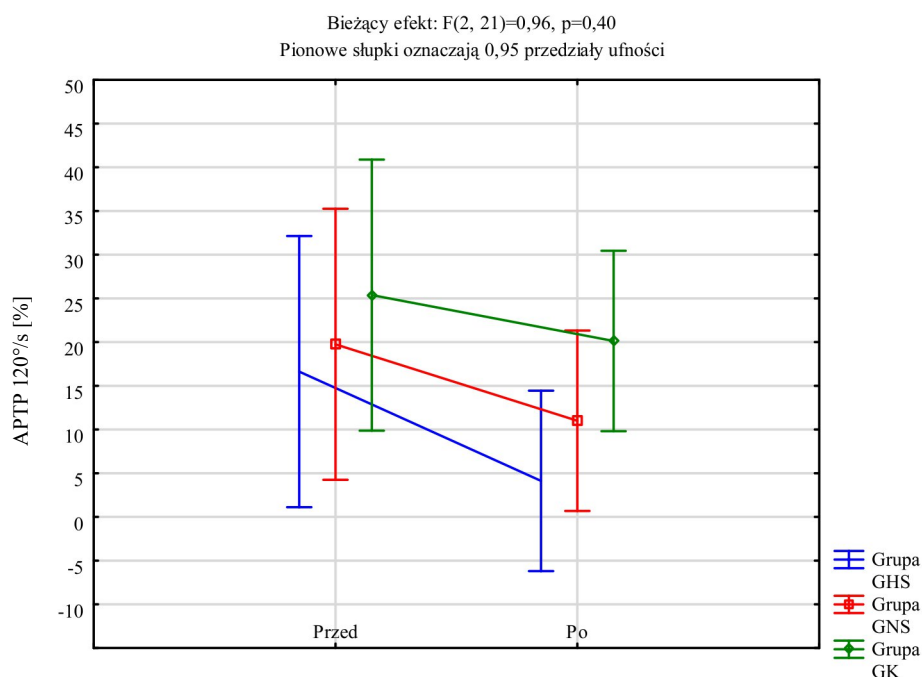
8.8. ANALIZA DLA RÓŻNICY WARTOŚCI SZCZYTOWEGO MOMENTU OBROTOWEGO PROSTOWNIKÓW STAWU KOLANOWEGO KOŃCZINY DOLNEJ OPEROWANEJ WZGLĘDEM KOŃCZINY NIEOPEROWANEJ (APTP) OCENIANA PRZY PRĘDKOŚCI KĄTOWEJ 120°/s Z WYKORZYSTANIEM DYNAMOMETRU IZOKINETYCZNEGO

Tab. 12 Analiza wariancji z powtarzanymi pomiarami dla różnicy w wartości szczytowego momentu obrotowego prostowników stawu kolanowego kończyny dolnej operowanej względem kończyny nieoperowanej oceniana przy prędkości kątowej 120°/s (APTP 120°/s).

Efekt	F	p	η^2
Grupa	1,06	0,37	0,091
Przed-po	17,15	0,0005	0,45
Przed-po * grupa	0,96	0,40	0,084

F – wyniki testu F, p – prawdopodobieństwo testowe, η^2 – siła efektu, **Grupa** – efekt główny porównujący różnice między badanymi grupami (GHS, GNS, GK) niezależnie od czasu pomiaru, **Przed-po** – efekt główny czasu, pokazujący zmianę pomiędzy pomiarem „przed”, a „po” niezależnie od przynależności do grupy, **Przed-po * grupa** – efekt interakcji między czasem pomiaru, a grupą; informuje, czy zmiana pomiędzy pomiarem „przed”, a „po” różni się w zależności od grupy (GHS, GNS, GK).

Analiza wyników zawartych w tabeli 12 pozwoliła na stwierdzenie istotnych różnic dla APTP 120°/s tylko w przypadku efektu głównego Przed-po $F=17,15$; $p=0,0005$; $\eta^2=0,45$. Stwierdzono, że bez względu na grupę były istotne statystycznie różnice pomiędzy wynikami przed i po eksperymencie. Po eksperymencie stwierdzono istotnie statystycznie niższy APTP. Nie stwierdzono istotnych statystycznie różnic dla interakcji Przed-po*grupa $F=0,96$; $p=0,40$; $\eta^2=0,084$. Wyniki te potwierdza również poniższa rycina 10.



Ryc. 10 Porównanie średnich wartości różnicy szczytowego momentu obrotowego prostowników stawu kolanowego kończyny dolnej operowanej względem kończyny nieoperowanej oceniane przy prędkości kątowej 120°/s (APTP 120°/s).

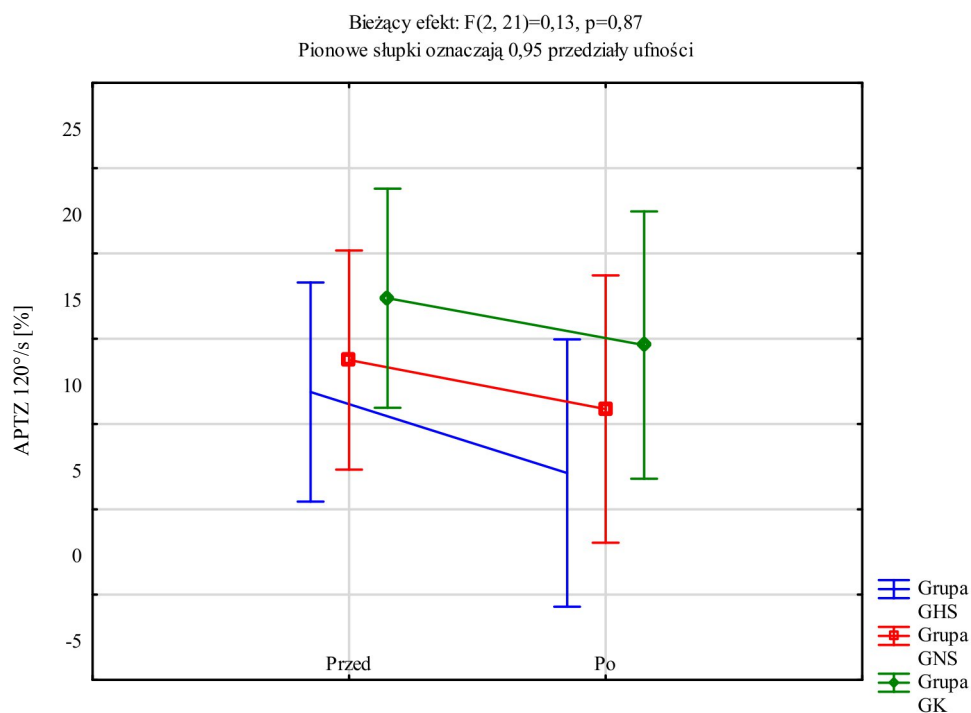
8.9. ANALIZA DLA RÓŻNICY WARTOŚCI SZCZYTOWEGO MOMENTU OBROTOWEGO ZGINACZY STAWU KOLANOWEGO KOŃCZYNY DOLNEJ OPEROWANEJ WZGLĘDEM KOŃCZYNY NIEOPEROWANEJ (APTZ) PRZY PRĘDKOŚCI KĄTOWEJ 120°/S Z WYKORZYSTANIEM DYNAMOMETRU IZOKINETYCZNEGO

Tab. 13 Analiza wariancji z powtarzanymi pomiarami dla różnicy w wartości szczytowego momentu obrotowego zginaczy stawu kolanowego kończyny dolnej operowanej względem kończyny nieoperowanej oceniane przy prędkości kątowej 120°/s (APTZ 120°/s).

Efekt	F	p	η^2
Grupa	1,11	0,35	0,10
Przed-po	3,84	0,063	0,15
Przed-po *grupa	0,13	0,87	0,013

F – wyniki testu F, p – prawdopodobieństwo testowe, η^2 – siła efektu, **Grupa** – efekt główny porównujący różnice między badanymi grupami (GHS, GNS, GK) niezależnie od czasu pomiaru, **Przed-po** – efekt główny czasu, pokazujący zmianę pomiędzy pomiarem „przed”, a „po” niezależnie od przynależności do grupy, **Przed-po * grupa** – efekt interakcji między czasem pomiaru, a grupą; informuje, czy zmiana pomiędzy pomiarem „przed”, a „po” różni się w zależności od grupy (GHS, GNS, GK).

Analiza wyników zawartych w tabeli 13 nie pozwoliła na stwierdzenie istotnych różnic dla APTZ 120°/s zarówno efektów głównych Przed-po $F=3,84$; $p=0,063$; $\eta^2=0,15$, dla grupy $F=1,11$; $p=0,35$; $\eta^2=0,10$. Nie stwierdzono istotnych statystycznie różnic dla interakcji przed-po*grupa $F=0,13$; $p=0,87$; $\eta^2=0,013$. Wyniki te potwierdza również poniższa rycina 11.



Ryc. 11 Porównanie średnich wartości różnicy szczytowego momentu obrotowego zginaczy stawu kolanowego kończyny dolnej operowanej względem kończyny nieoperowanej oceniane przy prędkości kątowej 120°/s (APTZ 120°/s).

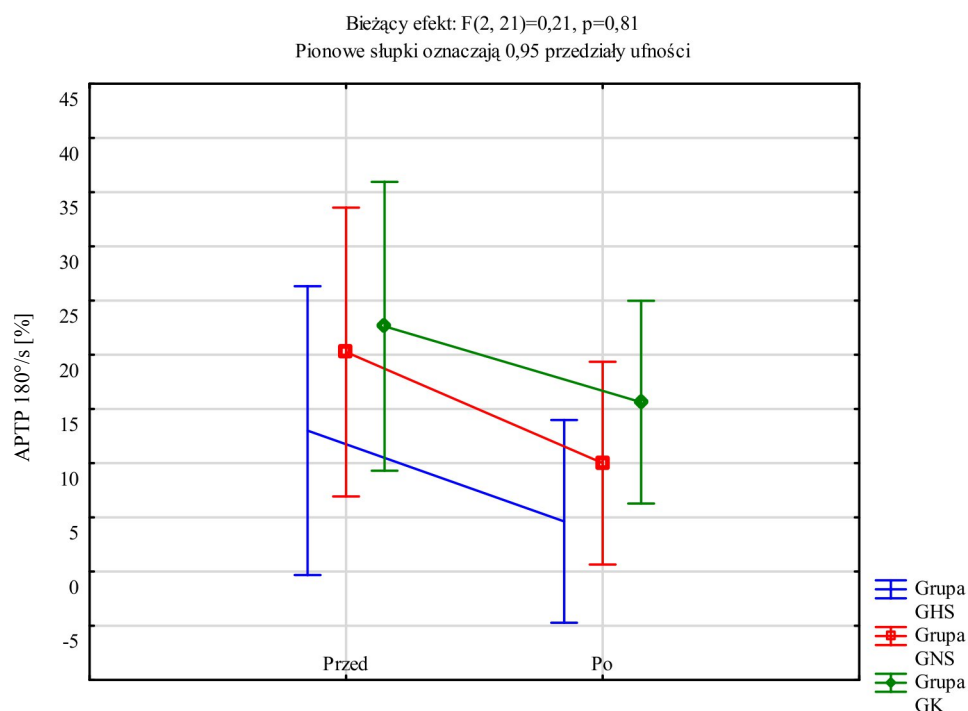
8.10. ANALIZA DLA RÓŻNICY WARTOŚCI SZCZYTOWEGO MOMENTU OBROTOWEGO PROSTOWNIKÓW STAWU KOLANOWEGO KOŃCZINY DOLNEJ OPEROWANEJ WZGLĘDEM KOŃCZINY NIEOPEROWANEJ (APTP) OCENIANA PRZY PRĘDKOŚCI KĄTOWEJ 180°/S Z WYKORZYSTANIEM DYNAMOMETRU IZOKINETYCZNEGO

Tab. 14 Analiza wariancji z powtarzanymi pomiarami dla różnicy w wartości szczytowego momentu obrotowego prostowników stawu kolanowego kończyny dolnej operowanej w stosunku do kończyny nieoperowanej oceniana przy prędkości kątowej 180°/s (APTP 180°/s).

Efekt	F	p	η^2
Grupa	0,99	0,40	0,086
Przed-po	17,03	0,0005	0,45
Przed-po *grupa	0,21	0,81	0,019

F – wyniki testu F, p – prawdopodobieństwo testowe, η^2 – siła efektu, **Grupa** – efekt główny porównujący różnice między badanymi grupami (GHS, GNS, GK) niezależnie od czasu pomiaru, **Przed-po** – efekt główny czasu, pokazujący zmianę pomiędzy pomiarem „przed”, a „po” niezależnie od przynależności do grupy, **Przed-po * grupa** – efekt interakcji między czasem pomiaru, a grupą; informuje, czy zmiana pomiędzy pomiarem „przed”, a „po” różni się w zależności od grupy (GHS, GNS, GK).

Analiza wyników zawartych w tabeli 14 pozwoliła na stwierdzenie istotnych różnic dla APTP 180°/s tylko w przypadku efektu głównego Przed-po $F=17,03$; $p=0,0005$; $\eta^2=0,45$. Stwierdzono, że bez względu na grupę były istotne statystycznie różnice pomiędzy wynikami przed i po eksperymencie. Po eksperymencie stwierdzono istotnie statystycznie niższy APTP. Nie stwierdzono istotnych statystycznie różnic dla interakcji przed-po*grupa $F=0,21$; $p=0,81$; $\eta^2=0,019$. Wyniki te potwierdza również poniższa rycina 12.



Ryc. 12 Porównanie średnich wartości różnicy szczytowego momentu obrotowego prostowników stawu kolanowego kończyny dolnej operowanej względem kończyny nieoperowanej oceniane na przy prędkości kątowej 180°/s (APTP 180°/s).

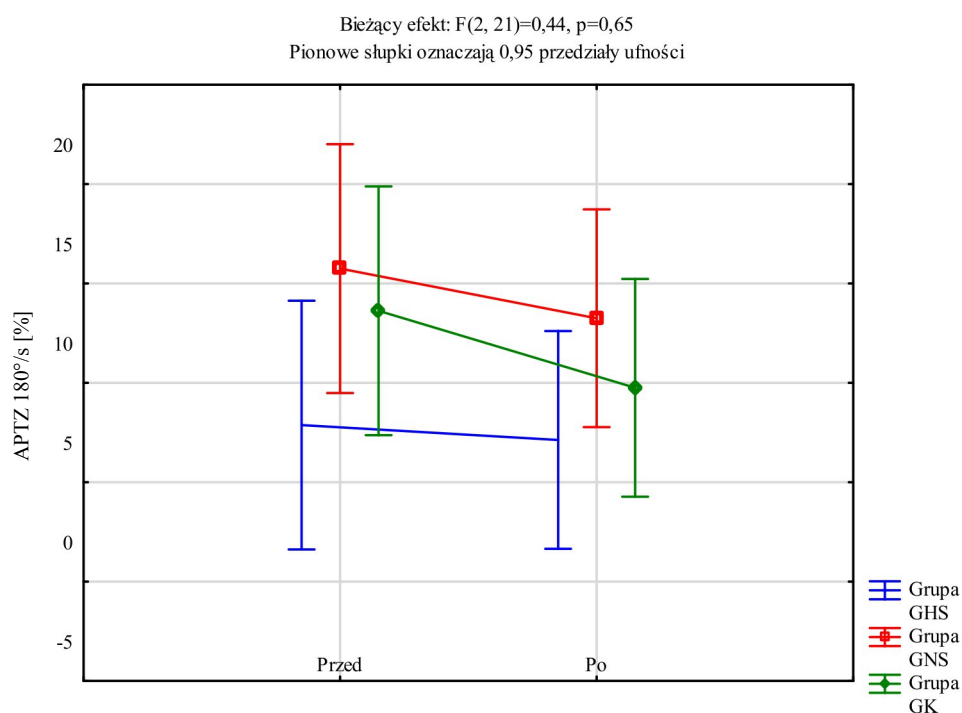
8.11. ANALIZA DLA RÓŻNICY WARTOŚCI SZCZYTOWEGO MOMENTU OBROTOWEGO ZGINACZY STAWU KOLANOWEGO KOŃCZYNY DOLNEJ OPEROWANEJ WZGLĘDEM KOŃCZYNY NIEOPEROWANEJ (APTZ) OCENIANA PRZY PRĘDKOŚCI KĄTOWEJ 180°/S Z WYKORZYSTANIEM DYNAMOMETRU IZOKINETYCZNEGO

Tab. 15 Analiza wariancji z powtarzanymi pomiarami dla różnicy w wartości szczytowego momentu obrotowego zginaczy stawu kolanowego kończyny dolnej operowanej względem kończyny nieoperowanej oceniana przy prędkości kątowej 180°/s (APTZ 180°/s).

Efekt	F	p	η^2
Grupa	1,88	0,18	0,15
Przed-po	3,02	0,097	0,13
Przed-po * grupa	0,44	0,65	0,040

F – wyniki testu F, p – prawdopodobieństwo testowe, η^2 – siła efektu, **Grupa** – efekt główny porównujący różnice między badanymi grupami (GHS, GNS, GK) niezależnie od czasu pomiaru, **Przed-po** – efekt główny czasu, pokazujący zmianę pomiędzy pomiarem „przed”, a „po” niezależnie od przynależności do grupy, **Przed-po * grupa** – efekt interakcji między czasem pomiaru, a grupą; informuje, czy zmiana pomiędzy pomiarem „przed”, a „po” różni się w zależności od grupy (GHS, GNS, GK).

Analiza wyników zawartych w tabeli 15 nie pozwoliła na stwierdzenie istotnych różnic dla APTZ 180°/s zarówno efektów głównych przed-po $F=3,02$; $p=0,097$; $\eta^2=0,13$, dla grupy $F=1,88$; $p=0,18$; $\eta^2=0,15$. Nie stwierdzono istotnych statystycznie różnic dla interakcji przed-po*grupa $F=0,44$; $p=0,65$; $\eta^2=0,040$. Wyniki te potwierdza również poniższa rycina 13.



Ryc. 13 Porównanie średnich wartości różnicy szczytowego momentu obrotowego zginaczy stawu kolanowego kończyny dolnej operowanej względem kończyny nieoperowanej oceniane przy prędkości kątowej 180°/s (APTZ 180°/s).

8.12. ANALIZY WSTĘPNE – STATYSTYKI OPISOWE STOSUNKU

SZCZYTOWEGO MOMENTU OBROTOWEGO MIĘŚNI PROSTOWNIKÓW STAWU KOLANOWEGO WZGLĘDEM ZGINACZY (RTPZ) KOŃCZINY OPEROWANEJ ORAZ NIEOPEROWANEJ

Tab. 16 Podstawowe statystyki opisowe dla zmiennych oceny stosunku szczytowego momentu obrotowego mięśni prostowników stawu kolanowego względem zginaczy (RTPZ) z wykorzystaniem dynamometru izokinetycznego.

		Grupa														
		GHS				GNS				GK						
		M	SD	SW C	95%CI		M	SD	SW C	95%CI		M	SD	SW C	95%CI	
RTPZ 60°/s	Op. - przed	74.75	14.50	2,9	62.63	86.87	79.75	12.75	2,55	69.09	90.41	99.63	58.26	11,65	50.92	148.33
	Op. - po	68.13	9.34		60.32	75.93	71.88	7.57		65.55	78.20	76.50	30.72		50.81	102.19
	Zdr. - przed	65.88	7.83	1,57	59.33	72.42	69.13	11.00	2,20	59.93	78.32	63.38	9.71	1,94	55.26	71.49
	Zdr.- po	66.50	7.89		59.90	73.10	72.63	11.66		62.88	82.37	62.00	6.82		56.29	67.71
RTPZ 120°/s	Op. - przed	84.63	14.40	2,88	72.58	96.67	87.88	21.69	4,34	69.74	106.01	94.88	52.82	10,56	50.71	139.04
	Op. - po	74.75	10.07		66.33	83.17	82.25	16.02		68.86	95.64	80.38	27.77		57.16	103.59
	Zdr. - przed	73.38	13.77	2,75	61.86	84.89	81.75	24.22	4,84	61.50	102.00	66.75	13.45	2,69	55.51	77.99
	Zdr.- po	73.13	8.76		65.80	80.45	74.63	10.10		66.18	83.07	65.88	10.68		56.94	74.81
RTPZ 180°/s	Op. - przed	88.13	8.82	1,76	80.75	95.50	87.13	18.74	3,75	71.46	102.79	94.88	41.01	8,20	60.59	129.16
	Op. - po	77.88	8.17		71.05	84.70	89.63	20.95		72.11	107.14	98.50	38.96		65.93	131.07
	Zdr. - przed	78.25	6.84	1,37	72.53	83.97	79.88	8.68	1,74	72.62	87.13	69.75	13.45	2,69	58.51	80.99
	Zdr.- po	76.00	8.86		68.59	83.41	80.50	8.57		73.34	87.66	71.63	10.97		62.46	80.79

M – średnia arytmetyczna, SD – odchylenie standardowe, 95% CI – przedział ufności dla wartości średniej, SWC – najmniejsza istotna zmiana, Op. przed – kończyna operowana – pierwszy pomiar, Op. po – kończyna operowana – drugi pomiar, Zdr. przed – kończyna zdrowa – pierwszy pomiar, Zdr. po – kończyna zdrowa – drugi pomiar, GHS – grupa wykonująca trening oporowy w warunkach hipoksji normobarycznej, GNS – grupa wykonująca trening oporowy w warunkach normoksji, GK- grupa kontrolna, RTPZ 60°/s – stosunek szczytowego momentu obrotowego mięśni prostowników względem zginaczy stawu kolanowego oceniany na dynamometrze izokinetycznym przy prędkości kątowej 60°/s, RTPZ 120°/s – stosunek szczytowego momentu obrotowego mięśni prostowników względem zginaczy stawu kolanowego oceniany na dynamometrze izokinetycznym przy prędkości kątowej 120°/s, RTPZ 180°/s – stosunek szczytowego momentu obrotowego mięśni prostowników względem zginaczy stawu kolanowego oceniany na dynamometrze izokinetycznym przy prędkości kątowej 180°/s

W tabeli 16 w przypadku analizowanych zmiennych nie stwierdzono podstaw do odrzucenia hipotezy zerowej o normalności rozkładu $p > 0,05$ oraz na odrzucenie hipotezy zerowej mówiącej jednorodności wariancji $p > 0,05$. Z tego względu do analiz istotności różnic dla wartości średniej zastosowano wieloczynnikową analizę wariancji z powtarzanymi pomiarami.

8.13. ANALIZA DLA STOSUNKU SZCZYTOWEGO MOMENTU OBROTOWEGO MIĘŚNI PROSTOWNIKÓW STAWU KOLANOWEGO WZGLĘDEM ZGINACZY (RTPZ) OCENIANE PRZY PRĘDKOŚCI KĄTOWEJ 60°/s Z WYKORZYSTANIEM DYNAMOMETRU IZOKINETYCZNEGO

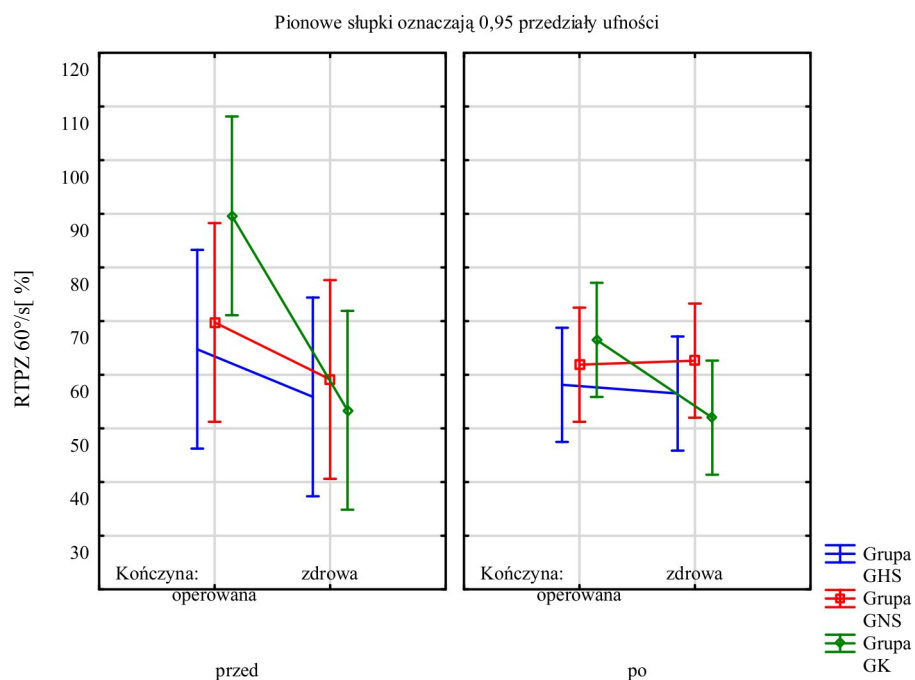
Tab. 17 Nieparametryczna analiza wariancji z powtarzanymi pomiarami stosunku szczytowego momentu obrotowego mięśni prostowników stawu kolanowego względem zginaczy oceniana przy prędkości kątowej 60°/s (RTPZ 60°/s).

Efekt	X ²	p	e ²
Grupa	4,30	0,117	0,05
Kończyna	6,18	0,013	0,07
Grupa*kończyna	11,29	0,046	0,12
Przed-po	1,14	0,286	0,03
Przed-po*grupa	5,00	0,416	0,05
Przed-po*kończyna	8,06	0,045	0,08
Przed-po*grupa*kończyna	13,57	0,258	0,14

Grupa – efekt główny porównujący różnice pomiędzy badanymi grupami (GHS, GNS, GK), niezależnie od kończyny i czasu pomiaru, **Kończyna** – efekt główny różnic pomiędzy kończyną operowaną, a nieoperowaną, niezależnie od grupy (GHS, GNS, GK) i czasu, **Grupa*kończyna** – interakcja między grupą, a kończyną; wskazuje, czy różnice między kończynami różnią się w zależności od grupy, **Przed-po** – efekt główny czasu, czyli różnice pomiędzy pomiarem „przed”, a „po” niezależnie od grupy i kończyny, **Przed-po*grupa** – interakcja między czasem, a grupą; pokazuje, czy zmiany w czasie różnią się między grupami, **Przed-po*kończyna** – interakcja między czasem a kończyną; informuje, czy zmiany w czasie różnią się między kończyną operowaną a nieoperowaną, **Przed-po*grupa*kończyna** – trójczynnikowa interakcja; wskazuje, czy zmiany w czasie między kończynami są różne w zależności od grupy.

Analiza wyników zawartych w tabeli 17 pozwoliła na stwierdzenie istotnych różnic dla RTPZ 60°/s w przypadku efektu głównego kończyna $X^2=6,18$; $p=0,013$; $e^2=0,07$. Stwierdzono, że bez względu na grupę i przed i po w przypadku kończyny operowanej wyniki RTPZ 60°/s były istotnie statystycznie wyższe niż w przypadku kończyny zdrowej. Stwierdzono istotny statystycznie różnice dla interakcji przed-po*kończyna $X^2=8,06$; $p=0,045$; $e^2=0,08$. Dla identyfikacji pomiędzy którymi grupami wystąpiły istotne różnice zastosowano testy wielokrotnych porównań parami metodą DSCF. Stwierdzono, że kończyna istotnie różnicowała wyniki RTPZ 60°/s dla wartości przed eksperymentem $p=0,017$. Wyższe wyniki RTPZ 60°/s stwierdzono w przypadku kończyny operowanej przed eksperymentem w porównaniu do kończyny zdrowej. Po przeprowadzeniu eksperymentu nie było istotnych

różnic pomiędzy wynikami RTPZ 60°/s dla kończyny operowanej i zdrowej $p>0,05$. Wyniki te potwierdza również poniższa rycina 14.



Ryc. 14 Porównanie wartości średnich i przedziałów ufności dla stosunku szczytowego momentu obrotowego mięśni prostowników stawu kolanowego względem zginaczy ocenianych przy prędkości kątowej 60°/s (RTPZ 60°/s).

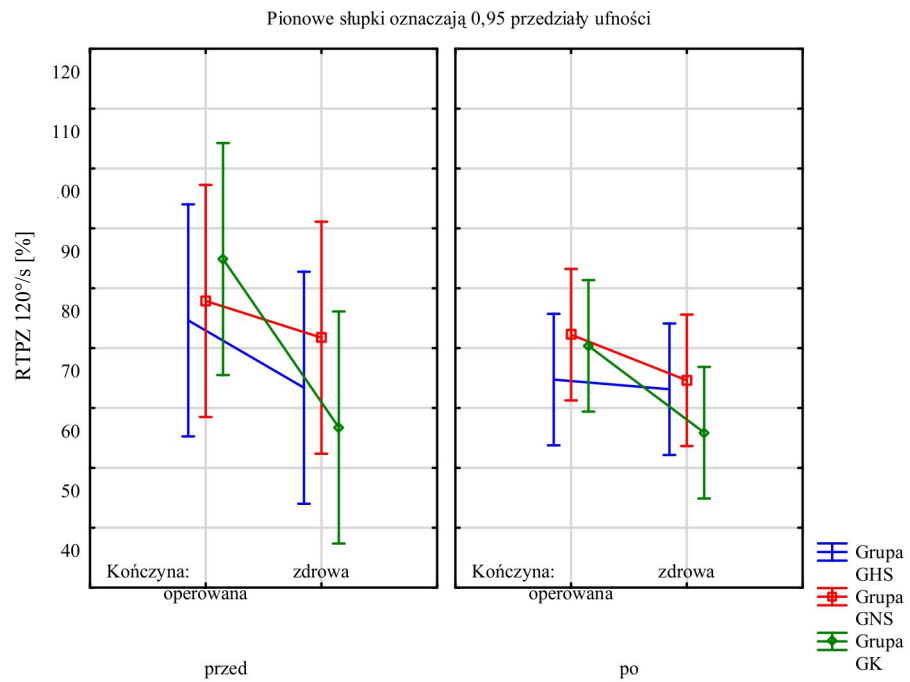
8.14. ANALIZA DLA STOSUNKU SZCZYTOWEGO MOMENTU OBROTOWEGO MIĘŚNI PROSTOWNIKÓW STAWU KOLANOWEGO WZGLĘDEM ZGINACZY (RTPZ) OCENIANA PRZY PRĘDKOŚCI KĄTOWEJ 120°/s Z WYKORZYSTANIEM DYNAMOMETRU IZOKINETYCZNEGO

Tab. 18 Nieparametryczna analiza wariancji z powtarzanymi pomiarami stosunku szczytowego momentu obrotowego mięśni prostowników stawu kolanowego względem zginaczy oceniana przy prędkości kątowej 120°/s (RTPZ 120°/s).

Efekt	X ²	p	e ²
Grupa	6,00	0,050	0,06
Kończyna	5,32	0,021	0,06
Grupa*kończyna	11,57	0,041	0,12
Przed-po	3,27	0,070	0,01
Przed-po*grupa	7,12	0,212	0,07
Przed-po*kończyna	6,52	0,089	0,07
Przed-po*grupa*kończyna	13,45	0,265	0,14

Grupa – efekt główny porównujący różnice pomiędzy badanymi grupami (GHS, GNS, GK), niezależnie od kończyny i czasu pomiaru, **Kończyna** – efekt główny różnic pomiędzy kończyną operowaną, a nieoperowaną, niezależnie od grupy (GHS, GNS, GK) i czasu, **Grupa*kończyna** – interakcja między grupą, a kończyną; wskazuje, czy różnice między kończynami różnią się w zależności od grupy, **Przed-po** – efekt główny czasu, czyli różnice pomiędzy pomiarem „przed”, a „po” niezależnie od grupy i kończyny, **Przed-po*grupa** – interakcja między czasem, a grupą; pokazuje, czy zmiany w czasie różnią się między grupami, **Przed-po*kończyna** – interakcja między czasem a kończyną; informuje, czy zmiany w czasie różnią się między kończyną operowaną a nieoperowaną, **Przed-po*grupa*kończyna** – trójczynnikowa interakcja; wskazuje, czy zmiany w czasie między kończynami są różne w zależności od grupy.

Analiza wyników zawartych w tabeli 18 pozwoliła na stwierdzenie istotnych różnic dla RTPZ 120°/s w przypadku kończyny X²=5,32; p=0,021; e²=0,06 oraz interakcji Grupa*kończyna X²=11,57; p=0,041; e²=0,12. Zastosowana analiza post-hoc wykazała, że istotnie różnicowała wyniki RTPZ 120°/s w grupie GK i GNS p=0,029. Wartość RTPZ 120°/s po eksperymencie niższy wartość niż przed eksperymentem, jednakże różnica ta nie wykazała istotności statystycznej. Wyniki te potwierdza również poniższa rycina 15.



Ryc. 15 Porównanie wartości średnich i przedziałów ufności stosunku szczytowego momentu obrotowego mięśni prostowników stawu kolanowego względem zginaczy ocenianych przy prędkości kątowej 120°/s (RTPZ 120°/s).

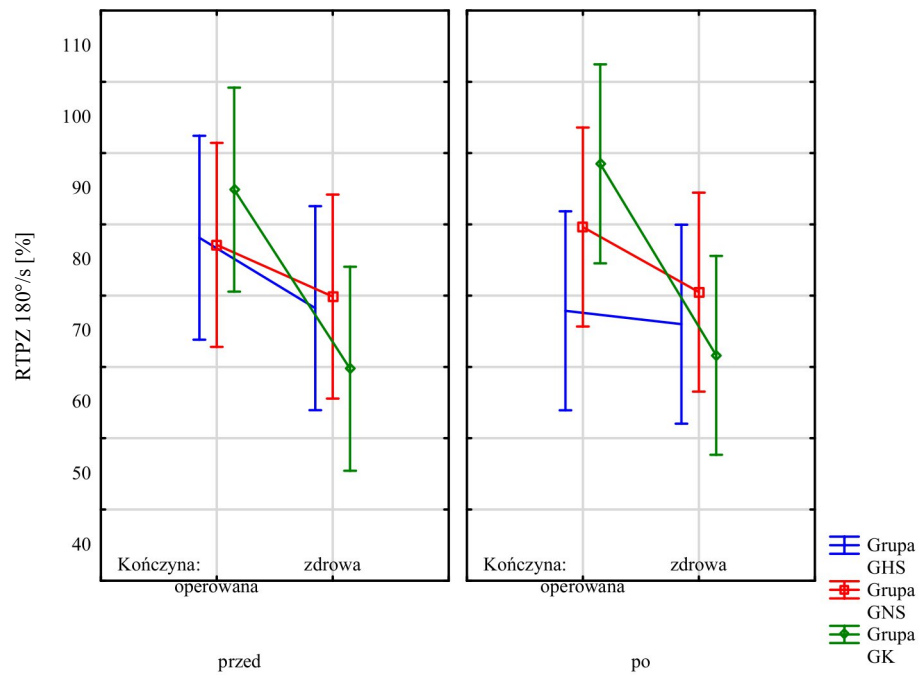
8.15. ANALIZA DLA STOSUNKU SZCZYTOWEGO MOMENTU OBROTOWEGO MIĘŚNI PROSTOWNIKÓW STAWU KOLANOWEGO WZGLĘDEM ZGINACZY (RTPZ) OCENIANA PRZY PRĘDKOŚCI KĄTOWEJ 180°/s Z WYKORZYSTANIEM DYNAMOMETRU IZOKINETYCZNEGO

Tab. 19 Nieparametryczna analiza wariancji z powtarzanymi pomiarami stosunku szczytowego momentu obrotowego mięśni prostowników stawu kolanowego względem zginaczy oceniana przy prędkości kątowej 180°/s (RTPZ 180°/s).

Efekt	X ²	p	e ²
Grupa	1,77	0,412	0,02
Kończyna	7,75	0,005	0,08
Grupa*kończyna	12,10	0,033	0,13
Przed-po	0,82	0,366	0,01
Przed-po*grupa	4,31	0,506	0,05
Przed-po*kończyna	8,26	0,041	0,09
Przed-po*grupa*kończyna	15,72	0,152	0,17

Grupa – efekt główny porównujący różnice pomiędzy badanymi grupami (GHS, GNS, GK), niezależnie od kończyny i czasu pomiaru, **Kończyna** – efekt główny różnic pomiędzy kończyną operowaną, a nieoperowaną, niezależnie od grupy (GHS, GNS, GK) i czasu, **Grupa*kończyna** – interakcja między grupą, a kończyną; wskazuje, czy różnice między kończynami różnią się w zależności od grupy, **Przed-po** – efekt główny czasu, czyli różnice pomiędzy pomiarem „przed”, a „po” niezależnie od grupy i kończyny, **Przed-po*grupa** – interakcja między czasem, a grupą; pokazuje, czy zmiany w czasie różnią się między grupami, **Przed-po*kończyna** – interakcja między czasem a kończyną; informuje, czy zmiany w czasie różnią się między kończyną operowaną a nieoperowaną, **Przed-po*grupa*kończyna** – trójczynnikowa interakcja; wskazuje, czy zmiany w czasie między kończynami są różne w zależności od grupy.

Analiza wyników zawartych w tabeli 19 pozwoliła na stwierdzenie istotnych różnic dla RTPZ 180°/s w przypadku efektu głównego kończyna $FX^2=7,75$; $p=0,005$; $e^2=0,08$. Stwierdzono, że bez względu na grupę i przed i po w przypadku kończyny operowanej wyniki RTPZ 180°/s były istotnie statystycznie wyższe niż w przypadku kończyny zdrowej. Dodatkowo zaobserwowano istotne statystycznie zróżnicowanie dla interakcji grupa*kończyna $X^2=12,10$; $p=0,033$; $e^2=0,13$ oraz dla interakcji przed-po*kończyna $X^2=9,26$; $p=0,041$; $e^2=0,09$. Zastosowane testy post-hoc nie były w stanie zidentyfikować, które różnice są istotne statystycznie. Uzyskane wyniki zaprezentowano również na rycinie 16.



Ryc. 16 Porównanie wartości średnich i przedziałów ufności stosunku szczytowego momentu obrotowego mięśni prostowników stawu kolanowego względem zginaczy ocenianych przy prędkości kątowej 180°/s (RTPZ 180°/s).

9. DYSKUSJA

Uzyskane wyniki badań z dynamometru izokinetycznego wskazują, że zastosowany model periodyzacji (Ryc. 4) w protokole rehabilitacji po rekonstrukcji WKP znacząco wpływa na poprawę APTZ i APTP w grupie GHS, jak i GNS w stosunku do GK (Tab. 9). Aktualna literatura stwierdza, iż w przypadku powrotu do wysiłku fizycznego asymetria PT pomiędzy kończynami powinna wynosić 10-15% (Neeter i in. 2006; Fischer i in. 2018). Wyniki zaprezentowane w tabeli 9 wskazują, iż grupa GHS uzyskała najlepsze wyniki APTP po zastosowanym protokole treningowym. Grupa ta osiągnęła w każdej z prędkości kątowych wyniki poniżej 10% asymetrii mięśniowej, pomiędzy prostownikami stawu kolanowego. W grupie GNS APTP wahał się 13-16%, a w grupie GK od 20,63% do 25,13%. Warto natomiast nadmienić, że największy progres APTP w wartościach przed-po uzyskano kolejno w grupach GNS, GHS i GK. Jedynie podczas testu z prędkością kątową 120°/s, grupa GHS uzyskała lepsze wyniki. Natomiast uzyskane rezultaty APTZ (Tab. 9) wskazują, iż najlepsze wyniki uzyskano kolejno w grupie GHS (6,5-7,13%), GNS (10,88-13,50%) i GK (9,75-14,63%). Dodatkowo największy progres APTZ w stosunku przed-po uzyskano kolejno w grupach GHS, GNS i GK. Warto również zaznaczyć, iż największą zmianę uzyskała grupa GHS oraz GNS przy próbie dla prędkości kątowej 60°/s zarówno APTZ, jak i APTP, natomiast dla pozostałych prędkości kątowych wyniki nie były istotne statystycznie.

Dlatego zbliżone wyniki APTP oraz APTZ w grupie GHS i GNS skłaniają ku zasadności implikacji periodyzacji w protokołach rehabilitacyjnych. Mając na uwadze, że protokół treningowy dotyczył zawodowych piłkarzy nożnych, a urządzeniem diagnostycznym był dynamometr izokinetyczny. Według współczesnej literatury nie daje on 100% pewności, czy daną osobę uznaje się za w pełni gotową do fazy powrotu do sportu, gdyż, testy te przeprowadza się w otwartym łańcuchu kinematycznym i kontrolowanym środowisku (Fischer i in. 2018; Murphy i in. 2003; Myer i in. 2009). Dlatego konieczne wydaje się odniesienie do rehabilitowanej grupy i uprawianej dyscypliny sportu, jaką jest piłka nożna. Jak stwierdza Drozd i in. (2017) piłkarz porusza się z obniżonym środkiem ciężkości ciała, wykonując znaczącą liczbę przyspieszeń i hamowań, bardzo często połączonych ze zmianą kierunku biegu. Większość urazów WKP w piłce nożnej według wielu autorów jest bezkontaktowa. Wynikająca z działań pressingowych, gdzie bardzo często zawodnik nie zakończył jednej czynności ruchowej, zaczynając kolejną, reagując na przeciwnika (bodziec

istotny pozytywny-negatywny), gdzie zgięcie w stawie kolanowym wynosi od 30-60° (Rekik i in. 2023). Dlatego zrozumienie roli i funkcji mięśnia czworogłowego uda oraz grupy kulszowo-goleniowej w obciążeniu WKP jest istotnym czynnikiem w optymalizacji całego procesu rehabilitacji (Maniar i in. 2022). W momencie wystąpienia pełnego wyprostu mięśnie grupy kulszowo goleniowej są stosunkowo nieskuteczne w wytwarzaniu tylnej siły ścinającej ze względu na ich linię działania i niewielką przewagę mechaniczną w tej pozycji (O'Connor 1993). Przy zgięciu w stawie kolanowym 20-30°, mięśnie grupy kulszowo-goleniowej skuteczniej wytwarzają tylne siły ścinające, odciążając WKP (Li i in. 2004). Niewielka przewaga mechaniczna ścięgien mięśni kulszowo-goleniowych (w wytwarzaniu tylnej siły ścinającej) przy niskich kątach zgięcia stawu kolanowego, w połączeniu z dużą przewagą mechaniczną mięśnia czworogłowego w tej pozycji (w wytwarzaniu przedniej siły ścinającej), może częściowo wyjaśniać obserwacje urazu WKP natychmiast po początkowym kontakcie, gdzie kąty zgięcia stawu kolanowego są zwykle małe (piłkarskie element techniczno-taktyczne). Dlatego jest to dodatkowy argument przemawiający za stosowaniem w protokole ćwiczenia UNI nie tylko pod względem wyrównania asymetrii mięśniowej, ale również specyficznych czynności ruchowych wynikających z rywalizacji w piłce nożnej (Drozd i in. 2024). Należy nadmienić, iż zawodnicy dodatkowo wraz z postępującym procesem rehabilitacji wykonywali w pozostałe dni mikrocykli jednostki treningowe (piłkarskie, oporowe) pod okiem klubowych trenerów przygotowania motorycznego i fizjoterapeutów, którzy zostali zaznajomieni z protokołem treningowym, po to aby nie powielać tych samych środków treningowych.

Biorąc pod uwagę zarówno powyższe informacje związane z ekspozycją na warunki hipoksji normobarycznej, zastosowany protokół, jak i pozostałe jednostki treningowe wykonywane w macierzystych klubach przez zawodników postanowiono zaimplikować zmodyfikowany model periodyzacji nieliniowej lub „falistej” (Ryc. 4). Jednym z głównych celów tego modelu jest uniknięcie krytycznych zmian przeciążeniowych (stanów zapalnych itd.) poprzez zastowanie fazy odciążenia w ostatnim mikrocyklu, a zarazem wywołanie superkompensacji bezpośrednio przed każdym kolejnym mezocyklem (Lorenz i Morrison 2015; Bompa i Buzzichelli 2015). Zasadniczą zmienną intensyfikującą zastosowaną periodyzację było tempo i TUT (Tab. 3), które według Wilka i in. (2018) stanowią część objętości treningowej. Pozwala ona na kontrolwane wykonywanie ćwiczeń, w poszczególnych cyklach treningowych, gdzie w sposób celowy stosujemy kontrolowane zmienne tempo ruchu. W długotrwałym procesie rehabilitacji stanowią one nowatorskie

podejście do rehabilitacji po rekonstrukcji WKP. Natomiast dobór ćwiczeń (Tab. 4) w poszczególnych mezocyklach był podyktowany zarówno postępującym procesem rehabilitacji oraz miejscem poboru przeszczepu ze ścięgien mięśni ST i GR. Opisując celowość stosowanych ćwiczeń w postępującej rehabilitacji należy zwrócić uwagę na implikacje w V mezocyklu (Tab. 4) ćwiczeń w formie UNI i BIL (Ryc. 61 i 66) bazujących na zmodyfikowanej stabilizacji plajometrycznej. Forma ta ma na celu wywołanie szeregu zmian nerwowo-mięśniowych oraz zwrócenie uwagi na prawidłowe ustawienie poszczególnych segmentów ciała w trakcie całej czynności ruchowej. Ponadto dodatkowy argument wynika z tego faktu, że osłabiony mięsień czworogłowy negatywnie wpływa na funkcję stawu kolanowego po rekonstrukcji, gdyż WKP podczas lądowania w fazie kontaktu stopy z podłożem (piłka nożna – pojedynki w powietrzu) ma dodatnią korelację ($R^2 = 0,74$) ze zmianą siły ścięgna mięśnia czworogłowego uda (Kim i in. 2022). Należy jednak zwrócić uwagę, iż siła mięśnia czworogłowego jest zależna od zgięcia stawu kolanowego co zostało wyjaśnione w pracy Maniar i in. (2022). Badania te wykazały, że przy kątach 30° - 50° siła mięśnia czworogłowego obciąża WKP poprzez: przednie siły ścinające, przednie przesunięcie kości piszczelowej, moment koślawości stawu kolanowego i rotację wewnętrzną kości piszczelowej (Markolf i in. 2004; Mesfar i Shirazi-Adl 2005), a to łącznie sugeruje, że mięsień czworogłowy jest zwykle antagonistą WKP. Jednakże przy zgięciu powyżej 80° mięsień czworogłowy odgrywa ograniczoną rolę w obciążaniu WKP i może nawet służyć do odciażania tej struktury ze względu na zmieniający się kąt pomiędzy ścięgnem rzepki i osią podłużną kości piszczelowej przy zwiększonych kątach zgięcia stawu kolanowego (Victor i in. 2010; Maniar i in. 2022). Kolejny aspekt związany z doбором ćwiczeń, to miejsce poboru przeszczepu związanego z zabiegiem. W obecnej pracy wykorzystano przeszczep z ST i GR. To skuteczna technika chirurgiczna umożliwiająca powrót do sportu. Należy natomiast dodać, iż po operacji występuje krótkotrwała asymetria siły mięśniowej zwłaszcza wśród mięśni kulszowo-goleniowych (Suydam i in. 2017). ST jest prostownikiem i słabym przywodzicielem stawu biodrowego. Z kolei dla stawu kolanowego jest zginaczem, lecz wskutek małej długości brzośca zakres ruchu nie przekracza 50 stopni. Poza tym wykonuje on słaby ruch obrotowy w stawie kolanowym do wewnątrz (Nakamae i in. 2012). GR przy wyprostowanym stawie kolanowym jest przywodzicielem stawu biodrowego oraz słabym prostownikiem i rotatorem zewnętrznym. Dla stawu kolanowego jest natomiast zginaczem oraz słabym rotatorem wewnętrznym. W tym celu w protokole zastosowano ćwiczenia bazujące na takich wzorcach ruchowych jak: unoszenie bioder w oparciu o skrzynię (Ryc.

38), zginanie kończyn dolnych na piłce szwedzkiej (Ryc. 64), wznos bioder (Ryc. 26). Kolejnym aspektem jest zastosowanie w protokole wydłużonego TUT w fazie ekscentrycznej oraz skali RIR (2-3) (Tab. 2). Wydają się one być istotnym czynnikiem, gdyż jak twierdzi Kharazi i in. (2021) trening oporowy, który jest kluczowym bodźcem mechanicznym do adaptacji ścięgien. Zostało to przedstawione w pracy Suydam i in. (2017), dotyczącej obrazowania ultradźwiękowego w czasie rzeczywistym ścięgna ST w płaszczyźnie podłużnej. Badaniami została objęta grupa pacjentów do 24 miesięcy po urazie WKP (wykorzystane ścięgna ST i GR). Stwierdzono odbudowę ST u 92% pacjentów po pobraniu autoprzeszczepu z ścięgna ST. Wystąpiła istotna różnica między modułami sprężystości zajętych i niezajętych ścięgien w całej próbie. Wyniki te wykazały, iż wartość modułu sprężystości wynosiła średnio 39,9% dla zdrowej kończyny w ciągu 12 miesięcy od rekonstrukcji WKP i 80,6% dla strony operowanej. Stąd też stosowanie periodyzacji z wydłużoną fazą ekscentryczną wpłynie na zakotwiczenie większych włókienek kolagenowych w celu utworzenia silniejszych i mocniejszych sieci poprzez trening ekscentryczny, a moduł sprężystości będzie wpływał na zdolność przenoszenia obciążenia z ścięgna na mięsień przez staw (Bengtssoni in. 2020; Suydam i in. 2017). Konstatując stopień asymetrii PT po rekonstrukcji WKP jest jednym z istotnych wskaźników oceny stanu stawu kolanowego i klinicznie różnica ta powinna wynosić do 10% w przypadku pacjentów powracających do sportu (Arderi i in. 2014; Lepley i Palmieri-Smith 2016; Maniar i in. 2022). W przeprowadzonych badaniach jedynie grupa GHS osiągnęła ten wynik. Jest to o tyle istotne, gdyż w wielu pracach dotyczących analizy asymetrii po roku od rekonstrukcji WKP wykazały asymetrię siły mięśnia czworogłowego uda na poziomie od 10-27%, a po ponad 5 latach od operacji utrzymywał się on na poziomie nawet 6-10% (Keays i in. 2007; Lautamies i in. 2008).

Kolejnym istotnym parametrem, podczas oceny zawodnika po rekonstrukcji WKP, jest RTPZ stanowiące wskaźnik równowagi mięśniowej. Podczas skurczu mięśnia czworogłowego uda dochodzi do przedniej translacji kości piszczelowej, co może zwiększyć obciążenie WKP. Naprężenie to można zmniejszać przez aktywację grupy kulszowo-goleniowej, która działa synergistycznie z WKP, wywołując przeciwny moment obrotowy do przedniej translacji piszczeli (Osternig i in. 2000). Dane, które potwierdzają możliwy związek między niskim współczynnikiem RTPZ, a zwiększonym ryzykiem wtórnego urazu WKP, są skąpe. Ponadto warto zauważyć, że wartość RTPZ w przewidywaniu urazów WKP jest obecnie niejasna, ponieważ w niedawnym przeglądzie systematycznym dotyczącym związku między RTPZ, a ryzykiem urazu WKP zaobserwowano niespójne wyniki między wieloma

badaniami (Högberg i in. 2024). W badaniach przeprowadzonych na 42 piłkarzach w okresie przygotowawczym stwierdzono średnie wartości RT na poziomie około 60-65%, bez względu na wiek i doświadczenie, co pokazuje, że w trzech grupach piłkarzy nie występowały wyraźne zaburzenia pomiędzy mięśniem czworogłowym i grupą kulszowo-goleniową. Autorzy sugerują, iż zawodnicy byli prawdopodobnie dobrze wytrenowani (Delextrat i in. 2010). Z kolei w pracy Coombs i Garbutt (2002) przyjmuje się, że prawidłowa wartość RTPZ wynosi ok. 60%, dodatkowo zmienna ta może być odmienna u zawodników z przewagą włókien szybkokurczliwych, oscylująca nawet do ok. 75%, podczas gdy w sportach wytrzymałościowych takich jak biegi długodystansowe może on przyjmować niższe wartości (Ruas i in. 2015). Po zastosowaniu protokołu zaobserwowano, że w przypadku prędkości kątowej 60°/s wystąpił istotny statystycznie niższy wynik w zakresie RTPZ dla kończyny operowanej, podczas gdy dla kończyny zdrowej wyniki nie zostały uznane za istotne statystycznie (Tab. 17) (Ryc. 14). Co ciekawe w jednej z pracy wskazano, iż ważniejszym predyktorem urazowości stawu kolanowego jest asymetria mięśniowa, a nie RTPZ. Potwierdzono to na przestrzeni czteroletnich badań dotyczących piłkarzy zdrowych i kontuzjowanych stwierdzając niewielkie różnice pomiędzy tymi grupami (O'Donnell i in. 2020). Dlatego RTPZ jest istotnym czynnikiem predykującym urazy, a zastosowany test na dynamometrze izokinetycznym pozwoli na zarejestrowanie zmiennych, które mogą występować podczas czynności funkcjonalnych, wpływających na ryzyko kontuzji w warunkach labolatoryjnych (Bennell i in. 1998).

Kolejnym aspektem pracy było określenie wpływu zastosowanej periodyzacji w rehabilitacji na stężenie hormonów zarówno w warunkach hipoksji normobarycznej, jak i normoksji. Analiza wyników wykazała największe istotne zmianystężnia GH podczas interwencji „Przed-po 30 min” w grupie GHS ($p=0,00014$) (Tab. 7). Otrzymane wyniki stężenia hormonu wynikają z holistycznego zastowania zarówno periodyzacji, jak i środowiska hipoksji normobarycznej. W pierwszej kolejności czynnikiem, który miał wpływ na stężenie GH mogła być zastosowana wysokość 3000 m.n.p.m oraz czas poboru krwi. Argmunt ten potwierdzałby wyniki badań Kurobe i in. (2015) stwierdzając, iż poziom wyrzutu stężenie GH będzie zależny od wysokości n.p.m. i jest on bardzo mocno skorelowany z poziomem niedotlenienia. Następne badania dotyczące stężenie GH nie wykazują znacząco wzrostu stężenia na wysokościach 2000-3000 m n.p.m, lecz jest istotnie obserwowany na wysokości od 3000 m.n.p.m (Katayama i in. 2010). Jest to istotne gdyż opisowna procedura oceny stężenia GH była badana bezpośrednio po sesji treningowej (30

min). Byłoby to zgodne z wnioskami Filopoulos i in. (2017), którzy przeprowadzili badania podczas trzech sesji treningu oporowego w hipoksji normobarycznej (4000 m n.p.m., FiO₂ – 12,9%) oraz normoksji. Protokół treningowy trwał przez okres dwóch tygodni i polegał na określeniu ciężaru maksymalnego 1RM metodą progresywnego zwiększania obciążenia zewnętrznego o 5-10% w ćwiczeniu wyciskania sztangi leżąc oraz o 10-20% w ćwiczeniu wypychanie siedząc w każdej z sesji treningowej. Stężenie GH było określane na podstawie poboru krwi po 5, 10, 15, 30 i 60 min, gdzie największą wartość osiągnięto 5 minut po wysiłku w obu grupach. Następnie wartość ta stopniowo ulegała obniżeniu, osiągając w 60 minucie wynik zbliżony do wyjściowego. Niemniej jednak znacznie większy wzrost stężenia GH zaobserwowano w grupie trenującej w warunkach hipoksji normobarycznej.

Kolejną zmienną jest stosowanie niskiej intensywności i dużej objętości treningowej, która według wielu autorów jest czynnikiem mogącym wpływać na stężenie GH (Kon i in. 2010; 2012; 2014; Yan i in. 2016). Pomimo, iż nie zostało to w pełni ustalone, uważa się, że w sygnalizację anaboliczną tkanki mięśni szkieletowych zaangażowanych jest wiele czynników, w tym stres metaboliczny, tempo i rekrutacja włókien mięśniowych (Gonzalez 2016). Uważa się, że niedotlenienie może mieć wpływ na te czynniki poprzez zmianę rekrutacji włókien mięśniowych (przejście z włókien typu I do typu II) i/lub nasilenie stresu metabolicznego w mięśniach podczas ćwiczeń (Feriche i in. 2017). Kilka badań sugeruje, że podwyższone stężenie GH w niedotlenieniu leży u podstaw większej hipertrofii i przyrostu siły mięśniowej w porównaniu z treningiem w normoksji (Kurobe i in. 2015; Yan i in. 2016).

Rozpoczęcie protokołu treningu oporowego przypada na 8 tydzień od rekonstrukcji WKP, a współczesna literatura sugeruje, że właśnie od 8 tygodnia należy rozpocząć fazę hipertrofii, gdzie jej optymalizacja powinna wynikać z mechanizmów związanych z adaptacją nerwowo-mięśniową (Kakavas i in. 2021). Dlatego postanowiono wykorzystać rozkład obciążenia krokowego bazującego na zmiennym tempie ruchu (Ryc. 4), dużej liczbie powtórzeń 12 (UNI/BIL), o krótkiej przerwie wypoczynkowej 50 s, zastosowanej skali RIR 2 (Tab. 2). W związku z tym poszukując związku między rodzajem treningu siłowego, a poziomem GH, warto odwołać się do pracy (Kon i in. 2010), analizująca wpływ tempa ruchu 2/0/2/0 i 5/0/3/0 na stężenie GH w przysiadzie ze sztangą z 80% 1RM/ 5 serii/ 3 minuty odpoczynku i powtórzeniami do upadku mięśniowego. Badania te wykazały, iż największy wzrost GH osiągnięto przy tempie ruchu 2/0/2/0 ($13,7 \pm 9,2$ GH). Z kolei przy tempie 5/0/3/0 wzrósł on średnio o ($9,95 \pm 7,3$ GH). Autorzy odnotowali wyższą średnią liczbę powtórzeń potrzebnych do osiągnięcia upadku mięśniowego przy tempie ruchu 2/0/2/0

($59,4 \pm 5,5$) i 5/0/3/0 ($42,4 \pm 5,4$), co może mieć wpływ na stężenie GH. Byłoby to zgodne z pracą Wilk i in. (2018), gdzie najwyższe stężenie GH i IGF-1 stwierdzono przy zwiększonej liczbie serii. Ponadto kilka innych prac naukowych wskazuje, iż trening z niską intensywnością 50% 1RM przy umiarkowanej okluzji (lokalna hipoksja), powoduje wzrost stężenia GH (Reeves i in. 2006; Pierce i in. 2006). Z drugiej strony ćwiczenia o niskiej intensywności bez okluzji nie wykazały zmian w stężeniu GH (Takarada i in. 2000; Goto i in. 2008). Porównanie treningu oporowego w warunkach hipoksji normobarycznej i normoksji składającego się z dwóch ćwiczeń, z wykorzystaniem 50% 1RM bazując na 5 seriach po 14 powtórzeń wykazało, iż wydzielanie GH z przysadki mózgowej może być stymulowane przez zwiększoną zarówno przez akumulację metaboliczną, jak i wzrost mleczanu i jonów wodorowych w warunkach hipoksji normobarycznej w porównaniu do grupy trenującej w warunkach normoksji. Dlatego stres metaboliczny wywołany samymi środkami treningowymi, takimi jak objętość i intensywność, jest niewystarczający, aby spowodować wzrost stężenia GH (Kon i in. 2012). Niestety w przeprowadzonych badaniach nie analizowano stężenia mleczanu w osoczu krwi i można tylko przypuszczać na podstawie powyżej pracy, iż może to być jedna ze zmiennych wpływających na stężenie GH. W publikacji Chycki i in. (2016), która dotyczyła porównania wpływu treningu oporowego w warunkach hipoksji normobarycznej (4000 m n.p.m., FiO_2 – 12,9%) i normoksji na stężenie GH, podczas 6 tygodniowego treningu oporowego dotyczącego przysiadów ze sztangą na 70% 1RM (8 serii po 10 powtórzeń), nie zaobserwowano istotnych zmian w stężeniu GH, co jest rozbieżne z wynikami Benso i in. (2007) i Kon i in. (2010), którzy stwierdzili, że stężenie GH w treningu oporowym wzrasta w warunkach hipoksji. Timon i in. (2022) porównując trening oporowy (70-80% 1RM/ 7 ćwiczeń/ 3 serie/ 10 powtórzeń/ 2 s-faza ekscentryczna) w normobarii i hipobarii (2320 m n.p.m., FiO_2 – 16,9%) stwierdzili 4-5 krotny wzrost stężenia GH w grupie hipoksji normobarycznej. Warto się w tym konkretnym przypadku odnieść do prac Gonzalez (2016) oraz Belen Feriche i in. (2020), gdzie wysokość była jednakowa, jak powyżej z tą różnicą, iż badani wykonywali 3 ćwiczenia (10-12 powtórzeń/ 3 serie/ RIR-2/ Tempo 2:0:2:0), a badacze ci nie uzyskali istotnych zmian w stężeniu GH w 3/ 5/ 10/ 15/ 30 min po ukończonej sesji treningowej. Rozbieżność w wynikach badań w obrębie wpływu warunków hipoksji normobarycznej i treningu oporowego na stężenie GH skłaniają do rozpatrzenia tego tematu z podziałem na kilka zmiennych, takich jak poziom FiO_2 , czas trwania przerwy pomiędzy seriami i objętość oraz intensywność treningową.

Kolejnym hormonem był IGF-1 w wyniku przeprowadzonych badań otrzymano istotne statystycznie zmiany IGF-1 zaobserwowano tylko w fazie przed i 30 min po ukończonej sesji w grupie GHS (Tab. 6) (Ryc. 5). Należy zaznaczyć, że trudno jednoznacznie rozpoznać fizjologiczną rolę osi GH/IGF-1 podczas wysiłku fizycznego. Wiadomo, iż wydzielanie GH powoduje wytwarzanie IGF-1 z wątroby, który odgrywa główną rolę w hipertrofii mięśni szkieletowych (Borst i in. 2001). Jednakże hipertrofia mięśni szkieletowych może również wystąpić bez wzrostu stężenia IGF-1 stymulowanego wzrostem stężenia GH, prawdopodobnie poprzez inne mechanizmy stymulacji stężenia IGF-1. Ponadto uzyskane wyniki pokazują wzrost stężenia IGF-1, zwłaszcza w grupie GHS po ćwiczeniach oporowych, biorąc pod uwagę, iż IGF-1 odpowiada za kontrolę i przebudowę tkanek w naszym organizmie można stwierdzić, że stosowanie ćwiczeń bazujących na tempie, zwłaszcza z wydłużoną fazą ekscentryczną, powoduje wzrost stężenia IGF-1, co byłoby zgodne z pracą Khalid i in. (2020). Warto w tej kwestii przytoczyć wyniki Goto i in. (2008), gdzie zaobserwowano, iż wolne tempo 3:0:3:0 zwiększa wyrzut GH przy niskiej intensywności 50% 1RM. W pracy Chycki i in. (2016) wykazano, że stosowanie obciążenia 70% 1RM w 8 seriach po 10 powtórzeń z 3-minutową przerwą wypoczynkową, wskazało na silniejszą odpowiedź neuroendokrynną IGF-1 po treningu oporowym wykonywanym w niedotlenieniu normobarycznym. Wykazano, że połączenie ćwiczeń oporowych w hipoksji jest lepsze od treningu w warunkach normoksji pod względem wydzielania IGF-1. Innym aspektem jest wykorzystanie form aerobowych w stworzonym protokole, gdyż bazując na doświadczeniach z pracy Eliakim i Nemet (2013), stwierdzono, iż zdolność do zwiększania stężenia krążącego IGF-1 koreluje z możliwościami krążeniowo-oddechowymi badanych. Utwierdziło to zastosowanie w protokole, w zależności od możliwości zdrowotnych pacjenta, jednostek o charakterze biegowym. Oprócz stymulowania poprawy VO_{2max} w procesie powrotu do sportu dodatkowe stosowanie niepełnej przerwy wypoczynkowej pomiędzy ćwiczeniami oporowymi w protokole może potęgować ten efekt. Konstatując zarówno ćwiczenia aerobowe, jak i oporowe powodują znaczny, istotny statystycznie wzrost stężenia hormonów, zwłaszcza w warunkach hipoksyjnych.

IGF-1 w decydujący sposób kontroluje rozwój i przebudowę kości (McCarthy i Centrella 2001). Indukuje ekspresję HIF w komórkach, w tym również w osteoblastach (Yu i in. 2012), może tam stymulować VEGF, zwiększając wzrost naczyń krwionośnych, jak również wspomagać proces gojenia tkanek. Zagojenie się połączenia ścięgno-kość jest jednym z kluczowych elementów decydujących o pomyślności rekonstrukcji WKP (Tian i in.

2023). Proces ten jest skomplikowany ponieważ, przeszczepione ścięgno musi przejść przez tunel kostny, co utrudnia proces gojenia z tkanką kostną, gdyż wymaga to zespolenia dwóch różnych tkanek. W normalnych warunkach ścięgno w kanale ulega całkowitemu skostnieniu (Zhao i in. 2022; Lu i in. 2019). Niezwykle istotny jest prawidłowy proces gojenia, gdyż wytworzenie tkanki bliznowatej na połączeniu ścięgno-kość może skutkować nieodpowiednimi właściwościami mechanicznymi, natomiast brak zrostu przeszczepionego ścięgna w kanale kostnym może doprowadzić do zwichnięcia przeszczepu, co pogorszyłoby stabilność operowanego stawu kolanowego. Badacze podejmują różne działania mające na celu wspomaganie gojenia przeszczepionego ścięgna oraz tkanki kostnej obejmujące m.in. komórki macierzyste, cytokiny, jak również stymulację mechaniczną (Tian i in. 2023), jednak nie zostało podjęte w badaniach naukowych wykorzystanie hipoksji normobarycznej jako środka wspomagającego.

Podsumowując jeśli chce się uwzględnić periodyzację w protokole rehabilitacyjnym z wykorzystaniem warunków hipoksji normobarycznej i jej wpływ na GH i IGF-1, to oprócz takich zmiennych jak TUT i tempo ruchu, należy również zwrócić uwagę na wpływ przerwy wypoczynkowej pomiędzy seriami, gdzie duża objętość wraz ze środowiskiem niedotlenionym może prowadzić do ostrych reakcji fizjologicznych i tym samym wpływać na poziom GH i IGF-1.

Mechanizm związany z uwalnianiem EPO w warunkach hipoksji normobarycznej został dobrze opisany w wielu pracach naukowych (Semenza 2004; Jelkmann 1992). Wykonywanie wysiłku fizycznego w hipoksji wiąże się z wpływem na stężenie EPO poprzez spadek ciśnienia parcjalnego tlenu (PO_2) w tkankach (Czuba i in. 2014). Przeprowadzone badania wykazały istotne statystycznie zmiany tylko w grupie GHS 30 minut i 48 h po zakończeniu protokołu (Tab. 8) (Ryc. 7). Uważa się, że uwalnianie EPO związane jest z dwoma czynnikami FiO_2 i czasem trwania objętości (Mackenzie i in. 2008). Praca Ge i in. (2002) wykazała, iż optymalny próg do wzrostu EPO wywołanego hipoksją zależy od wysokości 2100-2500 m n.p.m (FiO_2 od 16,9 do 15,7). Z kolei Knaupp i in. (1992) udowodnili, że co najmniej 120 min ciągłego niedotlenienia z FiO_2 – 10,5% jest konieczne do wzmocnienia stymulowania produkcji EPO przez nerki. Inna praca zaleca ciągłą ekspozycję na wysokości 3000 m n.p.m (FiO_2 – 15%) przez co najmniej 114 min i 4000 m n.p.m (FiO_2 – 13%) przez 84 min, co skutkuje podwyższenie EPO z 16 do 22,5 i odpowiednio 16,7 do 28 ng/ml (Mackenzie i in. 2008). W pracy Wojan i in. (2021) poszukującej najkrótszej drogi stymulacji wzrostu stężenia EPO w hipoksji przerywanej, stwierdzono, że 8 cykli

4-minutowej hipoksji przerywanej ma podobny wpływ na zawartość EPO jak 120-minutowa sesja ciągłego niedotlenienia. Kolejne pomiary wykazały, że maksymalny wzrost stężenia EPO nastąpił 4,5 godziny po interwencji, gdzie grupa 8 cykli hipoksji przerywanej odnotowała wzrost o $65 \pm 65\%$, a grupa hipoksji ciągłej $85 \pm 76\%$. Autorzy doszli do wniosku, że osiem serii okresowego niedotlenienia z nasyceniem krwi tętniczej tlenem wynoszącym 80% indukowało uwalnianie EPO. Kolejną zmienną mającą wpływ na stężenie EPO jest stres metaboliczny wywołany wysiłkiem fizycznym. Byłoby to zgodne z czasem trwania jednostek treningowych w zastosowanym protokole, w zależności od formy treningu UNI/BIL, jak i całkowitego TUT. Najkrótsza jednostka, uwzględniając dodatkowo rozgrzewkę, przerwy wypoczynkowe pomiędzy seriami i ćwiczeniami wyniosła, 77 min, a najdłuższa 118 min (Tab. 3). Kolejna praca autorstwa Mackenzie i in. (2008) przeprowadzona na wysokości 3500 m n.p.m. ($FiO_2 - 13\%$) podczas wysiłku krążeniowo-oddechowego na bieżni (5-8 serii/ 3 min wysiłek) przy prędkości której zawodnicy osiągalni tętno 150 u/min wykazała nasilenie EPO podczas 120 min objętości na ($FiO_2 - 14,8\%$) w połączeniu z stresem metabolicznym, który zwiększył dwukrotnie stężenie EPO w osoczu w porównaniu do grupy bez aktywności fizycznej. Niestety w powyższej pracy badano stężenie EPO tylko bezpośrednio po każdym mezocyklu, który przypadał na fazę superkompensacji w formie BIL, a więc najkrótszej łącznej objętości treningu. Dlatego uważa się, iż poszerzenie analizy stężenia EPO w poszczególnych mikrocyklach uwzględniając zarówno łączny czas treningu, jak i TUT pozwoli na lepsze zrozumienie oddziaływania objętości treningowej na stężenie EPO.

9.1. OGRANICZENIA W BADANIU WŁASNYM

W badaniu wystąpiły ograniczenia. Wielkość badanej próby oszacowano za pomocą oprogramowania G*Power dla testu parametrycznego wyliczono minimalną liczebność na poziomie 39 osób, natomiast dla testu nieparametrycznego na poziomie 40 osób. Liczebność w grupach mogła być niewystarczająca dla uzyskania istotności statystycznej wyników badania. Wynikało to jednak z doboru grupy badanej na najwyższym poziomie rozgrywkowym w piłce nożnej (ekstraklasy oraz 1 ligi), jak również ze specyfiką prowadzonych badań. Następnym ograniczeniem w pracy było kryterium włączenia do grupy (płeć – mężczyzna, ta sama metoda operacyjna). Kolejne ograniczenia wynikały z analizy

stężenia GH, IGF-1 oraz EPO, które przypadają na ostatni mikrocykl z każdego mezocyklu bazującego na tempie 2:0:2:0 oraz ćwiczeniach BIL. Rozszerzenie badania o wpływ pozostałych wartości tempa, jak i ćwiczeń UNI i BIL, jak i stężenia mleczanu niewątpliwie podniosłoby wartość pracy.

10. PODSUMOWANIE I WNIOSKI

Zwiększająca się liczba ponownych uszkodzeń WKP skłania badaczy do poszukiwania coraz to nowszych i skuteczniejszych metod zapobiegania ponownemu urazowi. Uwzględniając potencjalne przyczyny urazu oraz fakt, iż w większości przypadków dochodzi do uszkodzenia w mechanizmie bezkontaktowym należy zwrócić uwagę na stan zawodnika przed dopuszczeniem do cyklu treningowego oraz rozgrywek meczowych. Ocena stanu wgojenia przeszczepu do kości jest metodą inwazyjną, nie jest więc powszechnie stosowana do określenia gotowości do podjęcia rozgrywek. Należy więc stosować wszelkie możliwe środki, które, biorąc pod uwagę mechanizm działania na organizm i poszczególne tkanki, będą maksymalizować procesy gojenia, jednocześnie zmniejszając ryzyko powikłań pooperacyjnych. Mechaniczne zabezpieczenie przeszczepu, prawidłowa jego przebudowa, jak również przywrócenie prawidłowych parametrów mięśniowych wydają się być kluczowymi elementem sukcesu końcowego efektu leczenia. Poziom mistrzowski charakteryzuje się najwyższym przygotowaniem motorycznym zawodnika, wymaga więc zastosowania wszelkich starań i środków by przywrócić stan piłkarza do tego sprzed zabiegu bądź wyższego. Stosowanie hipoksji normobarycznej jest coraz częściej opisywanym środkiem treningowym natomiast dotychczas nie opisywano go jako formy wspomagającej stan po rekonstrukcji WKP, co zostało poddane analizie w powyższej pracy.

Uzyskane wyniki badań z dynamometru izokinektycznego wskazują, iż zastosowany model periodyzacji (rozkład obciążenia krokowego) w protokole rehabilitacji WKP znacząco wpływa na poprawę APTZ i APTP w grupie GHS jak i GNS w stosunku do GK. Dodatkowo uzyskane wyniki stosunku szczytowego momentu obrotowego prostowników względem zginaczy (RTPZ) wykazują iż tylko w przypadku prędkości kątowej $60^{\circ}/s$ wystąpił istotny statystycznie niższy wynik w zakresie RTPZ dla kończyny operowanej, podczas gdy dla kończyny zdrowej wyniki nie zostały uznane za istotne statystycznie. Dlatego zbliżone wyniki PT w grupie GHS i GNS skłaniają ku zasadności implikacji periodyzacji w protokołach rehabilitacyjnych.

Zastosowanie warunków hipoksji normobarycznej jest nowatorskim podejściem w rehabilitacji pacjentów po rekonstrukcji WKP. Innowacyjność tego podejścia polega na jego wpływie na regenerację tkanek i przyspieszenie powrotu do pełnej sprawności. Ekspozycja na hipoksję normobaryczną aktywuje mechanizmy kompensacyjne, takie jak

zwiększenie produkcji EPO, co prowadzi do poprawy utlenowania tkanek poprzez zwiększenie liczby czerwonych krwinek. Dodatkowo hipoksja sprzyja wydzielaniu GH i IGF-1, zwiększa aktywność procesów angiogenezy, co wspiera regenerację mięśni, ścięgien i więzadeł, co z kolei jest niezwykle istotne wśród pacjentów po tego typu operacji, szczególnie u sportowców. U pacjentów po rekonstrukcji WKP hipoksja normobaryczna może przyczynić się do lepszej regeneracji tkanek poprzez redukcję stanu zapalnego, zwiększenie produkcji kolagenu oraz stymulację metabolizmu komórkowego. Ostatecznie zastosowanie protokołu w warunkach hipoksji normobarycznej może poprawić wyniki rehabilitacyjne, skrócić czas powrotu do aktywności sportowej i zredukować ryzyko komplikacji pooperacyjnych.

Popularyzacja sportu, w szczególności piłki nożnej, skłania badaczy z zakresu medycyny oraz trenerów przygotowania motorycznego by postęp w zakresie środków wspomagających był ciągły i pozwolił na indywidualne wspomaganie zawodników w powrocie do sprawności po przebytym urazie.

Przedstawione powyżej rozważania prowadzą do wyciągnięcia następujących wniosków:

1. Analiza wyników różnicy wartości szczytowego momentu obrotowego prostowników stawu kolanowego kończyny dolnej operowanej w stosunku do kończyny nieoperowanej (AFTP) wykazała istotne statystycznie obniżenie jego wartości po zakończeniu interwencji we wszystkich analizowanych prędkościach kątowych ($60^{\circ}/s$, $120^{\circ}/s$ oraz $180^{\circ}/s$), niezależnie od przydziału uczestników do poszczególnych grup badanych. Istotna interakcja efektu pomiaru (przed-po) z czynnikiem grupy została zaobserwowana wyłącznie dla prędkości $60^{\circ}/s$, co może wskazywać na większą skuteczność interwencji w tej prędkości w zależności od zastosowanego środowiska treningowego.
2. W przypadku różnicy wartości szczytowego momentu obrotowego zginaczy stawu kolanowego kończyny dolnej operowanej w stosunku do kończyny nieoperowanej (APTZ) istotne statystycznie obniżenie wartości zaobserwowano jedynie dla prędkości kątowej $60^{\circ}/s$, niezależnie od przynależności do grupy eksperymentalnej. Dla prędkości $120^{\circ}/s$ i $180^{\circ}/s$ nie odnotowano istotnych zmian ani w zakresie efektów głównych, ani interakcji, co może sugerować ograniczoną skuteczność zastosowanego protokołu treningowego w zakresie poprawy symetrii siły zginaczy stawu kolanowego przy wyższych prędkościach.

3. Analiza stosunku szczytowego momentu obrotowego mięśni prostowników względem zginaczy stawu kolanowego (RTPZ) wykazała istotne statystycznie różnice pomiędzy kończyną operowaną, a nieoperowaną przed interwencją, z wyższymi wartościami wskaźnika dla kończyny operowanej. Po zakończeniu interwencji różnice te uległy redukcji, szczególnie dla prędkości 60°/s, dla której nie stwierdzono już istotnych różnic pomiędzy kończynami. Może to świadczyć o korzystnym wpływie protokołu treningowego na równowagę siły mięśniowej między grupami antagonistycznych mięśni stawu kolanowego.
4. Największy wzrost stężenia hormonu wzrostu (GH) oraz insulinopodobnego czynnika wzrostu-1 (IGF-1) odnotowano 30 minut po zakończeniu sesji treningowej realizowanej w warunkach hipoksji normobarycznej. W grupach normoksji (GNS) oraz kontrolnej (GK) nie zaobserwowano istotnych statystycznie zmian w stężeniu tych hormonów, co może wskazywać na specyficzny efekt środowiska hipoksji normobarycznej w zakresie aktywacji osi anabolicznej.
5. Zastosowanie protokołu treningowego w warunkach hipoksji normobarycznej skutkowało istotnym statystycznie wzrostem stężenia erytropoetyny (EPO) 30 minut po zakończeniu sesji treningowej względem wartości wyjściowej. W grupach normoksji (GNS) oraz kontrolnej (GK) nie odnotowano istotnych zmian, co potwierdza wpływ warunków hipoksji normobarycznej na aktywację mechanizmów odpowiedzialnych za odpowiedź erytropoetyczną.

11. PIŚMIENNICTWO

1. Amann, Markus, Lee M Romer, Andrew W Subudhi, David F Pegelow, i Jerome A Dempsey. 2007. „Severity of arterial hypoxaemia affects the relative contributions of peripheral muscle fatigue to exercise performance in healthy humans”. *The Journal of Physiology* 581 (Pt 1): 389–403.
2. Ambroży, Tadeusz, Marcin Maciejczyk, Andrzej T. Klimek, Szczepan Wiecha, Arkadiusz Stanula, Piotr Snopkowski, Tomasz Pałka, i in. 2020. „The Effects of Intermittent Hypoxic Training on Anaerobic and Aerobic Power in Boxers”. *International Journal of Environmental Research and Public Health* 17 (24): 9361.
3. Ardern, Clare L., Nicholas F. Taylor, Julian A. Feller, i Kate E. Webster. 2014. „Fifty-Five per Cent Return to Competitive Sport Following Anterior Cruciate Ligament Reconstruction Surgery: An Updated Systematic Review and Meta-Analysis Including Aspects of Physical Functioning and Contextual Factors”. *British Journal of Sports Medicine* 48 (21): 1543–52.
4. Babbie, E., 2003. *Badania społeczne w praktyce*. Warszawa: Wydawnictwo Naukowe PWN.
5. Barton, Elisabeth R., Linda Morris, Antonio Musaro, Nadia Rosenthal, i H. Lee Sweeney. 2002. „Muscle-Specific Expression of Insulin-like Growth Factor I Counters Muscle Decline in Mdx Mice”. *The Journal of Cell Biology* 157 (1): 137–48.
6. Barton-Davis, E. R., D. I. Shoturma, A. Musaro, N. Rosenthal, i H. L. Sweeney. 1998. „Viral Mediated Expression of Insulin-like Growth Factor I Blocks the Aging-Related Loss of Skeletal Muscle Function”. *Proceedings of the National Academy of Sciences of the United States of America* 95 (26): 15603–7.
7. Bengtsson, Håkan, Jan Ekstrand, Markus Waldén, i Martin Häggglund. 2020. „Few Training Sessions between Return to Play and First Match Appearance Are Associated with an Increased Propensity for Injury: A Prospective Cohort Study of Male Professional Football Players during 16 Consecutive Seasons”. *British Journal of Sports Medicine* 54 (7): 427–32.
8. Bennell, K., H. Wajswelner, P. Lew, A. Schall-Riaucour, S. Leslie, D. Plant, i J. Cirone. 1998. „Isokinetic Strength Testing Does Not Predict Hamstring Injury in Australian Rules Footballers”. *British Journal of Sports Medicine* 32 (4): 309–14.
9. Benso, Andrea, Fabio Broglio, Gianluca Aimaretti, Barbara Lucatello, Fabio Lanfranco, Ezio Ghigo, i Silvia Grottoli. 2007. „Endocrine and Metabolic Responses to Extreme Altitude and Physical Exercise in Climbers”. *European Journal of Endocrinology* 157 (6): 733–40.
10. Bompa, Tudor, i Carlo Buzzichelli. 2015. *Periodization Training for Sports*. Champaign.
11. Borst, Stephen E., Diego V. De Hoyos, Linda Garzarella, Kevin Vincent, Brad H. Pollock, David T. Lowenthal, i Michael L. Pollock. 2001. „Effects of Resistance Training on Insulin-like Growth Factor-I and IGF Binding Proteins”. *Medicine and Science in Sports and Exercise*, kwiecień, 648–53.
12. Brocherie, Franck, Olivier Girard, Raphael Faiss, i Grégoire P. Millet. 2015. „High-Intensity Intermittent Training in Hypoxia: A Double-Blinded, Placebo-Controlled Field Study in Youth Football Players”. *Journal of Strength and Conditioning Research* 29 (1): 226–37.
13. Chia, Lionel, Danilo De Oliveira Silva, Matthew Whalan, Marnee J. McKay, Justin Sullivan, Colin W. Fuller, i Evangelos Pappas. 2022. „Non-Contact Anterior Cruciate Ligament Injury Epidemiology in Team-Ball Sports: A Systematic Review with Meta-

- Analysis by Sex, Age, Sport, Participation Level, and Exposure Type". *Sports Medicine (Auckland, N.Z.)* 52 (10): 2447–67.
14. Chycki, Jakub, Miłosz Czuba, Artur Gołaś, Adam Zajac, Olga Fidos-Czuba, Adrian Młynarz, i Wojciech Smółka. 2016. „Neuroendocrine Responses and Body Composition Changes Following Resistance Training Under Normobaric Hypoxia”. *Journal of Human Kinetics* 53 (październik):91–98.
 15. Coombs, Rosalind, i Gerard Garbutt. 2002. „Developments in the Use of the Hamstring/Quadriceps Ratio for the Assessment of Muscle Balance”. *Journal of Sports Science & Medicine* 1 (3): 56–62.
 16. Cormie, Prue, Michael McGuigan, i Robert Newton. 2011. „Developing Maximal Neuromuscular Power: Part 2 Training Considerations for Improving Maximal Power Production”. *Sports Medicine* 41 (luty):125–46.
 17. Czuba, Miłosz, Adam Maszczyk, Dagmara Gerasimuk, Robert Roczniok, Olga Fidos-Czuba, Adam Zajac, Artur Gołaś, Aleksandra Mostowik, i Jozef Langfort. 2014. „The Effects of Hypobaric Hypoxia on Erythropoiesis, Maximal Oxygen Uptake and Energy Cost of Exercise under Normoxia in Elite Biathletes”. *Journal of Sports Science & Medicine* 13 (4): 912–20.
 18. Delextrat, A., J. Gregory, i D. Cohen. 2010. „The Use of the Functional H:Q Ratio to Assess Fatigue in Soccer”. *International Journal of Sports Medicine* 31 (3): 192–97.
 19. Dingenen, Bart, Bart Malfait, Stefaan Nijs, Koen H. E. Peers, Styn Vereecken, Sabine M. P. Verschueren, i Filip F. Staes. 2015. „Can Two-Dimensional Video Analysis during Single-Leg Drop Vertical Jumps Help Identify Non-Contact Knee Injury Risk? A One-Year Prospective Study”. *Clinical Biomechanics (Bristol, Avon)* 30 (8): 781–87.
 20. Dixit, Manisha, Sher Bahadur Poudel, i Shoshana Yakar. 2021. „Effects of GH/IGF Axis on Bone and Cartilage”. *Molecular and Cellular Endocrinology* 519 (styczeń):111052.
 21. Drozd, Miłosz, Natalia Kędra, Joanna Motowidło, Krzysztof Ficek, Marta Bichowska-Pawęska, i Adam Zajac. 2024. „A Comparison of a Step Load Unilateral and Bilateral Resistance Training Program on the Strength and Power of the Lower Limbs in Soccer Players”. *Applied Sciences* Volume 14 (luty):1732.
 22. Drozd, Miłosz, Michał Krzysztofik, Monika Nawrocka, Magdalena Krawczyk, Krzysztof Kotuła, Alan Langer, i Adam Maszczyk. 2017. „Analysis of the 30-m running speed test results in soccer players in third soccer leagues”. *Turkish Journal of Kinesiology* 3 (1): 1–5.
 23. Eliakim, Alon, i Dan Nemet. 2013. „Endocrinology of Physical Activity and Sport”. W *Endocrinology of Physical Activity and Sport: Second Edition*, 69–83.
 24. Engert, J. C., E. B. Berglund, i N. Rosenthal. 1996. „Proliferation Precedes Differentiation in IGF-I-Stimulated Myogenesis”. *The Journal of Cell Biology* 135 (2): 431–40.
 25. Faiss, Raphaël, Olivier Girard, i Grégoire P. Millet. 2013. „Advancing Hypoxic Training in Team Sports: From Intermittent Hypoxic Training to Repeated Sprint Training in Hypoxia”. *British Journal of Sports Medicine* 47 Suppl 1 (Suppl 1): i45-50.
 26. Feriche, Belén, Amador García-Ramos, Antonio J. Morales-Artacho, i Paulino Padial. 2017. „Resistance Training Using Different Hypoxic Training Strategies: a Basis for Hypertrophy and Muscle Power Development”. *Sports Medicine - Open* 3 (marzec):12.
 27. Feriche, Belen, Brad J. Schoenfeld, Juan Bonitch-Gongora, Blanca de la Fuente, Filipa Almeida, Javier Argüelles, Cristina Benavente, i Paulino Padial. 2020. „Altitude-Induced Effects on Muscular Metabolic Stress and Hypertrophy-Related Factors after a Resistance Training Session”. *European Journal of Sport Science* 20 (8): 1083–92.
 28. Ficek, Krzysztof, Jolanta Rajca, Jerzy Cholewiński, Agnieszka Racut, Paweł Gwiazdoń, Krzysztof Przednowek, i Grzegorz Hajduk. 2021. „Analysis of Intercondylar Notch Size

- and Shape in Patients with Cyclops Syndrome after Anterior Cruciate Ligament Reconstruction". *Journal of Orthopaedic Surgery and Research* 16 (1): 554.
29. Filopoulos, Dean, Stuart J. Cormack, i Douglas G. Whyte. 2017. „Normobaric Hypoxia Increases the Growth Hormone Response to Maximal Resistance Exercise in Trained Men". *European Journal of Sport Science* 17 (7): 821–29.
 30. Fischer, Felix, Christian Fink, Elmar Herbst, Christian Hoser, Caroline Hepperger, Cornelia Blank, i Peter Gföller. 2018. „Higher Hamstring-to-Quadriceps Isokinetic Strength Ratio during the First Post-Operative Months in Patients with Quadriceps Tendon Compared to Hamstring Tendon Graft Following ACL Reconstruction". *Knee Surgery, Sports Traumatology, Arthroscopy* 26 (2): 418–25.
 31. Frankfort-Nachmias, C., Nachmias, D., 2001. *Metody badawcze w naukach społecznych*. Poznań: Zys i S-ka.
 32. Gabbett, Tim J. 2016. „The Training-Injury Prevention Paradox: Should Athletes Be Training Smarter and Harder?" *British Journal of Sports Medicine* 50 (5): 273–80. <https://doi.org/10.1136/bjsports-2015-095788>.
 33. Gamble, Paul. 2006. „Periodization of Training for Team Sports Athletes". *Strength & Conditioning Journal* 28 (5): 56.
 34. Gans, Itai, Julia S. Retzky, Lynne C. Jones, i Miho J. Tanaka. 2018. „Epidemiology of Recurrent Anterior Cruciate Ligament Injuries in National Collegiate Athletic Association Sports: The Injury Surveillance Program, 2004-2014". *Orthopaedic Journal of Sports Medicine* 6 (6): 2325967118777823.
 35. Ge, Ri-Li, S. Witkowski, Y. Zhang, C. Alfrey, M. Sivieri, T. Karlsen, G. K. Resaland, M. Harber, J. Stray-Gundersen, i B. D. Levine. 2002. „Determinants of Erythropoietin Release in Response to Short-Term Hypobaric Hypoxia". *Journal of Applied Physiology (Bethesda, Md.: 1985)* 92 (6): 2361–67.
 36. Ghahary, A., E. E. Tredget, Q. Shen, R. T. Kilani, P. G. Scott, i Y. Houle. 2000. „Mannose-6-Phosphate/IGF-II Receptors Mediate the Effects of IGF-1-Induced Latent Transforming Growth Factor Beta 1 on Expression of Type I Collagen and Collagenase in Dermal Fibroblasts". *Growth Factors (Chur, Switzerland)* 17 (3): 167–76.
 37. Gonzalez, Adam M. 2016. „Acute Anabolic Response and Muscular Adaptation After Hypertrophy-Style and Strength-Style Resistance Exercise". *Journal of Strength and Conditioning Research* 30 (10): 2959–64.
 38. Goto, Kazushige, Masao Higashiyama, Naokata Ishii, i Kaoru Takamatsu. 2005. „Prior endurance exercise attenuates growth hormone response to subsequent resistance exercise". *European journal of applied physiology* 94 (czerwiec):333–38.
 39. Goto, Kazushige, Kazumasa Takahashi, Masato Yamamoto, i Kaoru Takamatsu. 2008. „Hormone and Recovery Responses to Resistance Exercise with Slow Movement". *The Journal of Physiological Sciences: JPS* 58 (1): 7–14.
 40. Gou, Peng, Xinran Cheng, Jie Leng, i Na Su. 2022. „A Real-World Study of Recombinant Human Growth Hormone in the Treatment of Idiopathic Short Stature and Growth Hormone Deficiency". *Therapeutics and Clinical Risk Management* 18 (marzec):113–24.
 41. Grassi, Alberto, Luca Macchiarola, Matteo Filippini, Gian Andrea Lucidi, Francesco Della Villa, i Stefano Zaffagnini. 2019. „Epidemiology of Anterior Cruciate Ligament Injury in Italian First Division Soccer Players". *Sports Health* 12 (3): 279–88.
 42. Habets, Bas, J. Bart Staal, Marsha Tijssen, i Robert van Cingel. 2018. „Intrarater reliability of the Humac NORM isokinetic dynamometer for strength measurements of the knee and shoulder muscles". *BMC Research Notes* 11 (1): 15.

43. Hamlin, Michael J., Will G. Hopkins, i Stephen C. Hollings. 2015. „Effects of Altitude on Performance of Elite Track-and-Field Athletes”. *International Journal of Sports Physiology and Performance* 10 (7): 881–87.
44. Harries, Simon K., David R. Lubans, i Robin Callister. 2015. „Systematic Review and Meta-Analysis of Linear and Undulating Periodized Resistance Training Programs on Muscular Strength”. *Journal of Strength and Conditioning Research* 29 (4): 1113–25.
45. Hewett, T. E., J. S. Torg, i B. P. Boden. 2009. „Video Analysis of Trunk and Knee Motion during Non-Contact Anterior Cruciate Ligament Injury in Female Athletes: Lateral Trunk and Knee Abduction Motion Are Combined Components of the Injury Mechanism”. *British Journal of Sports Medicine* 43 (6): 417–22.
46. Hewett, Timothy E., Kevin R. Ford, Yingying Y. Xu, Jane Khoury, i Gregory D. Myer. 2017. „Effectiveness of Neuromuscular Training Based on the Neuromuscular Risk Profile”. *The American Journal of Sports Medicine* 45 (9): 2142–47.
47. Hewett, Timothy E., Gregory D. Myer, Kevin R. Ford, Robert S. Heidt, Angelo J. Colosimo, Scott G. McLean, Antonie J. van den Bogert, Mark V. Paterno, i Paul Succop. 2005. „Biomechanical Measures of Neuromuscular Control and Valgus Loading of the Knee Predict Anterior Cruciate Ligament Injury Risk in Female Athletes: A Prospective Study”. *The American Journal of Sports Medicine* 33 (4): 492–501.
48. Högberg, Johan, Ramana Piussi, Mathias Wernbom, Francesco Della Villa, Rebecca Simonsson, Kristian Samuelsson, Roland Thomeé, i Eric Hamrin Hamrin Senorski. 2024. „No Association Between Hamstrings-to-Quadriceps Strength Ratio and Second ACL Injuries After Accounting for Prognostic Factors: A Cohort Study of 574 Patients After ACL-Reconstruction”. *Sports Medicine - Open* 10 (styczeń):7.
49. Hollings, Stephen, Will Hopkins, i Patria Hume. 2012. „Environmental and venue-related factors affecting the performance of elite male track athletes”. *European Journal of Sport Science* 12 (maj):201–6.
50. Hoover, Donald L., William R. VanWye, i Lawrence W. Judge. 2016. „Periodization and Physical Therapy: Bridging the Gap between Training and Rehabilitation”. *Physical Therapy in Sport: Official Journal of the Association of Chartered Physiotherapists in Sports Medicine* 18 (marzec):1–20.
51. Hudek, Robert, Silvia Schmutz, Felix Regenfelder, Bruno Fuchs, i Peter P. Koch. 2009. „Novel Measurement Technique of the Tibial Slope on Conventional MRI”. *Clinical Orthopaedics and Related Research* 467 (8): 2066–72.
52. Hui, Catherine, Lucy J. Salmon, Alison Kok, Shinichi Maeno, James Linklater, i Leo A. Pinczewski. 2011. „Fifteen-Year Outcome of Endoscopic Anterior Cruciate Ligament Reconstruction With Patellar Tendon Autograft for “Isolated” Anterior Cruciate Ligament Tear”. *The American Journal of Sports Medicine* 39 (1): 89–98.
53. Ishii, Yoshimasa, Masataka Deie, Nobuo Adachi, Yuji Yasunaga, Patrick Sharman, Yutaka Miyanaga, i Mitsuo Ochi. 2005. „Hyperbaric Oxygen as an Adjuvant for Athletes”. *Sports Medicine (Auckland, N.Z.)* 35 (9): 739–46.
54. Jelkmann, W. 1992. „Erythropoietin: Structure, Control of Production, and Function”. *Physiological Reviews* 72 (2): 449–89.
55. Jelkmann, Wolfgang. 2011. „Regulation of Erythropoietin Production”. *The Journal of Physiology* 589 (Pt 6): 1251–58.
56. Joseph, Allan M., Christy L. Collins, Natalie M. Henke, Ellen E. Yard, Sarah K. Fields, i R. Dawn Comstock. 2013. „A Multisport Epidemiologic Comparison of Anterior Cruciate Ligament Injuries in High School Athletics”. *Journal of Athletic Training* 48 (6): 810–17.
57. Józefiak A, Pacholska J, Kędzia W., 2008. Rola IGF-1 i IGFBP w procesie neogenezy. *Perinatologia, Neonatologia i Ginekologia*. 2008; 1: 175-183

58. Kakavas, George, Nikolaos Malliaropoulos, Georgios Bikos, Ricard Pruna, Xavier Valle, Panagiotis Tsaklis, i Nicola Maffulli. 2021. „Periodization in Anterior Cruciate Ligament Rehabilitation: A Novel Framework”. *Medical Principles and Practice: International Journal of the Kuwait University, Health Science Centre* 30 (2): 101–8.
59. Katayama, Keisho, Kazushige Goto, Koji Ishida, i Futoshi Ogita. 2010. „Substrate Utilization during Exercise and Recovery at Moderate Altitude”. *Metabolism: Clinical and Experimental* 59 (7): 959–66.
60. Keays, Susan L., Joanne E. Bullock-Saxton, Anthony C. Keays, Peter A. Newcombe, i Margaret I. Bullock. 2007. „A 6-Year Follow-up of the Effect of Graft Site on Strength, Stability, Range of Motion, Function, and Joint Degeneration after Anterior Cruciate Ligament Reconstruction: Patellar Tendon versus Semitendinosus and Gracilis Tendon Graft”. *The American Journal of Sports Medicine* 35 (5): 729–39.
61. Khalid, Katarzyna, Artur Szewczyk, Justyna Kiszalkiewicz, Monika Migdalska-Sęk, Daria Domańska-Senderowska, Michał Brzeziński, Ewelina Lulińska, Anna Jegier, i Ewa Brzezińska-Lasota. 2020. „Type of training has a significant influence on the GH/IGF-1 axis but not on regulating miRNAs”. *Biology of Sport* 37 (3): 217–28.
62. Kharazi, Mohamadreza, Sebastian Bohm, Christos Theodorakis, Falk Mersmann, i Adamantios Arampatzis. 2021. „Quantifying Mechanical Loading and Elastic Strain Energy of the Human Achilles Tendon during Walking and Running”. *Scientific Reports* 11 (1): 5830. <https://doi.org/10.1038/s41598-021-84847-w>.
63. Kim, Youngji, Mitsuaki Kubota, Taisuke Sato, Tetsuya Inui, Ryuichi Ohno, i Muneaki Ishijima. 2022. „Psychological Patient-Reported Outcome Measure after Anterior Cruciate Ligament Reconstruction: Evaluation of Subcategory in ACL-Return to Sport after Injury (ACL-RSI) Scale”. *Orthopaedics & Traumatology, Surgery & Research: OTSR* 108 (3): 103141.
64. Knaupp, W., S. Khilnani, J. Sherwood, S. Scharf, i H. Steinberg. 1992. „Erythropoietin Response to Acute Normobaric Hypoxia in Humans”. *Journal of Applied Physiology (Bethesda, Md.: 1985)* 73 (3): 837–40.
65. Kon, Michihiro, Tatsuaki Ikeda, Toshiyuki Homma, Takayuki Akimoto, Yasuhiro Suzuki, i Takashi Kawahara. 2010a. „Effects of Acute Hypoxia on Metabolic and Hormonal Responses to Resistance Exercise”. *Medicine and Science in Sports and Exercise* 42 (7): 1279–85.
66. Kon, Michihiro, Tatsuaki Ikeda, Toshiyuki Homma, i Yasuhiro Suzuki. 2012. „Effects of Low-Intensity Resistance Exercise under Acute Systemic Hypoxia on Hormonal Responses”. *Journal of Strength and Conditioning Research* 26 (3): 611–17.
67. Kon, Michihiro, Nao Ohiwa, Akiko Honda, Takeo Matsubayashi, Tatsuaki Ikeda, Takayuki Akimoto, Yasuhiro Suzuki, Yuichi Hirano, i Aaron P. Russell. 2014. „Effects of Systemic Hypoxia on Human Muscular Adaptations to Resistance Exercise Training”. *Physiological Reports* 2 (6): e12033.
68. Kraemer, William J., i Nicholas A. Ratamess. 2004. „Fundamentals of Resistance Training: Progression and Exercise Prescription”. *Medicine and Science in Sports and Exercise* 36 (4): 674–88.
69. Kraemer, William J., Nicholas A. Ratamess, Shawn D. Flanagan, Jason P. Shurley, Janice S. Todd, i Terry C. Todd. 2017. „Understanding the Science of Resistance Training: An Evolutionary Perspective”. *Sports Medicine (Auckland, N.Z.)* 47 (12): 2415–35.
70. Krosshaug, Tron, Atsuo Nakamae, Barry P. Boden, Lars Engebretsen, Gerald Smith, James R. Slauterbeck, Timothy E. Hewett, i Roald Bahr. 2007. „Mechanisms of Anterior Cruciate Ligament Injury in Basketball: Video Analysis of 39 Cases”. *The American Journal of Sports Medicine* 35 (3): 359–67.

71. Krutsch, Werner, Clemens Memmel, Volker Krutsch, Peter Angele, Tobias Tröb, Karen Aus Der FÜnten, i Tim Meyer. 2020. „High Return to Competition Rate Following ACL Injury - A 10-Year Media-Based Epidemiological Injury Study in Men's Professional Football". *European Journal of Sport Science* 20 (5): 682–90.
72. Kurobe, Kazumichi, Zhong Huang, Masato Nishiwaki, Masayoshi Yamamoto, Hiroaki Kanehisa, i Futoshi Ogita. 2015a. „Effects of Resistance Training under Hypoxic Conditions on Muscle Hypertrophy and Strength". *Clinical Physiology and Functional Imaging* 35 (3): 197–202.
73. Laursen, Paul B., i David G. Jenkins. 2002. „The Scientific Basis for High-Intensity Interval Training: Optimising Training Programmes and Maximising Performance in Highly Trained Endurance Athletes". *Sports Medicine (Auckland, N.Z.)* 32 (1): 53–73.
74. Lautamies, Riitta, Arsi Harilainen, Jyrki Kettunen, Jerker Sandelin, i Urho M. Kujala. 2008. „Isokinetic Quadriceps and Hamstring Muscle Strength and Knee Function 5 Years after Anterior Cruciate Ligament Reconstruction: Comparison between Bone-Patellar Tendon-Bone and Hamstring Tendon Autografts". *Knee Surgery, Sports Traumatology, Arthroscopy: Official Journal of the ESSKA* 16 (11): 1009–16.
75. Lemiesz, Grzegorz, Elżbieta Lemiesz, Mariusz Wołosewicz, Jacek Aptowicz, i Cezary Kuczkowski. 2011. „The effectiveness of rehabilitation procedure after the reconstruction of the anterior cruciate ligament according to the norwegian protocol". *Polish Annals of Medicine* 18 (1): 82–95.
76. Lepley, Lindsey K., i Riann M. Palmieri-Smith. 2016. „Pre-Operative Quadriceps Activation Is Related to Post-Operative Activation, Not Strength, in Patients Post-ACL Reconstruction". *Knee Surgery, Sports Traumatology, Arthroscopy: Official Journal of the ESSKA* 24 (1): 236–46. <https://doi.org/10.1007/s00167-014-3371-0>.
77. Li, G., T. W. Rudy, M. Sakane, A. Kanamori, C. B. Ma, i S. L. Woo. 1999. „The Importance of Quadriceps and Hamstring Muscle Loading on Knee Kinematics and In-Situ Forces in the ACL". *Journal of Biomechanics* 32 (4): 395–400.
78. Li, Guoan, Shay Zayontz, Ephrat Most, Louis E. DeFrate, Jeremy F. Suggs, i Harry E. Rubash. 2004. „In Situ Forces of the Anterior and Posterior Cruciate Ligaments in High Knee Flexion: An in Vitro Investigation". *Journal of Orthopaedic Research: Official Publication of the Orthopaedic Research Society* 22 (2): 293–97.
79. Liao, Kai-Fang, George P. Nassis, Chris Bishop, Wei Yang, Chao Bian, i Yong-Ming Li. 2022. „Effects of Unilateral vs. Bilateral Resistance Training Interventions on Measures of Strength, Jump, Linear and Change of Direction Speed: A Systematic Review and Meta-Analysis". *Biology of Sport* 39 (3): 485–97.
80. Lorenz, Daniel, i Scot Morrison. 2015. „CURRENT CONCEPTS IN PERIODIZATION OF STRENGTH AND CONDITIONING FOR THE SPORTS PHYSICAL THERAPIST". *International Journal of Sports Physical Therapy* 10 (6): 734–47.
81. Lorenz, Daniel S., Michael P. Reiman, i John C. Walker. 2010. „Periodization: Current Review and Suggested Implementation for Athletic Rehabilitation". *Sports Health* 2 (6): 509–18.
82. Lu, Hongbin, Can Chen, Shanshan Xie, Yifu Tang, i Jin Qu. 2019. „Tendon Healing in Bone Tunnel after Human Anterior Cruciate Ligament Reconstruction: A Systematic Review of Histological Results". *The Journal of Knee Surgery* 32 (05): 454–62.
83. Lundby, Carsten, Jose A. L. Calbet, i Paul Robach. 2009. „The Response of Human Skeletal Muscle Tissue to Hypoxia". *Cellular and Molecular Life Sciences* 66 (22): 3615–23.
84. Mackenzie, Richard W. A., Peter W. Watt, i Neil S. Maxwell. 2008. „Acute Normobaric Hypoxia Stimulates Erythropoietin Release". *High Altitude Medicine & Biology* 9 (1): 28–37.

85. Maniar, Nirav, Michael H. Cole, Adam L. Bryant, i David A. Opar. 2022. „Muscle Force Contributions to Anterior Cruciate Ligament Loading”. *Sports Medicine* 52 (8): 1737–50.
86. Markolf, Keith L., Geoffery O'Neill, Steven R. Jackson, i David R. McAllister. 2004. „Effects of Applied Quadriceps and Hamstrings Muscle Loads on Forces in the Anterior and Posterior Cruciate Ligaments”. *The American Journal of Sports Medicine* 32 (5): 1144–49.
87. Mayntz, R., Holm, K., & Hübner, P., 1985. Wprowadzenie do metod socjologii empirycznej (W. Lipnik, tłum.). Państwowe Wydawnictwo Naukowe.
88. Mayo, Brad, Cory Miles, Stacy Sims, i Matthew Driller. 2018. „The Effect of Resistance Training in a Hypoxic Chamber on Physical Performance in Elite Rugby Athletes”. *High Altitude Medicine & Biology* 19 (1): 28–34.
89. Mazza, Daniele, Edoardo Viglietta, Edoardo Monaco, Raffaele Iorio, Fabio Marzilli, Giorgio Princi, Carlo Massafra, i Andrea Ferretti. 2022. „Impact of Anterior Cruciate Ligament Injury on European Professional Soccer Players”. *Orthopaedic Journal of Sports Medicine* 10 (2): 23259671221076865.
90. McCarthy, Thomas L., i Michael Centrella. 2001. „Local IGF-I Expression and Bone Formation”. *Growth Hormone & IGF Research* 11 (4): 213–19.
91. McLean, Blake D., David Buttifant, Christopher J. Gore, Kevin White, Carsten Liess, i Justin Kemp. 2013. „Physiological and Performance Responses to a Preseason Altitude-Training Camp in Elite Team-Sport Athletes”. *International Journal of Sports Physiology and Performance* 8 (4): 391–99.
92. Mesfar, W., i A. Shirazi-Adl. 2005. „Biomechanics of the Knee Joint in Flexion under Various Quadriceps Forces”. *The Knee* 12 (6): 424–34.
93. Millet, Grégoire P, Raphaël Faiss, Franck Brocherie, i Olivier Girard. 2013. „Hypoxic training and team sports: a challenge to traditional methods?” *British Journal of Sports Medicine* 47 (Suppl 1): i6–7.
94. Mısıır, Abdülhamit, Kutalmış Albayrak, i Muhammed Bilal Kürk. 2022. „Epidemiologic Characteristics of Anterior Cruciate Ligament Injury in 10 Consecutive Seasons of Turkish Division-1 Professional Football League”. *Spor Hekimliği Dergisi* 57 (3): 155–60.
95. Montalvo, Alicia M., Daniel K. Schneider, Kate E. Webster, Laura Yut, Marc T. Galloway, Robert S. Heidt, Christopher C. Kaeding, i in. 2019. „Anterior Cruciate Ligament Injury Risk in Sport: A Systematic Review and Meta-Analysis of Injury Incidence by Sex and Sport Classification”. *Journal of Athletic Training* 54 (5): 472–82.
96. Motowidło, Joanna, Katarzyna Stronska-Garbien, Marta Bichowska-Pawęska, Maciej Kostrzewa, Adam Zając, Krzysztof Ficek, i Miłosz Drozd. 2024a. „Effect of Step Load Based on Time under Tension in Hypoxia on the ACL Pre-Operative Rehabilitation and Hormone Levels: A Case Study”. *Journal of Clinical Medicine* 13 (10): 2792.
97. Murphy, D. F., D. a. J. Connolly, i B. D. Beynnon. 2003. „Risk Factors for Lower Extremity Injury: A Review of the Literature”. *British Journal of Sports Medicine* 37 (1): 13–29.
98. Myer, Gregory D., Kevin R. Ford, Kim D. Barber Foss, Chunyan Liu, Todd G. Nick, i Timothy E. Hewett. 2009. „The Relationship of Hamstrings and Quadriceps Strength to Anterior Cruciate Ligament Injury in Female Athletes”. *Clinical Journal of Sport Medicine* 19 (1): 3.
99. Naclerio Ayllón, Fernando, Jeremy Moody, i Mark Chapman. 2013. „Applied Periodization: A Methodological Approach”. *Journal of Human Sport and Exercise* 8 (2): 350–66.

100. Nakamae, A., M. Ochi, M. Deie, i N. Adachi. 2012. „Unsuccessful regeneration of the semitendinosus tendon harvested for anterior cruciate ligament reconstruction: Report of two cases”. *Orthopaedics & Traumatology: Surgery & Research* 98 (8): 932–35.
101. Neeter, Camille, Alexander Gustavsson, Pia Thomeé, Jesper Augustsson, Roland Thomeé, i Jon Karlsson. 2006. „Development of a Strength Test Battery for Evaluating Leg Muscle Power after Anterior Cruciate Ligament Injury and Reconstruction”. *Knee Surgery, Sports Traumatology, Arthroscopy: Official Journal of the ESSKA* 14 (6): 571–80.
102. Nicholls, Adam R., i Richard I. G. Holt. 2016. „Growth Hormone and Insulin-Like Growth Factor-1”. *Frontiers of Hormone Research* 47:101–14.
103. Niedźwiedzka A., 2000. Insulinopodobny czynnik wzrostowy 1 (somatomedyna C) i jego białka wiążące 1 i 3 u dzieci, ze szczególnym uwzględnieniem cukrzycy. *Endokrynologia Diabetologia i Choroby Przemiany Materii Wieku Rozwojowego.*; 6: 51-58.
104. Nishimura, Akinobu, Masaaki Sugita, Ko Kato, Aki Fukuda, Akihiro Sudo, i Atsumasa Uchida. 2010. „Hypoxia Increases Muscle Hypertrophy Induced by Resistance Training”. *International Journal of Sports Physiology and Performance* 5 (4): 497–508.
105. O'Connor, J. J. 1993. „Can Muscle Co-Contraction Protect Knee Ligaments after Injury or Repair?” *The Journal of Bone and Joint Surgery. British Volume* 75 (1): 41–48.
106. O'Donnell, Shaner., Danan. Eitan, i Jenevieve L. Roper. 2020. „A Comparison of Quadriceps-to-Hamstrings Ratios During Isokinetic Testing, Cutting, and Drop Landings in Male Soccer Players”. *International Journal of Exercise Science* 13 (4): 157–66.
107. Ohno, Hideki, Ken Shirato, Takuya Sakurai, Junetsu Ogasawara, Yoshikazu Sumitani, Shogo Sato, Kazuhiko Imaizumi, Hitoshi Ishida, i Takako Kizaki. 2012. „Effect of exercise on HIF-1 and VEGF signaling”. *The Journal of Physical Fitness and Sports Medicine* 1 (1): 5–16.
108. Ong, Michael Tim-Yun, Jessica Sum-Yu Chan, Gene Chi-Wai Man, Jihong Qiu, Xin He, Qianwen Wang, i Patrick Shu-Hang Yung. 2024. „Effect of eccentric isokinetic exercise on muscle strength and functional recovery after anterior cruciate ligament reconstruction”. *Asia-Pacific Journal of Sports Medicine, Arthroscopy, Rehabilitation and Technology* 35 (styczeń):20–26.
109. Osternig, L. R., R. Ferber, J. Mercer, i H. Davis. 2000. „Human Hip and Knee Torque Accommodations to Anterior Cruciate Ligament Dysfunction”. *European Journal of Applied Physiology* 83 (1): 71–76.
110. Prajzner, A., 2022. Wybrane wskaźniki wielkości efektu w badaniach psychologicznych. *Annales Universitatis Mariae Curie-Skłodowska. Sectio J, Paedagogia- -Psychologia*, 35(4), s. 139–157
111. Pierce, Joseph R., Brian C. Clark, Lori L. Ploutz-Snyder, i Jill A. Kanaley. 2006. „Growth Hormone and Muscle Function Responses to Skeletal Muscle Ischemia”. *Journal of Applied Physiology (Bethesda, Md.: 1985)* 101 (6): 1588–95.
112. Plisk, Steven, i Michael Stone. 2003. „Periodization Strategies”. *Strength and Conditioning Journal - STRENGTH CONDITIONING J* 25 (grudzień).
113. Płoszczyca, Kamila, Józef Langfort, i Miłosz Czuba. 2018. „The Effects of Altitude Training on Erythropoietic Response and Hematological Variables in Adult Athletes: A Narrative Review”. *Frontiers in Physiology* 9:375.
114. „Premier League Braces for Record ACL Injuries with Ten Players Already out in 2024-25”. 2025. The Phoenix Newspaper. 22 luty 2025. <https://thephoenixnewspaper.com/premier-league-braces-for-record-acl-injuries-with-ten-players-already-out-in-2024-25>.

115. Reeves, Greg V., Robert R. Kraemer, Daniel B. Hollander, Jordan Clavier, Craig Thomas, Michelle Francois, i V. Daniel Castracane. 2006. „Comparison of Hormone Responses Following Light Resistance Exercise with Partial Vascular Occlusion and Moderately Difficult Resistance Exercise without Occlusion”. *Journal of Applied Physiology (Bethesda, Md.: 1985)* 101 (6): 1616–22.
116. Rekik, Raouf Nader, Roald Bahr, Flavio Cruz, Paul Read, Rod Whiteley, Pieter D’hooghe, Montassar Tabben, i Karim Chamari. 2023. „Mechanisms of ACL Injuries in Men’s Football: A Systematic Video Analysis over Six Seasons in the Qatari Professional League”. *Biology of Sport* 40 (2): 575–86.
117. Requejo-Herrero, Paula, Consolacion Pineda-Galan, i Ivan Medina-Porqueres. 2023. „Anterior cruciate ligament ruptures in Spanish soccer first division: An epidemiological retrospective study”. *The Knee* 41 (marzec):48–57.
118. Roth, Travis S., i Daryl C. Osbahr. 2018. „Knee Injuries in Elite Level Soccer Players”. *American Journal of Orthopedics* 47 (10).
119. Ruas, Cassio V., Felipe Minozzo, Matheus D. Pinto, Lee E. Brown, i Ronei S. Pinto. 2015. „Lower-Extremity Strength Ratios of Professional Soccer Players According to Field Position”. *The Journal of Strength & Conditioning Research* 29 (5): 1220.
120. Sands, William, Michael Stone, i Margaret Stone. 2007. *Principles and Practice of Resistance Training*. <https://doi.org/10.5040/9781492596875>.
121. Saunders, Philo U., Christoph Ahlgrim, Brent Vallance, Daniel J. Green, Eileen Y. Robertson, Sally A. Clark, Yorck O. Schumacher, i Christopher J. Gore. 2010. „An Attempt to Quantify the Placebo Effect from a Three-Week Simulated Altitude Training Camp in Elite Race Walkers”. *International Journal of Sports Physiology and Performance* 5 (4): 521–34.
122. Schiffner, Erik, David Latz, Jan P. Grassmann, Alberto Schek, Simon Thelen, Joachim Windolf, Johannes Schneppendahl, i Pascal Jungbluth. 2018. „Anterior cruciate ligament ruptures in German elite soccer players: Epidemiology, mechanisms, and return to play”. *The Knee* 25 (2): 219–25.
123. Schoenfeld, Brad J. 2010. „The Mechanisms of Muscle Hypertrophy and Their Application to Resistance Training”. *Journal of Strength and Conditioning Research* 24 (10): 2857–72.
124. Scott, Brendan R., Katie M. Slattey, Dean V. Sculley, i Ben J. Dascombe. 2014. „Hypoxia and Resistance Exercise: A Comparison of Localized and Systemic Methods”. *Sports Medicine (Auckland, N.Z.)* 44 (8): 1037–54.
125. Semenza, Gregg L. 2004. „O₂-Regulated Gene Expression: Transcriptional Control of Cardiorespiratory Physiology by HIF-1”. *Journal of Applied Physiology (Bethesda, Md.: 1985)* 96 (3): 1173–77; discussion 1170-1172.
126. Shelbourne, K. D., W. A. Facibene, i J. J. Hunt. 1997. „Radiographic and Intraoperative Intercondylar Notch Width Measurements in Men and Women with Unilateral and Bilateral Anterior Cruciate Ligament Tears”. *Knee Surgery, Sports Traumatology, Arthroscopy: Official Journal of the ESSKA* 5 (4): 229–33.
127. Shengnan, Qin, Samuel Bennett, Wang Wen, Li Aiguo, i Xu Jiake. 2021. „The Role of Tendon Derived Stem/Progenitor Cells and Extracellular Matrix Components in the Bone Tendon Junction Repair”. *Bone* 153 (grudzień):116172.
128. Sollanek, Kurt J, Scott W Talpey, i Bülent Sökmen. 2017. „The Effects of Acute Bilateral and Unilateral Set Protocols on Muscle Power and Rate of Force Development” 2 (1).
129. Speirs, Derrick E., Mark A. Bennett, Charlotte V. Finn, i Anthony P. Turner. 2016. „Unilateral vs. Bilateral Squat Training for Strength, Sprints, and Agility in Academy Rugby Players”. *Journal of Strength and Conditioning Research* 30 (2): 386–92.

130. Suydam, Stephen M., Daniel H. Cortes, Michael J. Axe, Lynn Snyder-Mackler, i Thomas S. Buchanan. 2017. „Semitendinosus Tendon for ACL Reconstruction: Regrowth and Mechanical Property Recovery”. *Orthopaedic Journal of Sports Medicine* 5 (6): 2325967117712944.
131. Szymiski, Dominik, Leonard Achenbach, Johannes Zellner, Johannes Weber, Matthias Koch, Florian Zeman, Gunnar Huppertz, Christian Pfeifer, Volker Alt, i Werner Krutsch. 2022. „Higher Risk of ACL Rupture in Amateur Football Compared to Professional Football: 5-Year Results of the «Anterior Cruciate Ligament-Registry in German Football»”. *Knee Surgery, Sports Traumatology, Arthroscopy: Official Journal of the ESSKA* 30 (5): 1776–85.
132. Takarada, Y., Y. Nakamura, S. Aruga, T. Onda, S. Miyazaki, i N. Ishii. 2000. „Rapid Increase in Plasma Growth Hormone after Low-Intensity Resistance Exercise with Vascular Occlusion”. *Journal of Applied Physiology (Bethesda, Md.: 1985)* 88 (1): 61–65.
133. Tian, Bin, Ming Zhang, i Xin Kang. 2023. „Strategies to Promote Tendon-Bone Healing after Anterior Cruciate Ligament Reconstruction: Present and Future”. *Frontiers in Bioengineering and Biotechnology* 11 (marzec).
134. Timon, Rafael, Guillermo Olcina, Paulino Padial, Juan Bonitch-Góngora, Ismael Martínez-Guardado, Cristina Benavente, Blanca de la Fuente, i Belen Feriche. 2022. „Effects of Resistance Training in Hypobaric vs. Normobaric Hypoxia on Circulating Ions and Hormones”. *International Journal of Environmental Research and Public Health* 19 (6): 3436.
135. Törpel, Alexander, Beate Peter, i Lutz Schega. 2020. „Effect of Resistance Training Under Normobaric Hypoxia on Physical Performance, Hematological Parameters, and Body Composition in Young and Older People”. *Frontiers in Physiology* 11:335.
136. Trinh, Kien Vinh, Dion Diep, Kevin Jia Qi Chen, Le Huang, i Oleksiy Gulenko. 2020. „Effect of Erythropoietin on Athletic Performance: A Systematic Review and Meta-Analysis”. *BMJ Open Sport & Exercise Medicine* 6 (1): e000716.
137. Victor, Jan, Luc Labey, Pius Wong, Bernardo Innocenti, i Johan Bellemans. 2010. „The Influence of Muscle Load on Tibiofemoral Knee Kinematics”. *Journal of Orthopaedic Research: Official Publication of the Orthopaedic Research Society* 28 (4): 419–28.
138. Volga Fernandes, Rodrigo, Valmor Tricoli, Antonio Garcia Soares, Elen Haruka Miyabara, Marcelo Saldanha Aoki, i Gilberto Laurentino. 2022. „Low-Load Resistance Exercise with Blood Flow Restriction Increases Hypoxia-Induced Angiogenic Genes Expression”. *Journal of Human Kinetics* 84 (październik):82–91.
139. Wang, Li-Juan, Ni Zeng, Zhi-Peng Yan, Jie-Ting Li, i Guo-Xin Ni. 2020. „Post-Traumatic Osteoarthritis Following ACL Injury”. *Arthritis Research & Therapy* 22 (1): 57.
140. Wenning, Markus, Marlene Mauch, Albrecht H. Heitner, Gerrit Bode, Ghislain Sofack, i Ramona Ritzmann. 2023. „Early ACL Reconstruction Shows an Improved Recovery of Isokinetic Thigh Muscle Strength Compared to Delayed or Chronic Cases”. *Archives of Orthopaedic and Trauma Surgery* 143 (9): 5741–50.
141. Wilber, Randall L. 2007. „Application of Altitude/Hypoxic Training by Elite Athletes”. *Medicine and Science in Sports and Exercise* 39 (9): 1610–24.
142. Wilk, Michal, Artur Golas, Petr Stastny, Monika Nawrocka, Michal Krzysztófik, i Adam Zajac. 2018. „Does Tempo of Resistance Exercise Impact Training Volume?” *Journal of Human Kinetics* 62 (czerwiec):241–50.

143. Wojan, Frank, Sten Stray-Gundersen, Mercedes J. Nagel, i Sophie Lalande. 2021. „Short exposure to intermittent hypoxia increases erythropoietin levels in healthy individuals”. *Journal of Applied Physiology* 130 (6): 1955–60.
144. Xu, Yue, Wan-Xia Zhang, Li-Na Wang, Yue-Qing Ming, Yu-Lin Li, i Guo-Xin Ni. 2021. „Stem cell therapies in tendon-bone healing”. *World Journal of Stem Cells* 13 (7): 753–75.
145. Yan, Bing, Xiangxun Lai, Longyan Yi, Yang Wang, i Yang Hu. 2016. „Effects of Five-Week Resistance Training in Hypoxia on Hormones and Muscle Strength”. *Journal of Strength and Conditioning Research* 30 (1): 184–93.
146. Yu, Jian, Junliang Li, Shanyi Zhang, Xinke Xu, Meiguang Zheng, Guangyi Jiang, i Fangcheng Li. 2012. „IGF-1 Induces Hypoxia-Inducible Factor 1 α -Mediated GLUT3 Expression through PI3K/Akt/mTOR Dependent Pathways in PC12 Cells”. *Brain Research* 1430 (styczeń):18–24.
147. Zazulak, Bohdanna T., Timothy E. Hewett, N. Peter Reeves, Barry Goldberg, i Jacek Cholewicki. 2007. „Deficits in Neuromuscular Control of the Trunk Predict Knee Injury Risk: A Prospective Biomechanical-Epidemiologic Study”. *The American Journal of Sports Medicine* 35 (7): 1123–30.
148. Zhao, Xibang, Yuanyuan Zhou, Jianting Li, Chao Zhang, i Jiali Wang. 2022. „Opportunities and Challenges of Hydrogel Microspheres for Tendon-Bone Healing after Anterior Cruciate Ligament Reconstruction”. *Journal of Biomedical Materials Research. Part B, Applied Biomaterials* 110 (2): 289–301.
149. Zou, Jiaxuan, Weinan Yang, Wushi Cui, Congsun Li, Chiyuan Ma, Xiaoxiao Ji, Jianqiao Hong, i in. 2023. „Therapeutic Potential and Mechanisms of Mesenchymal Stem Cell-Derived Exosomes as Bioactive Materials in Tendon-Bone Healing”. *Journal of Nanobiotechnology* 21 (1): 14.

STRESZCZENIE

WPLYW TRENINGU OPOROWEGO ORAZ ZMIENNYCH WARUNKÓW ŚRODOWISKOWYCH NA WYBRANE STEŻENIA HORMONÓW ORAZ SIŁĘ MIĘŚNIOWĄ U PIŁKARZY NOŻNYCH PO REKONSTRUKCJI WIĘZADŁA KRZYŻOWEGO PRZEDNIEGO

Obserwuje się wzrastającą liczbę zawodników ponownie doznających urazu WKP szczególnie wśród piłkarzy nożnych. Długi okres rekonwalescencji pozabiegowej skłania badaczy do ciągłego poszerzania wiedzy na temat epidemiologii oraz w przypadku stanu pozabiegowego do poszukiwania środków, które mogłyby wspomagać procesy gojenia oraz regeneracji tkanek po rekonstrukcji WKP. Trening w warunkach hipoksji normobarycznej jest coraz częściej stosowaną metodą wśród zawodników, brakuje jednak doniesień odnoszących się do wykorzystania jej po zabiegach operacyjnych. Poziom mistrzowski zawodników skłania do udoskonalania procesu przywracania sprawności do stanu sprzed zabiegu, bądź wyższego, co jest głównym celem rehabilitacyjnym.

Celem pracy było określenie wpływu środowiska hipoksji normobarycznej oraz normoksji, jak również treningu siłowego na redukcję różnicy w wartości szczytowego momentu siły prostowników (APTP) i zginaczy (APTZ) stawu kolanowego kończyny dolnej operowanej w odniesieniu do kończyny nieoperowanej, a także na stosunek momentu siły prostowników do zginaczy (RTPZ). Dodatkowo oceniano zmiany stężeń wybranych markerów biologicznych: insulinopodobnego czynnika wzrostu-1 (IGF-1), hormonu wzrostu (GH) oraz erytropoetyny (EPO), pełniących istotną rolę w procesach regeneracyjnych.

Badania przeprowadzono w grupie 25 piłkarzy nożnych, u których wykonano artroskopowi rekonstrukcję WKP z wykorzystaniem przeszczepu z grupy kulszowo-goleniowej. W związku z uzyskanymi wynikami można stwierdzić, iż największe istotne zmiany stężenia GH podczas interwencji wystąpiły pomiędzy wartościami przed eksperymentem względem wartości 30 min po treningu kolejno w grupach GHS ($p=0,00014$), GNS ($p=0,0001$) i GK ($p=0,0001$). Aczkolwiek największy wzrost stężenia GH odnotowano w grupie GHS.

W badaniu istotnie statystycznie zmiany stężenia IGF-1 zaobserwowano tylko w fazie przed i 30 min po ukończonej sesji w grupie GHS ($p=0,00014$).

Analiza wyników dotyczących stężenia EPO pozwoliła na stwierdzenie istotnych różnic tylko w przypadku grupy GHS pomiędzy wynikami stężenia EPO przed, a 30 min po treningu ($p=0,00014$).

Na podstawie uzyskanych wyników, stwierdzono, że bez względu na grupę były istotne statystycznie różnice pomiędzy wynikami przed i po eksperymencie wartości APTP 60°/s, APTP 120°/s, APTP 180°/s oraz APTZ 60°/s.

Stwierdzono, że po eksperymencie istotnie statystycznie obniżyły się wyniki RT 60°/s dla kończyny operowanej $p=0,002$. W przypadku wyników przed i po dla kończyny zdrowej nie stwierdzono istotnych statystycznie różnic $p=1$.

Słowa kluczowe: rekonstrukcja, więzadło krzyżowe przednie, rehabilitacja, trening siłowy, hipoksja, GH, IGF-1, EPO, PT.

SUMMARY

EFFECT OF RESISTANCE TRAINING AND VARIABLE ENVIRONMENTAL CONDITIONS ON SELECTED HORMONAL CONCENTRATIONS AND MUSCLE STRENGTH IN FOOTBALL PLAYERS AFTER ANTERIOR CRUCIATE LIGAMENT RECONSTRUCTION

An increasing number of players are observed to re-injure the ACL, especially among football players. The long post-operative convalescence period encourages researchers to continuously expand their knowledge of epidemiology and, in the case of the post-operative state, to search for agents that could support the healing and regeneration processes of tissues after ACL reconstruction. Training in normobaric hypoxia conditions is an increasingly popular method among players, but there are no reports regarding its use after surgical procedures. The mastery level of players encourages the improvement of the process of restoring fitness to the pre-operative state or higher, which is the main rehabilitation goal.

The aim of the study was to determine the effect of normobaric hypoxia and normoxia, as well as strength training on the reduction of the difference in the peak torque of extensors (AFTP) and flexors (APTZ) of the knee joint of the operated lower limb in relation to the unoperated limb, as well as on the ratio of extensors to flexors (RTPZ). Additionally, changes in the concentrations of selected biological markers were assessed: insulin-like growth factor-1 (IGF-1), growth hormone (GH) and erythropoietin (EPO), which play an important role in regenerative processes.

The study was conducted in a group of 25 football players who underwent arthroscopic reconstruction of the ACL using a graft from the ischial-tibial group. In connection with the obtained results, it can be stated that the greatest significant changes in GH concentration during the intervention occurred between the values before the experiment and the value 30 min after training, respectively in the GHS groups ($p=0.00014$), GNS ($p=0.0001$) and GK ($p=0.0001$). However, the greatest increase in GH concentration was noted in the GHS group.

In the study, statistically significant changes in IGF-1 concentration were observed only in the phase before and 30 min after the completed session in the GHS group ($p=0.00014$).

Analysis of the results regarding EPO concentration allowed for the finding of significant differences only in the GHS group between the results of EPO concentration before and 30 min after training ($p=0.00014$).

Based on the obtained results, it was found that regardless of the group, there were statistically significant differences between the results before and after the experiment for the values of APTP 60°/s, APTP 120°/s, APTP 180°/s and APTZ 60°/s.

It was found that after the experiment, the results of RT 60°/s for the operated limb decreased statistically significantly $p=0.002$. In the case of the results before and after for the healthy limb, no statistically significant differences were found $p=1$.

Keywords: reconstruction, anterior cruciate ligament, rehabilitation, strength training, hypoxia, GH, IGF-1, EPO, PT.

SPIS TABEL

Tab. 1 Opis poszczególnych grup badanych.....	36
Tab. 2 Skala RPE wraz z odpowiednim RIR oraz opisem intensywności wysiłku.....	41
Tab. 3 Całkowita objętość treningu oporowego zastosowana w protokole.....	41
Tab. 4 Program ćwiczeń wykonywany przez zawodników w trakcie badań w grupach GHS oraz GNS.....	42
Tab. 5 Podstawowe statystyki opisowe dla stężenia insulinopodobnego czynnika wzrostu-1 (IGF-1), hormonu wzrostu (GH) oraz erytropoetyny (EPO).....	44
Tab. 6 Analiza wariancji z powtarzanymi pomiarami dla stężenia insulinopodobnego czynnika wzrostu-1 (IGF-1).....	45
Tab. 7 Analiza wariancji z powtarzanymi pomiarami dla stężenia hormonu wzrostu (GH)....	46
Tab. 8 Analiza wariancji z powtarzanymi pomiarami dla stężenia erytropoetyny (EPO).....	47
Tab. 9 Podstawowe statystyki opisowe dla oceny szczytowego momentu obrotowego (PT) z wykorzystaniem dynamometru izokinetycznego.....	49
Tab. 10 Nieparametryczna analiza wariancji z powtarzanymi pomiarami dla różnicy w wartości szczytowego momentu obrotowego prostowników stawu kolanowego kończyny dolnej operowanej względem kończyny nieoperowanej oceniana przy prędkości kątowej 60°/s (AFTP 60°/s).....	50
Tab. 11 Analiza wariancji z powtarzanymi pomiarami dla różnicy w wartości szczytowego momentu obrotowego zginaczy stawu kolanowego kończyny dolnej operowanej względem kończyny nieoperowanej oceniana przy prędkości kątowej 60°/s (APTZ 60°/s).....	51
Tab. 12 Analiza wariancji z powtarzanymi pomiarami dla różnicy w wartości szczytowego momentu obrotowego prostowników stawu kolanowego kończyny dolnej operowanej względem kończyny nieoperowanej oceniana przy prędkości kątowej 120°/s (AFTP 120°/s).	53
Tab. 13 Analiza wariancji z powtarzanymi pomiarami dla różnicy w wartości szczytowego momentu obrotowego zginaczy stawu kolanowego kończyny dolnej operowanej względem kończyny nieoperowanej oceniane przy prędkości kątowej 120°/s (APTZ 120°/s).....	54
Tab. 14 Analiza wariancji z powtarzanymi pomiarami dla różnicy w wartości szczytowego momentu obrotowego prostowników stawu kolanowego kończyny dolnej operowanej w stosunku do kończyny nieoperowanej oceniana przy prędkości kątowej 180°/s (AFTP 180°/s).	56

Tab. 15 Analiza wariancji z powtarzanymi pomiarami dla różnicy w wartości szczytowego momentu obrotowego zginaczy stawu kolanowego kończyny dolnej operowanej względem kończyny nieoperowanej oceniana przy prędkości kątowej 180°/s (APTZ 180°/s).....	57
Tab. 16 Podstawowe statystyki opisowe dla zmiennych oceny stosunku szczytowego momentu obrotowego mięśni prostowników stawu kolanowego względem zginaczy (RTPZ) z wykorzystaniem dynamometru izokinetycznego.....	59
Tab. 17 Nieparametryczna analiza wariancji z powtarzanymi pomiarami stosunku szczytowego momentu obrotowego mięśni prostowników stawu kolanowego względem zginaczy oceniana przy prędkości kątowej 60°/s (RTPZ 60°/s).....	60
Tab. 18 Nieparametryczna analiza wariancji z powtarzanymi pomiarami stosunku szczytowego momentu obrotowego mięśni prostowników stawu kolanowego względem zginaczy oceniana przy prędkości kątowej 120°/s (RTPZ 120°/s).....	62
Tab. 19 Nieparametryczna analiza wariancji z powtarzanymi pomiarami stosunku szczytowego momentu obrotowego mięśni prostowników stawu kolanowego względem zginaczy oceniana przy prędkości kątowej 180°/s (RTPZ 180°/s).....	64

SPIS RYCIN

Ryc. 1 Cykl odpowiedzi superkompensacyjnej na bodziec treningowy.....	18
Ryc. 2 Rozkład obciążenia 3:1 (Sands, Stone, i Stone 2007).....	19
Ryc. 3 Przebieg badania.....	35
Ryc. 4 Tempo ruchu (3:0:2:0) faza ekscentryczna: faza izometryczna: faza koncentryczna: faza izometryczna.....	40
Ryc. 5 Porównanie wartości średnich stężenia insulinopodobnego czynnika wzrostu-1 (IGF-1) w poszczególnych grupach badanych w kolejnych pomiarach.....	46
Ryc. 6 Porównanie wartości średnich stężenia hormonu wzrostu (GH) w poszczególnych grupach badanych w kolejnych pomiarach.....	47
Ryc. 7 Porównanie wartości średnich stężenia erytropoetyny (EPO) w poszczególnych grupach badanych w kolejnych pomiarach.....	48
Ryc. 8 Porównanie średnich wartości różnicy szczytowego momentu obrotowego prostowników stawu kolanowego kończyny dolnej operowanej względem kończyny nieoperowanej oceniane przy prędkości kątowej 60°/s (APTP 60°/s).....	51
Ryc. 9 Porównanie średnich wartości różnicy szczytowego momentu obrotowego zginaczy stawu kolanowego kończyny dolnej operowanej względem kończyny nieoperowanej przy prędkości kątowej 60°/s (APTZ 60°/s).....	52
Ryc. 10 Porównanie średnich wartości różnicy szczytowego momentu obrotowego prostowników stawu kolanowego kończyny dolnej operowanej względem kończyny nieoperowanej oceniane przy prędkości kątowej 120°/s (APTP 120°/s).....	54
Ryc. 11 Porównanie średnich wartości różnicy szczytowego momentu obrotowego zginaczy stawu kolanowego kończyny dolnej operowanej względem kończyny nieoperowanej oceniane przy prędkości kątowej 120°/s (APTZ 120°/s).....	55
Ryc. 12 Porównanie średnich wartości różnicy szczytowego momentu obrotowego prostowników stawu kolanowego kończyny dolnej operowanej względem kończyny nieoperowanej oceniane na przy prędkości kątowej 180°/s (APTP 180°/s).....	57
Ryc. 13 Porównanie średnich wartości różnicy szczytowego momentu obrotowego zginaczy stawu kolanowego kończyny dolnej operowanej względem kończyny nieoperowanej oceniane przy prędkości kątowej 180°/s (APTZ 180°/s).....	58
Ryc. 14 Porównanie wartości średnich i przedziałów ufności dla stosunku szczytowego momentu obrotowego mięśni prostowników stawu kolanowego względem zginaczy ocenianych przy prędkości kątowej 60°/s (RTPZ 60°/s).....	61

Ryc. 15 Porównanie wartości średnich i przedziałów ufności stosunku szczytowego momentu obrotowego mięśni prostowników stawu kolanowego względem zginaczy ocenianych przy prędkości kątowej 120°/s (RTPZ 120°/s).....	63
Ryc. 16 Porównanie wartości średnich i przedziałów ufności stosunku szczytowego momentu obrotowego mięśni prostowników stawu kolanowego względem zginaczy ocenianych przy prędkości kątowej 180°/s (RTPZ 180°/s).....	65
Ryc. 17 Przysiad wykroczny z hantlami (ruch inicjowany z kończyny zakrocznej) – DSS (z ang. Dumbbell split squat) (materiał własny).....	101
Ryc. 18 Uginanie kończyny dolnej w pozycji siedzącej z taśmą oporową – SBLC (z ang. Seated band leg curl) (materiał własny).....	101
Ryc. 19 Wyciskanie hantla jednorącz sprzed klatki piersiowej w pozycji leżącej – SADFP (z ang. Single arm dumbbell floor press) (materiał własny).....	101
Ryc. 20 Wznos bioder jednonóż ze sztangą - SLGB (z ang. Single leg glute bridge) (materiał własny).....	101
Ryc. 21 Wiosłowanie półsztangą jednorącz w opadzie tułowia – SATGLR (z ang. Single arm towel grip landmine row) (materiał własny).....	102
Ryc. 22 Wypychanie jednonóż na suwnicy – SLP (z ang. Single leg press) (materiał własny).	102
Ryc. 23 Przysiad z hantlami – DS (z ang. Dumbbell squat) (materiał własny).....	102
Ryc. 24 Martwy ciąg ze sztangą o prostych nogach – BSLD (z ang. Barbell stiff leg deadlift) (materiał własny).....	102
Ryc. 25 Wyciskanie sztangi leżąc – FP (z ang. Floor press) (materiał własny).....	103
Ryc. 26 Wznos bioder ze sztangą – GB (z ang. Glute bridge) (materiał własny).....	103
Ryc. 27 Wiosłowanie półsztangą w opadzie tułowia – TGLR (z ang. Towel grip landmine row) (materiał własny).....	103
Ryc. 28 Wypychanie kończyn dolnych na suwnicy obunóż – LP (z ang. Leg press) (materiał własny).....	103
Ryc. 29 Przysiad wykroczno-zakroczny z hantlem (chwyt kielichowy) – GSSD (z ang. Goblet split squat dumbbell) (materiał własny).....	104
Ryc. 30 Rumuński martwy ciąg z wykorzystaniem sztangi haksagonalnej z pozycji wykroczno-zakrocznej – SSTB RDL (z ang. Split-stance trap bar RDL (Romanian Deadlift)) (materiał własny).....	104

Ryc. 31 Wyciskanie hantla jednorącz nad głowę w pozycji siedzącej z napięciem izometrycznym (przeciwny hantel) – SSDMP (z ang. Seated single dumbbell military press with isometric hold) (materiał własny).....	104
Ryc. 32 Unoszenie bioder jednonóż w oparciu o skrzynię – SLHT (z ang. Single leg hip thrust) (materiał własny).....	104
Ryc. 33 Przyciąganie jednorącz gumy oporowej – SAFP (z ang. Single arm face pull) (materiał własny).....	105
Ryc. 34 Przysiad z jednoczesnym wyciskaniem półsztangi sprzed klatki piersiowej jednorącz – LSAT (z ang. Landmine single arm thruster) (materiał własny).....	105
Ryc. 35 Przysiad z hantlem (chwyt kielichowy) – DGS (z ang. Dumbbell goblet squat) (materiał własny).....	105
Ryc. 36 Martwy ciąg obunóż z wykorzystaniem sztangi haksagonalnej – TBD (z ang. Trap bar deadlift) (materiał własny).....	105
Ryc. 37 Wyciskanie hantli nad głowę w pozycji siedzącej – SOHDP (z ang. Seated over head dumbbell press) (materiał własny).....	106
Ryc. 38 Unoszenie bioder w oparciu o skrzynię – HT (z ang. Hip thrust) (materiał własny).....	106
Ryc. 39 Przyciąganie hantli do twarzy w opadzie tułowia – DFP (z ang. Dumbbell face pull) (materiał własny).....	106
Ryc. 40 Przysiad z jednoczesnym wyciskaniem półsztangi sprzed klatki piersiowej oburącz – LT (z ang. Landmine thruster) (materiał własny).....	106
Ryc. 41 Przysiad wykroczny z hantlami – DL (z ang. Dumbbell lunges) (materiał własny).....	107
Ryc. 42 Unoszenie bioder jednonóż ze sztangą w oparciu o skrzynię, stopa oparta na podwyższeniu – SLEHT (z ang. Single leg elevated hip thrust) (materiał własny).....	107
Ryc. 43 Wiosłowanie jednorącz hantlem w oparciu o skrzynię – BSADR (z ang. Box single arm dumbbell row) (materiał własny).....	107
Ryc. 44 Wspięcie na palce jednonóż z hantlami – SLCR (z ang. Single leg calf raise) (materiał własny).....	107
Ryc. 45 Unoszenie bioder jednonóż ze stopą opartą o piłkę szwedzką – SBSLGB (z ang. Swiss ball single leg glute bridge) (materiał własny).....	108
Ryc. 46 Rozpiętki jednorącz z hantlem na piłce szwedzkiej, druga kończyna górna napięcie izometryczne – SBSACF (z ang. Swiss ball single arm chest fly with isometric hold) (materiał własny).....	108

Ryc. 47 Przysiad ze sztangą z tyłu – BSHB (z ang. Back squat high bar) (materiał własny).	108
Ryc. 48 Unoszenie bioder ze sztangą w oparciu o skrzynię, stopa oparta na podwyższeniu – EHT (z ang. Elevated hip thrust) (materiał własny).	108
Ryc. 49 Uginanie oburącz hantli z leżenia na piłce szwedzkiej – SBDR (z ang. Swiss ball dumbbell row) (materiał własny).	109
Ryc. 50 Wspięcie na palce obunóż z hantlami – CR (z ang. Calf raise) (materiał własny).	109
Ryc. 51 Wznos bioder z jednoczesnym ugięciem kończyn dolnych w stawie kolanowym na piłce szwedzkiej – SBLCU (z ang. Swiss ball leg curl) (materiał własny).	109
Ryc. 52 Rozpiętki z hantlami na piłce szwedzkiej – SBDCF (z ang. Swiss ball dumbbell chest fly) (materiał własny).	109
Ryc. 53 Przysiad bułgarski – BSS (z ang. Bulgarian split squat) (materiał własny).	110
Ryc. 54 Martwy ciąg z pozycji wykroczo-zakroczej – SSD (z ang. Split-stance deadlift) (materiał własny).	110
Ryc. 55 Wyciskanie hantla jednorącz na piłce szwedzkiej z izometrycznym utrzymaniem hantla w przeciwstawnej kończynie górnej – SBSACP (z ang. Swiss ball single arm chest press (dumbbell) with isometric hold) (materiał własny).	110
Ryc. 56 Wejście na skrzynię z hantlami – DSU (z ang. Dumbbell step up) (materiał własny).	110
Ryc. 57 Przysiad tylny ze sztangą ustawioną nisko – BLSB (z ang. Back squat low bar) (materiał własny).	111
Ryc. 58 Martwy ciąg – DEL (z ang. Deadlift) (materiał własny).	111
Ryc. 59 Wyciskanie hantli leżąc na piłce szwedzkiej – SBDCP (z ang. Swiss ball dumbbell chest press) (materiał własny).	111
Ryc. 60 Przysiad jednoonóż z kettle (chwyt kielichowy) – WPS (z ang. Weighted pistol squat with goblet grip) (materiał własny).	111
Ryc. 61 Unilateralny przysiad z jednoczesnym wyskokiem jednoonóż z hantlami – DSLJS (z ang. Dumbbell single leg jump squat) (materiał własny).	112
Ryc. 62 Wyciskanie hantla jednorącz z pozycji leżącej (z uniesionym tułowiem i kończynami dolnymi) – HHSAFP (z ang. Hollow hold single arm floor press with isohold) (materiał własny).	112
Ryc. 63 Unilateralny wznos bioder (sztanga na biodrach) na podwyższeniu z jednoczesnym wybiciem w końcowej fazie ruchu koncentrycznego – SLEHTJ (z ang. Single leg elevated hip thrust jump) (materiał własny).	112

Ryc. 64 Wznos bioder z jednoczesnym ugięciem kończy dolnej w stawie kolanowym na piłce szwedzkiej – SBLSC (z ang. Swiss ball single leg curl) (materiał własny).....	112
Ryc. 65 Przysiad ze sztangą z przodu – FS (z ang. Front squat) (materiał własny).....	113
Ryc. 66 Przysiad z jednoczesnym wyskokiem obunóż z hantlami – DJS (z ang. Dumbbell jump squat) (materiał własny).....	113
Ryc. 67 Wyciskanie hantli oburącz w pozycji leżącej (z uniesieniem tułowiem i kończyn dolnych) – HHFP (z ang. Hollow hold floor press) (materiał własny).....	113
Ryc. 68 Unoszenie bioder ze sztangą w oparciu o skrzynię na podwyższeniu – EHTJ (z ang. Elevated hip thrust jump) (materiał własny).....	113
Ryc. 69 Zginanie kończyn dolnych na piłce szwedzkiej leżąc – SWBLC.....	114

Uchwała Nr 3/2021
Uczelnianej Komisji Bioetycznej ds. Badań Naukowych przy Akademii Wychowania
Fizycznego im. Jerzego Kukuczki w Katowicach
z dnia 21 stycznia 2021 roku
ws. opinii o projekcie eksperymentu medycznego.

Działając na podstawie §6 ust. 5 Rozporządzenia Ministra Zdrowia i Opieki Społecznej w sprawie szczegółowych zasad powoływania i finansowania oraz trybu działania komisji bioetycznych z dnia 11.05.1999r. (Dz. U. 1999 Nr 47, poz. 480) ustala się, co następuje:

§ 1.

Uczelniana Komisja Bioetyczna ds. Badań Naukowych przy Akademii Wychowania Fizycznego im. Jerzego Kukuczki w Katowicach po przeanalizowaniu wniosku zgłoszonego przez dr hab. Krzysztofa Ficka, prof. AWF Katowice „Protokół Rehabilitacyjny po zabiegu artroskopowej rekonstrukcji więzadła krzyżowego przedniego w warunkach hipoksji normobarycznej” oraz wysłuchaniu dodatkowych informacji i w wyniku przeprowadzonej dyskusji oraz głosowania

podjęła uchwałę o pozytywnym zaopiniowaniu wniosku

§ 2.

Wydana opinia dotyczy tylko rozpatrywanego wniosku z uwzględnieniem przedstawionego projektu; każda zmiana i modyfikacja wymaga uzyskania odrębnej opinii. Wnioskodawca zobowiązany jest do informowania o wszelkich poprawkach, które mogłyby mieć wpływ na opinie Komisji, o ciężkich lub niespodziewanych zdarzeniach niepożądanych i nieprzewidzianych okolicznościach i decyzjach innych komisji bioetycznych.

§ 3.

Komisja oczekuje raportu z badania po jego zakończeniu

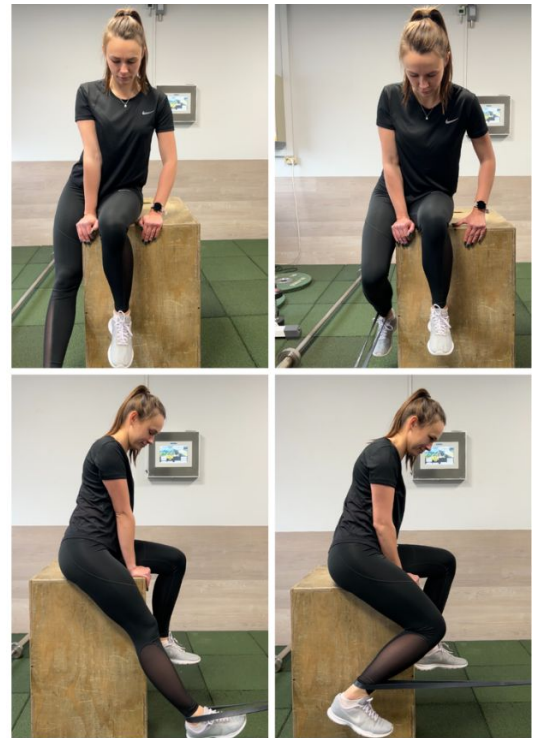
Do wiadomości:

1. dr hab. Krzysztof Fick, prof. AWF Katowice
2. a/a

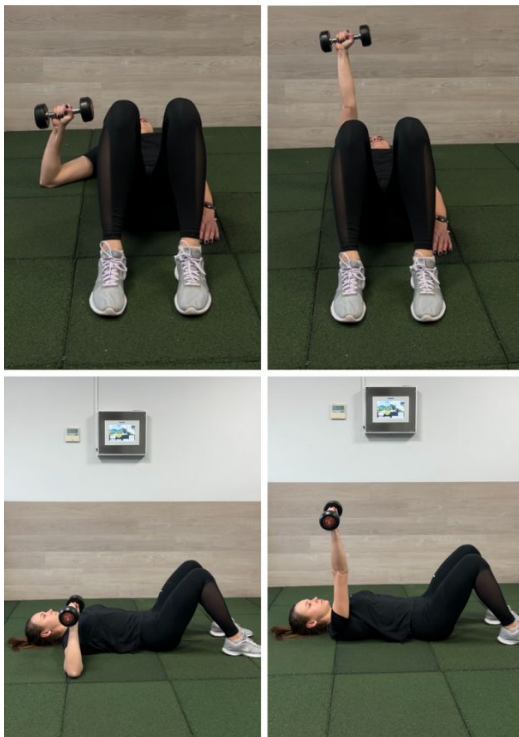
Zgodnie z § 8 Rozporządzenia Ministra Zdrowia i Opieki Społecznej w sprawie szczegółowych zasad powoływania i finansowania oraz trybu działania komisji bioetycznych z dnia 11.05.1999r. (Dz. U. 1999 Nr 47, poz. 480) od uchwały komisji bioetycznej służy odwołanie do Odwoławczej Komisji Bioetycznej przy Ministrze Zdrowia, za pośrednictwem Uczelnianej Komisji Bioetycznej ds. Badań Naukowych przy Akademii Wychowania Fizycznego im. Jerzego Kukuczki w Katowicach, w terminie 14 dni od daty otrzymania niniejszego pisma.



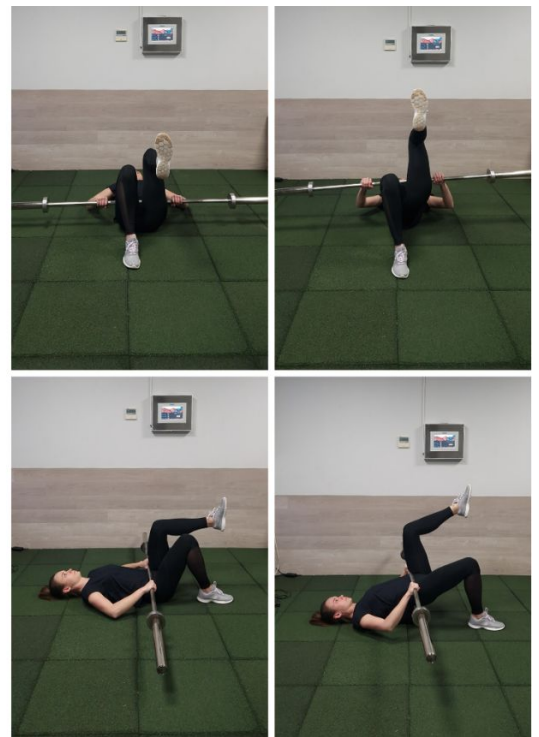
Ryc. 17 Przysiad wykroczny z hantlami (ruch inicjowany z kończyny zakrocznej) – DSS (z ang. Dumbbell split squat) (materiał własny).



Ryc. 18 Uginanie kończyny dolnej w pozycji siedzącej z taśmą oporową – SBLC (z ang. Seated band leg curl) (materiał własny).



Ryc. 19 Wyciskanie hantla jednorącz sprzed klatki piersiowej w pozycji leżącej – SADFP (z ang. Single arm dumbbell floor press) (materiał własny).



Ryc. 20 Wznos bioder jednonóż ze sztangą - SLGB (z ang. Single leg glute bridge) (materiał własny).



Ryc. 21 Wiosłowanie półsztangą jednorącz w opadzie tułowia – SATGLR (z ang. Single arm towel grip landmine row) (materiał własny).



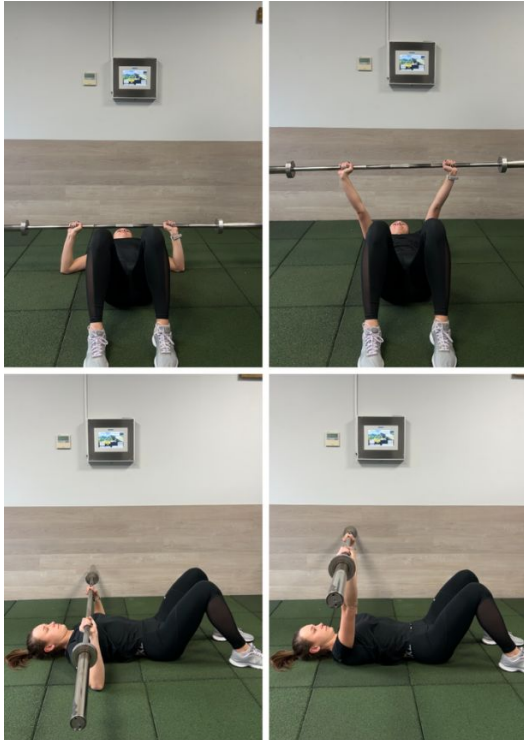
Ryc. 22 Wypychanie jednonóż na suwnicy – SLP (z ang. Single leg press) (materiał własny).



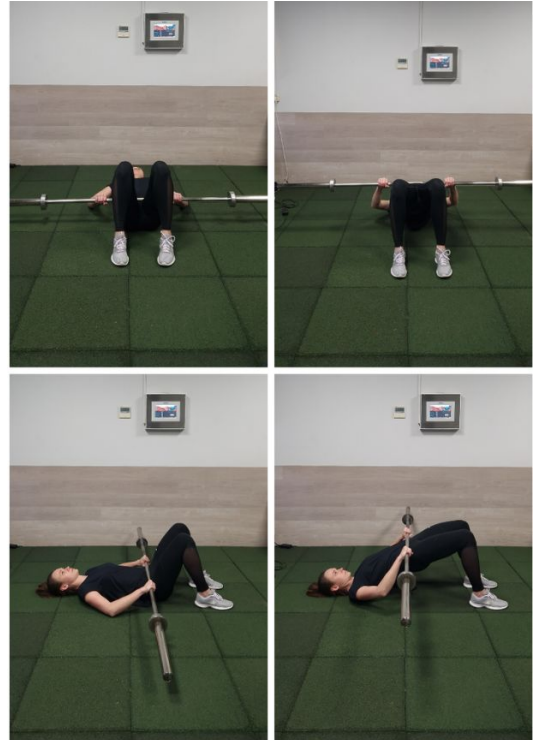
Ryc. 23 Przysiad z hantami – DS (z ang. Dumbbell squat) (materiał własny).



Ryc. 24 Martwy ciąg ze sztangą o prostych nogach – BSLD (z ang. Barbell stiff leg deadlift) (materiał własny).



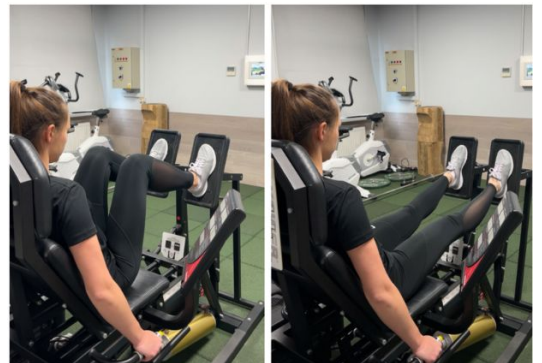
Ryc. 25 Wyciskanie sztangi leżąc – FP (z ang. Floor press) (materiał własny).



Ryc. 26 Wznos bioder ze sztangą – GB (z ang. Glute bridge) (materiał własny).



Ryc. 27 Wiosłowanie półsztangą w opadzie tułowia – TGLR (z ang. Towel grip landmine row) (materiał własny).



Ryc. 28 ppychanie kończyn dolnych na suwnicy obunóż – LP (z ang. Leg press) (materiał własny).



Ryc. 29 Przysiad wykroczo-zakroczny z hantlem (chwyt kielichowy) – GSSD (z ang. Goblet split squat dumbbell) (materiał własny).



Ryc. 30 Rumuński martwy ciąg z wykorzystaniem sztangi haksagonalnej z pozycji wykroczo-zakrocznej – SSTB RDL (z ang. Split-stance trap bar RDL (Romanian Deadlift)) (materiał własny).



Ryc. 31 Wyciskanie hantla jednorącz nad głowę w pozycji siedzącej z napięciem izometrycznym (przeciwny hantel) – SSDMP (z ang. Seated single dumbbell military press with isometric hold) (materiał własny).



Ryc. 32 Unoszenie bioder jednonóż w oparciu o skrzynię – SLHT (z ang. Single leg hip thrust) (materiał własny).



Ryc. 33 Przyciąganie jednorącz gumy oporowej – SAFP (z ang. Single arm face pull) (materiał własny).



Ryc. 34 Przysiad z jednoczesnym wyciskaniem półsztangi sprzed klatki piersiowej jednorącz – LSAT (z ang. Landmine single arm thruster) (materiał własny).



Ryc. 35 Przysiad z hantlem (chwyt kielichowy) – DGS (z ang. Dumbbell goblet squat) (materiał własny).



Ryc. 36 Martwy ciąg obunóż z wykorzystaniem sztangi haksagonalnej – TBD (z ang. Trap bar deadlift) (materiał własny).



Ryc. 37 Wyciskanie hantli nad głowę w pozycji siedzącej – SOHDP (z ang. Seated over head dumbbell press) (materiał własny).



Ryc. 38 Unoszenie bioder w oparciu o skrzynię – HT (z ang. Hip thrust) (materiał własny).



Ryc. 39 Przyciąganie hantli do twarzy w opadzie tułowia – DFP (z ang. Dumbbell face pull) (materiał własny).



Ryc. 40 Przysiad z jednoczesnym wyciskaniem półsztangi sprzed klatki piersiowej oburącz – LT (z ang. Landmine thruster) (materiał własny).



Ryc. 41 Przysiad wykroczny z hantlami – DL (z ang. Dumbbell lunges) (materiał własny).



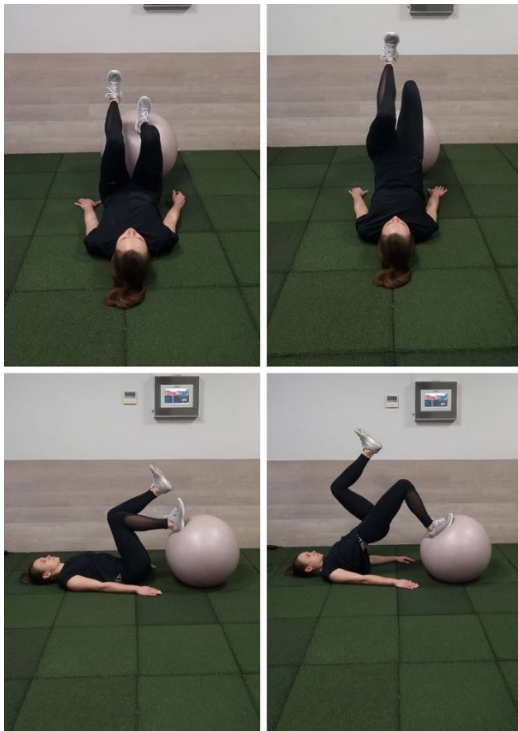
Ryc. 42 Unoszenie bioder jednonóż ze sztangą w oparciu o skrzynię, stopa oparta na podwyższeniu – SLEHT (z ang. Single leg elevated hip thrust) (materiał własny).



Ryc. 43 Wiosłowanie jednorącz hantlem w oparciu o skrzynię – BSADR (z ang. Box single arm dumbbell row) (materiał własny).



Ryc. 44 Wspięcie na palce jednonóż z hantlami – SLCR (z ang. Single leg calf raise) (materiał własny).



Ryc. 45 Unoszenie bioder jednonóż ze stopą opartą o piłkę szwedzką – SBSLGB (z ang. Swiss ball single leg glute bridge) (materiał własny).



Ryc. 46 Rozpiętki jednorącz z hantlem na piłce szwedzkiej, druga kończyna górna napięcie izometryczne – SBSACF (z ang. Swiss ball single arm chest fly with isometric hold) (materiał własny).



Ryc. 47 Przysiad ze sztangą z tyłu – BSHB (z ang. Back squat high bar) (materiał własny).



Ryc. 48 Unoszenie bioder ze sztangą w oparciu o skrzynię, stopa oparta na podwyższeniu – EHT (z ang. Elevated hip thrust) (materiał własny).



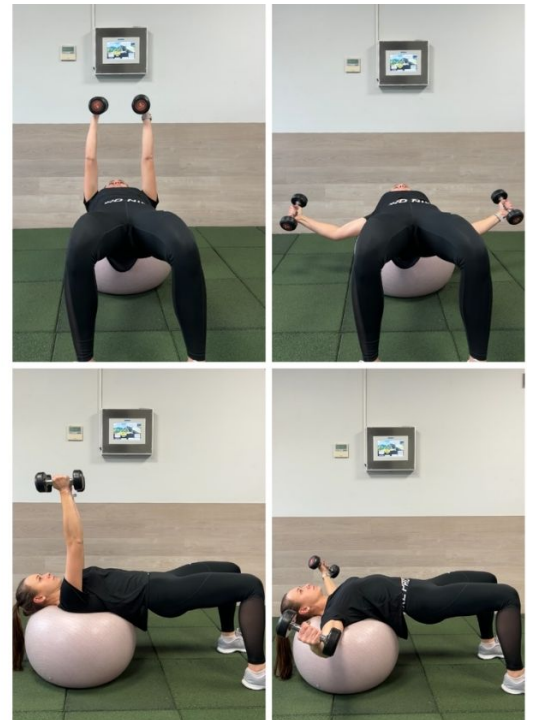
Ryc. 49 Uginanie oburącz hantli z leżenia na piłce szwedzkiej – SBD R (z ang. Swiss ball dumbbell row) (materiał własny).



Ryc. 50 Wspięcie na palce obunóż z hantlami – CR (z ang. Calf raise) (materiał własny).



Ryc. 51 Wznos bioder z jednoczesnym ugięciem kończyn dolnych w stawie kolanowym na piłce szwedzkiej – SBLCU (z ang. Swiss ball leg curl) (materiał własny).



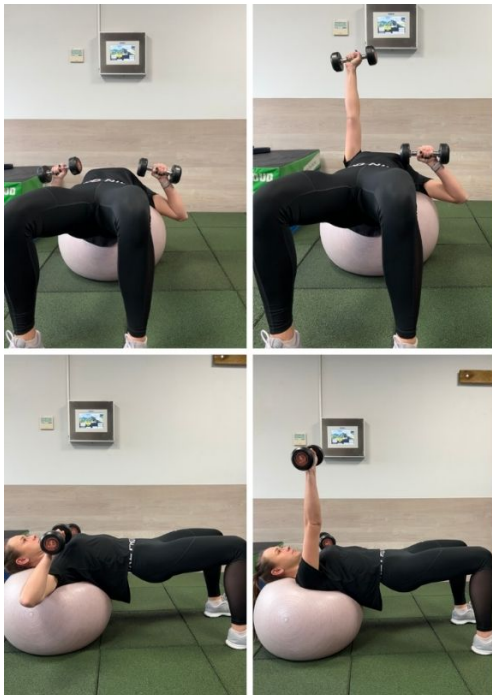
Ryc. 52 Rozpiętki z hantlami na piłce szwedzkiej – SBD CF (z ang. Swiss ball dumbbell chest fly) (materiał własny).



Ryc. 53 Przysiad bułgarski – BSS (z ang. Bulgarian split squat) (materiał własny).



Ryc. 54 Martwy ciąg z pozycji wykroczno-zakrocznej – SSD (z ang. Split-stance deadlift) (materiał własny).



Ryc. 55 Wyciskanie hantla jednorącz na piłce szwedzkiej z izometrycznym utrzymaniem hantla w przeciwstawnej kończynie górnej – SBSACP (z ang. Swiss ball single arm chest press (dumbbell) with isometric hold) (materiał własny).



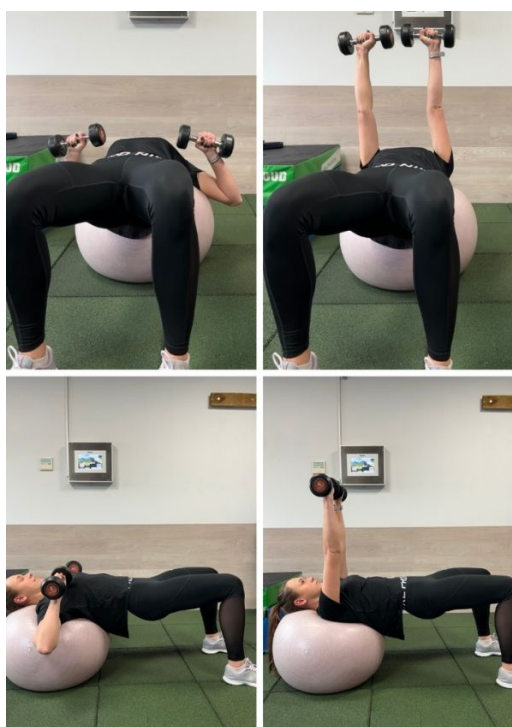
Ryc. 56 Wejście na skrzynię z hantlami – DSU (z ang. Dumbbell step up) (materiał własny).



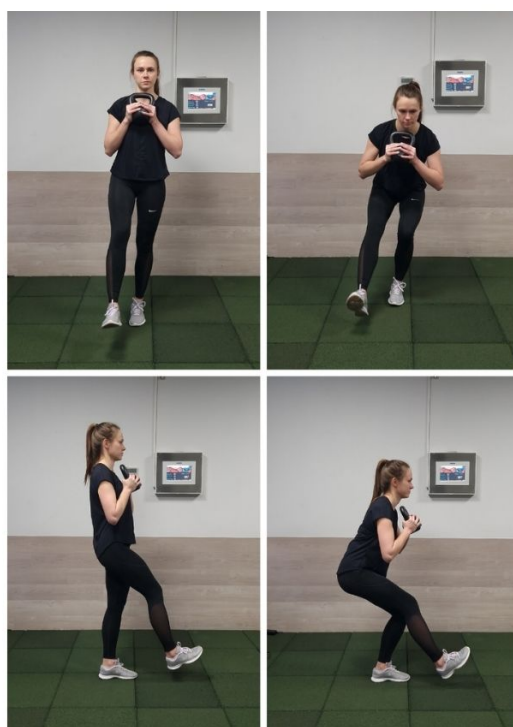
Ryc. 57 Przysiad tylny ze sztangą ustawioną nisko – BLSB (z ang. Back squat low bar) (materiał własny).



Ryc. 58 Martwy ciąg – DEL (z ang. Deadlift) (materiał własny).



Ryc. 59 Wyciskanie hantli leżąc na piłce szwedzkiej – SBDPC (z ang. Swiss ball dumbbell chest press) (materiał własny).



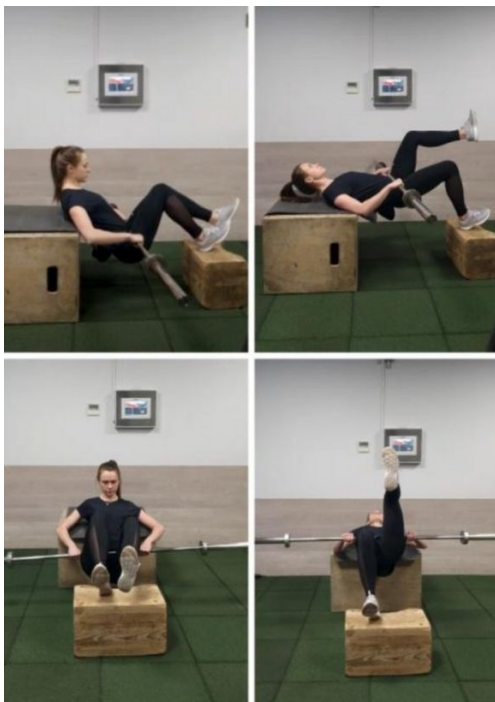
Ryc. 60 Przysiad jednonóż z kettlelem (chwyt kielichowy) – WPS (z ang. Weighted pistol squat with goblet grip) (materiał własny).



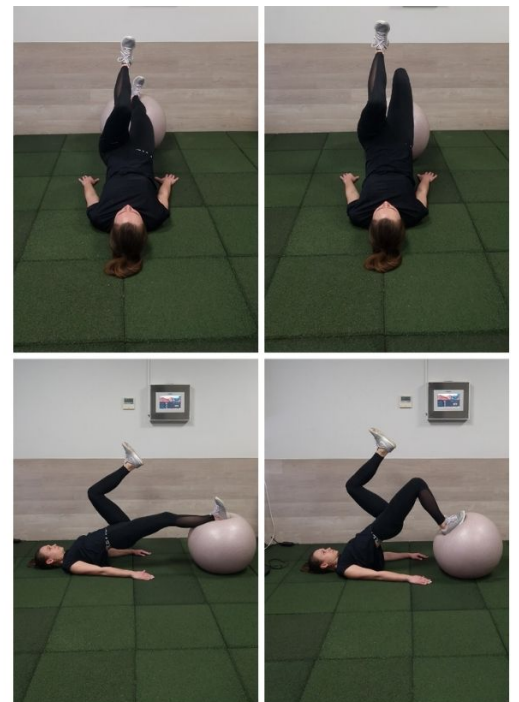
Ryc. 61 Unilateralny przysiad z jednoczesnym wyskokiem jenonóz z hantlami – DSLJS (z ang. Dumbbell single leg jump squat) (materiał własny).



Ryc. 62 Wyciskanie hantla jednorącz z pozycji leżącej (z uniesionym tułowiem i kończynami dolnymi) – HHSAFP (z ang. Hollow hold single arm floor press with isohold) (materiał własny).A



Ryc. 63 Unilateralny wznos bioder (sztanga na biodrach) na podwyższeniu z jednoczesnym wybiciem w końcowej fazie ruchu koncentrycznego – SLEHTJ (z ang. Single leg elevated hip thrust jump) (materiał własny).



Ryc. 64 Wznos bioder z jednoczesnym ugięciem kończyny dolnej w stawie kolanowym na piłce szwedzkiej – SBLSC (z ang. Swiss ball single leg curl) (materiał własny).



Ryc. 65 Przysiad ze sztangą z przodu – FS (z ang. Front squat) (materiał własny).



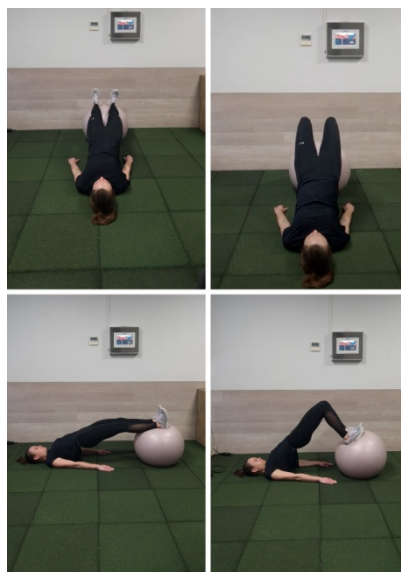
Ryc. 66 Przysiad z jednoczesnym wyskokiem obunóż z hantlami – DJS (z ang. Dumbbell jump squat) (materiał własny).



Ryc. 67 Wyciskanie hantli oburącz w pozycji leżącej (z uniesieniem tułowiem i kończyn dolnych) – HHFP (z ang. Hollow hold floor press) (materiał własny).



Ryc. 68 Unoszenie bioder ze sztangą w oparciu o skrzynię na podwyższeniu – EHTJ (z ang. Elevated hip thrust jump) (materiał własny).



Ryc. 69 Zginanie kończyn dolnych na piłce szwedzkiej leżąc – SWBLC
(z ang. Swiss ball leg curl) (materiał własny).

**OŚWIADCZENIE DOTYCZĄCE WYKORZYSTANIA NARZĘDZI SZTUCZNEJ INTELIGENCJI
W ROZPRAWIE DOKTORSKIEJ¹**

Ja, niżej podpisany/a NATALIA KEDRA oświadczam, że
Imię i nazwisko autora rozprawy

podczas przygotowania rozprawy doktorskiej mojego autorstwa pod tytułem: WPEŁN

TRENINGU OPOROWEGO ORAZ ZMIENNYCH WARUNKÓW
tytuł rozprawy

ŚRODKAMI SKONYCH NA WYBRANE STĘŻENIA HORMONÓW
ORAZ SIŁĘ MIĘŚNIOWĄ U PIEKARZY NOCNYCH PO
REKONSTRUKCJI WIEŻADŁA KRZYLOWEGO PRZEDNIEGO

☒ Nie korzystałem/am z narzędzi sztucznej inteligencji.

☐ Korzystałem/am z narzędzi sztucznej inteligencji podczas przygotowywania rozprawy doktorskiej,
zgodnie z poniższym zakresem:

- | | |
|---|--|
| - ☐ Analiza danych | - ☐ Generowanie treści tekstowych |
| - ☐ Redakcja tekstu | - ☐ Kodowanie lub analiza kodu |
| - ☐ Inne (opisać): | |

Jednocześnie oświadczam, że informacje o celach, zakresie i sposobie wykorzystania sztucznej inteligencji są opisane i czytelnie oznaczone w rozprawie doktorskiej zgodnie z §4 ust. 4 regulaminu prowadzenia postępowań w sprawie nadania stopnia doktora i doktora habilitowanego AWF Katowice. Oświadczam również, że pomimo zastosowania SI w rozprawie doktorskiej, to nadal zapewniona jest realizacja wymagań określonych w art. 187 ust. 1 i 2 Ustawy Prawo o szkolnictwie wyższym i nauce z dnia 20 lipca 2018 r, gdzie określono następujące wymagania stawiane rozprawą doktorskim:

- Rozprawa doktorska prezentuje ogólną wiedzę teoretyczną kandydata w dyscyplinie albo dyscyplinach oraz umiejętność samodzielnego prowadzenia pracy naukowej lub artystycznej.
- Przedmiotem rozprawy doktorskiej jest oryginalne rozwiązanie problemu naukowego, oryginalne rozwiązanie w zakresie zastosowania wyników własnych badań naukowych w sferze gospodarczej lub społecznej albo oryginalne dokonanie artystyczne.

Data i Podpis Doktoranta: 17.06.2025 Natalia Kedra

¹Oświadczenie należy umieścić na samym końcu rozprawy doktorskiej po bibliografii lub ewentualnych aneksach