

**Uniwersytet Jagielloński Collegium Medicum**

**Wydział Lekarski**

**Kierunek dietetyka**

**Krzysztof Winczyk**

**WPLYW DIETY NA EFEKTYWNOŚĆ  
TRENINGU OPOROWEGO I PROCES  
REGENERACJI**

**PRACA LICENCJACKA**

Promotor: Prof. dr. hab. n. med. Bartłomiej Matejko

Praca wykonana w Katedrze Chorób Metabolicznych

Kierownik katedry: Prof. dr hab. n. med. Tomasz Klupa

Kraków 2026

# Spis treści

STRESZCZENIE.....	4
ABSTRACT .....	5
WYKAZ SKRÓTÓW.....	6
WSTĘP .....	9
1. CZĘŚĆ TEORETYCZNA.....	12
1.1 Znaczenie treningu oporowego w zdrowiu i sporcie .....	12
1.2 Fizjologia treningu oporowego .....	14
1.2.1 Charakterystyka szlaków bioenergetycznych .....	14
1.2.2 Mechanizm hipertrofii mięśniowej .....	16
1.2.3 Rola układu nerwowego i hormonalnego.....	18
1.3 Metody treningu oporowego ukierunkowane na hipertrofię .....	21
1.4 Periodyzacja w treningu oporowym .....	22
1.5 Regeneracja i superkompensacja .....	23
1.5.1 Fizjologiczny proces regeneracji i zjawisko superkompensacji .....	23
1.5.2 Fizjologia stanu zapalnego i objaw opóźnionej bolesności mięśniowej .....	25
1.5.3 Rola snu i rytmu dobowego .....	27
1.5.4 Regeneracja aktywna i pasywna .....	29
1.5.5 Zjawisko przetrenowania .....	29
1.6 Wpływ podaży makroskładników na efektywność treningową.....	30
1.6.1 Białko .....	30
1.6.2. Węglowodany.....	33
1.6.3 Tłuszcze.....	35
1.7 Wpływ bilansu energetycznego na trening oporowy.....	37
1.7.1 Nadwyżka energetyczna.....	37
1.7.2 Deficyt energetyczny.....	39
1.8 Znaczenie podaży płynów w treningu oporowym .....	40
1.9 Suplementacja w treningu oporowym .....	42
1.10 Analiza wpływu wybranych diet na trening oporowy .....	44
2. PODSUMOWANIE CZĘŚCI TEORETYCZNEJ .....	47
3. OPIS PRZYPADKU I ZALECENIA DIETETYCZNE .....	48
4. JADŁOSPIS SIEDMIODNIOWY .....	50
4.1 Dzień pierwszy (treningowy).....	50

4.2 Dzień drugi (treningowy).....	52
4.3 Dzień trzeci (nietreningowy) .....	54
4.4 Dzień czwarty (treningowy) .....	55
4.5 Dzień piąty (treningowy) .....	57
4.6 Dzień szósty (nietreningowy) .....	59
4.7 Dzień siódmy (nietreningowy) .....	61
4.8 Podsumowanie jadłospisu.....	63
SPIS TABEL .....	65
SPIS RYCIN.....	66
BIBLIOGRAFIA .....	67

# STRESZCZENIE

Krzysztof Winsczyk

## Wpływ diety na efektywność treningu oporowego i proces regeneracji

**Słowa kluczowe:** trening oporowy, regeneracja, dieta, bilans energetyczny, hipertrofia mięśniowa, białko

Trening oporowy jest formą aktywności fizycznej szybko zyskującą na popularności z uwagi na liczne korzyści zdrowotne i funkcjonalne. Jest on kluczowy dla zawodowych sportowców chcących zbudować masę mięśniową, jak i dla osób niezwiązanych ze sportem wyczynowym, ponieważ poprawia jakość życia i ogólną sprawność fizyczną. Niniejsza praca zwraca uwagę na te jak i mniej doceniane korzyści uprawiania treningu oporowego, w tym zapobieganie sarkopenii lub poprawę zdrowia psychicznego. Celem pracy jest omówienie wpływu diety na efektywność treningu oporowego oraz proces regeneracji, ze szczególnym uwzględnieniem bilansu energetycznego, podaży makroskładników, nawodnienia i suplementacji.

W pracy przedstawiono fizjologiczne podstawy hipertrofii mięśniowej, rolę szlaków energetycznych oraz znaczenie układów nerwowego i hormonalnego w adaptacjach treningowych. Omówiono również wybrane metody treningowe ukierunkowane na rozwój masy mięśniowej oraz znaczenie periodyzacji. Szczególną uwagę poświęcono regeneracji jako procesowi wieloczynnikowemu, zależnemu między innymi od obciążenia treningowego, podaży energii, jakości diety i strategii żywieniowych. Przedstawione zagadnienia zastosowano następnie w siedmiodniowym jadłospisie opracowanym dla przykładowego sportowca uprawiającego trening oporowy.

# **ABSTRACT**

**Krzysztof Winczyk**

## **The impact of diet on the effectiveness of resistance training and recovery**

**Key words:** resistance training, recovery, diet, energy balance, muscle hypertrophy, protein

Resistance training is becoming increasingly popular due to its wide range of health and performance-related benefits. It plays an important role not only in professional sport and muscle mass development, but also in improving physical fitness, quality of life, and long-term health in non-athletic populations. This paper highlights not only these, but also many lesser-known advantages that stem from resistance training, such as preventing sarcopenia or improving mental health. The thesis also discusses the physiological basis of resistance training, with particular emphasis on muscle hypertrophy, energy metabolism, and the role of the nervous and endocrine systems. It also presents selected training methods aimed at maximizing hypertrophic adaptations and outlines the importance of periodization.

Special attention is given to recovery as a multifactorial process influenced by training load, energy intake, macronutrient distribution, hydration, and supplementation. The report analyses the roles of protein, carbohydrates, fats, fluid intake, and selected dietary strategies in supporting resistance training performance and post-exercise recovery. The theoretical considerations are then applied in a seven-day meal plan designed for a hypothetical athlete engaged in resistance training.

# WYKAZ SKRÓTÓW

**ALA** – ang. Alpha-Linolenic Acid (Kwas alfa-linolenowy)

**AMPK** – ang. AMP-activated Protein Kinase (Kinaza białkowa aktywowana adenozy-5' monofosforanem)

**AR** – ang. Active Regeneration (Regeneracja aktywna)

**ATP** – ang. Adenosine triphosphate (Adenozynotrifosforan)

**BCAA** – ang. Branched Chain Amino Acids (Aminokwasy Rozgałęzione)

**CK** – ang. Creatine Kinase (Kinaza kreatynowa)

**CRP** – ang. C-reactive Protein (Białko C-reaktywne)

**CrP** – ang. Creatine Phosphate (Fosfokreatyna)

**DHA** – ang. Docosahexaenoic Acid (Kwas dokozaheksaenowy)

**DOMS** – ang. Delayed Onset Muscle Soreness (Objaw opóźnionej bolesności mięśniowej)

**DŚ** – Dieta Śródziemnomorska

**DUP** – ang. Daily Undulating Periodization (Periodyzacja falowa)

**EAA** – ang. Essential Amino Acids (Aminokwasy Egzogenne)

**ECM** – ang. Extracellular Matrix (Macierz zewnątrzkomórkowa)

**EPA** – ang. Eicosapentaenoic Acid (Kwas eikozapentaenowy)

**EPOC** – ang. Excess Post-exercise Oxygen Consumption (Zwiększona powysiłkowa konsumpcja tlenu)

**FAK** – ang. Focal Adhesion Kinase (Kinaza ogniskowa)

**FOR** – ang. Functional Overreaching (Zamierzony, krótkotrwały spadek formy)

**FRB** – ang. FKBP-Rapamycin-Binding (FKBP łączone z rapamycyną)

**GH** – ang. Growth Hormone (Hormon wzrostu)

**GLUT4** – ang. Glucose transporter Type 4 (Transporter glukozy typu 4)

**HbA1c** – Hemoglobina glikowana

**HD-EMG** – ang. High Definition Electromyography (Elektromiografia wysokiej rozdzielczości)

**HDL** – ang. High Density Lipoprotein (Lipoproteiny o wysokiej gęstości)

**HIIT** – ang. High Intensity Interval Training (Trening interwałowy o wysokiej intensywności)

**IG** – Indeks Glikemiczny

**IGF-1** – ang. Insulin-like Growth Factor 1 (Insulinopodobny czynnik wzrostu 1)

**IL-6** – ang. Interleukin-6 (Interleukina 6)

**LDL** – ang. Low Density Lipoprotein (Lipoproteiny o niskiej gęstości)

**LP** – ang. Linear Periodization (Periodyzacja liniowa)

**MAPK** – ang. Mitogen Activated Protein Kinase (Kinaza aktywowana mitotycznie)

**MGF** – ang. Mechanical Growth Factor (Mechaniczny czynnik wzrostu)

**MPS** – ang. Muscle Protein Synthesis (Synteza białek miofibrylarnych)

**mTORC1** – ang. mechanistic Target of Rapamycin Complex 1 (Mechanistyczny cel rapamycyny kompleks 1)

**MVF** – ang. Maximal Volitional Force (Maksymalna siła wolicjonalna)

**NAD+** - ang. Nicotinamide Adenine Dinucleotide (Dinukleotyd nikotynoamidoadeninowy)

**NFOR** – ang. Non-Functional Overreaching (Długotrwały, niezamierzony spadek formy)

**NPB** – ang. Net Protein Balance (Balans białkowy netto)

**NREM** – ang. Non-Rapid Eye Movement (Brak szybkich ruchów gałek ocznych)

**OTS** – ang. Overtraining Syndrome (Zespół przetrenowania – stan chronicznego wyczerpania)

**OUN** – Ośrodkowy Układ Nerwowy

**PA** – ang. Phosphatidic Acid (Kwas fosfatydowy)

**PI3K** – ang. Phosphoinositide 3-Kinase (Kinaza fosfatydyloinozytolu-3)

**PPAR** – ang. Peroxisome Proliferator Activated Receptors (Receptory Aktywowane Proliferatorami Peroksysomów)

**PR** – ang. Passive Regeneration (Regeneracja pasywna)

**PUFA** – ang. Poly Unsaturated Fatty Acids (Wielonienasycone kwasy tłuszczowe)

**RIR** – ang. Reps In Reserve (Liczba powtórzeń możliwych do wykonania przed upadkiem mięśniowym)

**RM** – ang. Rep Maximum (Obciążenie maksymalne na jedno powtórzenie)

**RPE** – ang. Rate of Perceived Exertion (Subiektywna skala oceny wysiłku)

**T** – Testosteron

**TAZ** – ang. Transcriptional Coactivator with PDZ-binding Motif (Białko TAZ)

**TNF- $\alpha$**  – ang. Tumor Necrosis Factor  $\alpha$  (Czynnik martwicy nowotworów  $\alpha$ )

**YAP** – ang. Yes-Associated Protein (Białko YAP)

## WSTĘP

W ostatnich latach obserwuje się wyraźny wzrost zainteresowania aktywnością fizyczną, w tym szczególnie treningiem oporowym, który stanowi podstawowy element zarówno sportu wyczynowego, jak i rekreacyjnego. W 2020 roku 35.2% mężczyzn i 26.9% kobiet powyżej 18 roku życia w Stanach Zjednoczonych uprawiało aktywność fizyczną zgodną z federalnymi zaleceniami ukierunkowanymi na wzmacnianie mięśni co najmniej dwa razy w tygodniu [1]. W krajach europejskich analogiczny trend jest mniej widoczny, jedynie 17.3% badanych dorosłych brało udział w aktywności fizycznej o charakterze treningu oporowego przynajmniej dwukrotnie w skali tygodnia [2]. Warto zaznaczyć, iż wynik Polski był jednym z najniższych w Europie, na poziomie 5.5% [2]. Przedstawione wyniki są niewątpliwie niepokojące, biorąc pod uwagę bezsporne korzyści płynące z treningu oporowego w kontekście wydolności fizycznej społeczeństwa, jak i profilaktyki chorób cywilizacyjnych.

Szerzenie świadomości na temat pozytywnych efektów krótko- i długoterminowych płynących z treningu oporowego stanowi bezsprzecznie kluczowy aspekt edukacji zdrowotnej, który powinien być szczególnie priorytetyzowany w obecnym społeczeństwie z uwagi na rosnący problem otyłości i chorób metabolicznych [3]. Ponadto aby zmaksymalizować korzyści płynące z treningu, niezbędna jest stosowna edukacja na temat regeneracji powysiłkowej oraz wpływu diety na procesy zachodzące w organizmie. Proces adaptacji treningowej jest konieczny dla utrzymania ciągłego postępu w wybranej dyscyplinie sportu, niezależnie od jej charakteru [4]. W kontekście treningu oporowego mechanizm superkompensacji (specyficzne modyfikacje biochemiczne, strukturalne i mechaniczne, które podnoszą zdolność sportowca w danej dziedzinie) jest kluczowy i powinien być on traktowany priorytetowo przez sportowców, którzy pragną systematycznie poprawiać swoje wyniki.

Głównymi celami treningu oporowego są zwiększenie masy (hipertrofia) i siły mięśni oraz poprawa ich wytrzymałości. Adaptacje charakterystyczne dla treningu oporowego zachodzą zarówno na poziomie mięśniowym poprzez napięcie mechaniczne oddziałujące na włókna, jak i nerwowym w wyniku stymulacji ośrodkowego i obwodowego układu nerwowego [5,6]. Stopień efektywności wymienionych adaptacji treningowych determinowany jest złożonymi procesami fizjologicznymi, w tym równowagą między syntezą a degradacją białek mięśniowych [5]. Ponadto procesy zarówno budowy, jak i atrofii włókien mięśniowych zależą przeważająco od dostępności składników odżywczych oraz bilansu energetycznego organizmu, co sugeruje, iż dieta może w znaczący sposób modulować tempo i jakość regeneracji [5].

Wpływ poszczególnych makroskładników na proces adaptacji treningowej stanowi obecnie przedmiot dużego zainteresowania w świecie sportu, a na temat każdego z nich można usłyszeć zróżnicowane opinie. Większość badaczy jest jednak zgodna, iż rola białka jest kluczowa zarówno w procesie syntezy białek mięśniowych, jak i w zapobieganiu atrofii powstałych już włókien, nierozwiązanym problemem pozostaje tylko kwestia optymalnej podaży [7]. Kolejnym kluczowym składnikiem w diecie sportowców niewątpliwie są węglowodany, które zapewniają energię podczas treningu dzięki zapasom glikogenu magazynowanym w wątrobie i mięśniach szkieletowych. Ostatnim oraz być może najbardziej niedocenianym makroskładnikiem w kontekście treningu oporowego są tłuszcze, które mają renomę raczej bezużytecznych w procesie adaptacji treningowej. Mimo panujących przekonań odpowiednia podaż tłuszczów nienasyconych, w tym kwasów omega-3 i omega-6, jest znacząca w procesie regeneracji [8].

Bilans kaloryczny jest kolejnym elementem, który wpływa znacząco na proces odbudowy organizmu oraz modyfikuje mechanizmy adaptacji treningowych [9]. W okresach deficytu kalorycznego należy szczególnie zwracać uwagę na podaż białka, by maksymalnie zapobiec atrofii białek mięśniowych. Proces ten może zachodzić, gdy ciało nie otrzymuje wystarczającej energii z pożywienia. Z kolei będąc w nadwyżce kalorycznej, korzystne może być obniżenie spożycia białka na rzecz węglowodanów, które mogą zmaksymalizować wysycenie mięśni glikogenem i wpływać pozytywnie na hipertrofię mięśniową oraz adaptacje siłowe [9].

Następnym istotnym parametrem oddziaływującym na proces regeneracji jest podaż płynów oraz mikro- i makroelementów, które biorą udział w procesie treningu samego w sobie, jak i w powysiłkowym etapie regeneracji [10]. Najistotniejsze z nich to elektrolity, takie jak sód, potas, magnez i wapń, które wspierają prawidłowe funkcjonowanie mięśni i układu nerwowego oraz procesy metaboliczne związane z regeneracją organizmu [10].

Pomimo dużej liczby publikacji naukowych dotyczących zarówno treningu oporowego, jak i żywienia sportowców, nadal istnieją rozbieżności w kwestii optymalnych strategii dietetycznych wspierających adaptację potreningową. W praktyce obserwuje się, że wiele osób trenujących szeroko pojęty sport nie przykładają wystarczającej wagi do jakości i kompozycji diety, co może prowadzić do pogorszenia efektów treningowych, wydłużenia czasu regeneracji, a nawet przetrenowania i kontuzji. Z tego względu konieczna jest analiza zależności pomiędzy sposobem odżywiania a wynikami osiąganymi w treningu oporowym.

Celem głównym niniejszej pracy poglądowej jest ocena wpływu sposobu żywienia na efektywność treningu oporowego i proces regeneracji organizmu.

Cele szczegółowe to:

1. Demonstracja pozytywnego wpływu treningu oporowego na zdrowie i wyniki sportowe
2. Skrócone omówienie fizjologii treningu oporowego
3. Omówienie metod treningu ukierunkowanych na hipertrofię mięśniową i rozwój siły
4. Przedstawienie wpływu treningu oporowego na wybrane parametry zdrowotne
5. Opis procesu regeneracji i superkompensacji w kontekście treningu oporowego
6. Analiza odpowiedniej podaży mikro- i makroskładników oraz kalorii w kontekście treningu oporowego
7. Omówienie wpływu podaży płynów i suplementacji na trening oporowy
8. Analiza najpopularniejszych diet w kontekście treningu oporowego
9. Zastosowanie omówionych zaleceń w praktyce poprzez wdrożenie ich do siedmiodniowego jadłospisu

# 1. CZĘŚĆ TEORETYCZNA

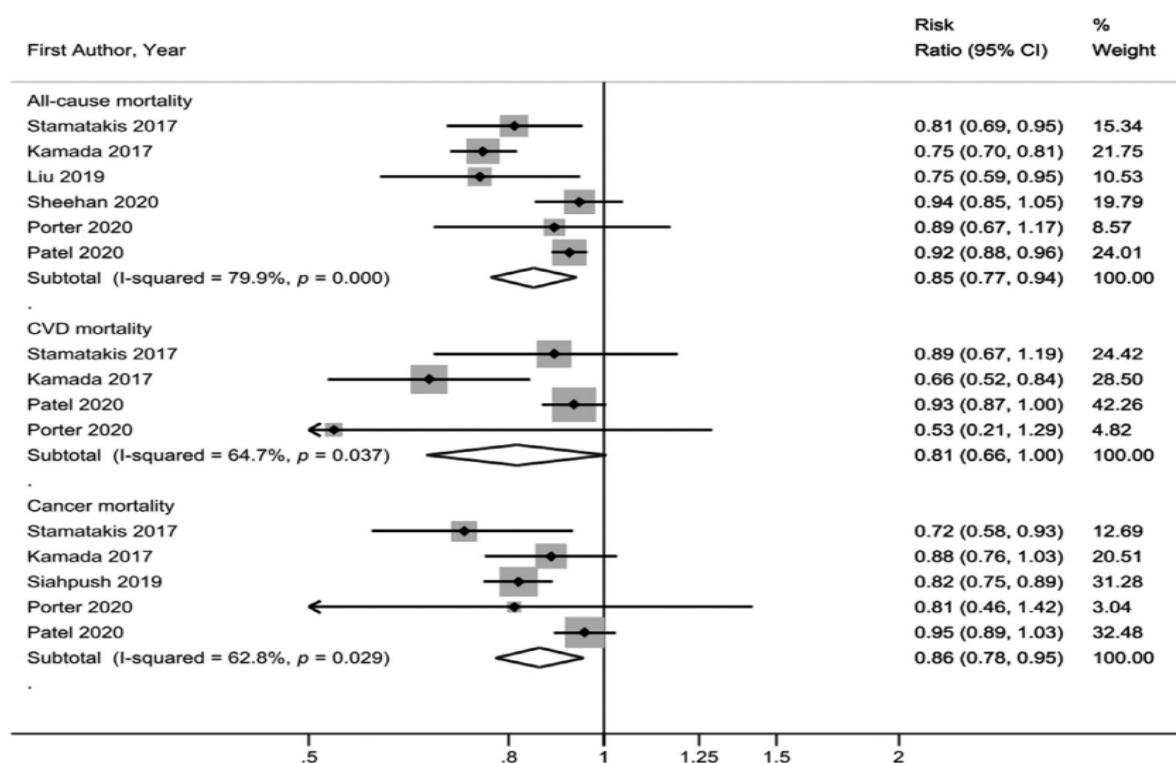
## 1.1 Znaczenie treningu oporowego w zdrowiu i sporcie

By w pełni zrozumieć korzyści płynące z treningu oporowego, trzeba najpierw poznać mechanizm jego działania. Trening oporowy definiowany jest jako specjalna metoda poprawiania kondycji fizycznej, w której na trenowane mięśnie oddziałuje zewnętrzny opór wyzwalający skurcze mięśniowe [11]. Rodzaj bodźców zewnętrznych jest zróżnicowany i może obejmować wolne ciężary, maszyny, gumy oporowe lub ciężar własnego ciała. Kluczowym elementem pozostaje progresywne zwiększanie siły oporu, by wywołać adaptacje prowadzące do poprawy siły i wytrzymałości mięśniowej oraz wydolności sportowej [11].

Slogan “ruch to zdrowie” jest powszechnie znany i używany w dzisiejszym świecie, jednak niewiele osób faktycznie rozumie korzyści płynące ze zmuszania naszego organizmu do różnych form aktywności fizycznej, a w szczególności treningu oporowego. Pozytywnych efektów zdrowotnych płynących z treningu oporowego jest ogromna ilość i można podzielić je na wiele kategorii, jednakże najbardziej istotnym z nich jest niewątpliwie wpływ na czynniki metaboliczne. Wielokrotnie wykazane zostało, iż aktywność fizyczna jest niezmiernie ważna w walce z chorobami takimi jak otyłość, cukrzyca typu II czy zespół metaboliczny [3]. Ponadto wpływy treningu można zaobserwować nawet po krótkim czasie od rozpoczęcia aktywności. Badania wskazują, że już 10 tygodni ćwiczeń siłowych u osób nieaktywnych zwiększa masę beztłuszczową u badanych o ok. 1,4 kg, podnosi tempo przemiany materii o 7% i zmniejsza masę tłuszczu o 1,8 kg [12]. Co więcej, regularny trening oporowy poprawia wrażliwość na insulinę i parametry glikemii – zmniejsza poziom HbA1c (hemoglobiny glikowanej), redukuje tkankę tłuszczową trzewną, obniża ciśnienie krwi i wpływa korzystnie na profil lipidowy poprzez obniżenie stężenia cholesterolu LDL (*Low Density Lipoprotein*) i trójglicerydów oraz podwyższenie stężenia HDL (*High Density Lipoprotein*) [13]. Metaanalizy wskazują również, że nawet umiarkowane zaangażowanie w trening oporowy wiąże się ze znaczącą redukcją umieralności. Ryzyko zgonu ze wszystkich przyczyn maleje o ok. 15%, a zgonu z przyczyn sercowo-naczyniowych o ok. 19%, w porównaniu z osobami nie ćwiczącymi [14] (Ryc. 1).

Następną, niewątpliwie istotną korzyścią uprawiania treningu oporowego jest pomyślny wpływ na układ mięśniowo-szkieletowy [12]. Chociaż ten pozytywny aspekt ćwiczeń jest często kojarzony ze sportowcami, odgrywa on również kluczową rolę w zdrowiu ogólnej populacji. Pierwszą rzeczą o jakiej należy wspomnieć jest fakt, że trening siłowy wspomaga rozwój i zwiększa gęstość mineralną kości oraz chroni przed utratą masy mięśniowej

(sarkopenią). Choroba ta jest bardzo prewalentna, szczególnie wśród seniorów, którzy mogą tracić do ośmiu procent masy mięśniowej na dekadę poprzez brak aktywności [12]. Ponadto nawet u starszych osób, które chorują na sarkopenię, badania wykazały istotny wzrost siły mięśni oraz sprawności funkcjonalnej poprzez lepsze wyniki w testach uścisku dłoni, siły prostowników kolana, szybkości chodu lub testu “Wstań i idź” wskutek brania udziału w regularnym treningu oporowym [15]. Co więcej, trening siłowy poprawia również postawę i równowagę oraz zmniejsza ból przewlekły, co przekłada się na większą samodzielność i sprawność ruchową osób starszych i chorujących [14].



Rycina 1. Metaanaliza przedstawiająca zależność pomiędzy uprawianiem i nieuprawianiem treningu oporowego a umieralnością [14]

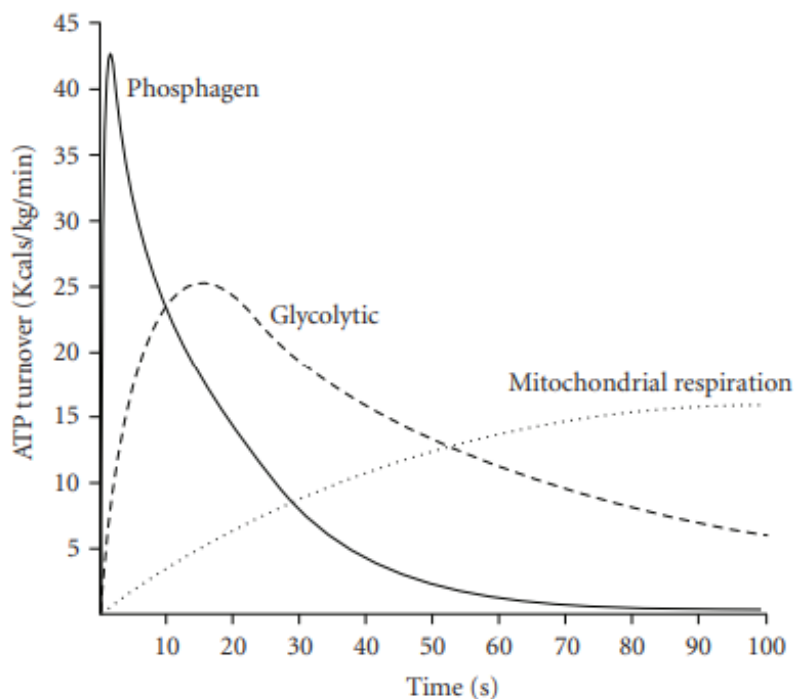
Powszechnie znany jest fakt, iż trening oporowy odgrywa istotną rolę w budowie tkanki mięśniowej, poprawie siły oraz wytrzymałości włókien mięśniowych. Mniej docenianą korzyścią jest jego wpływ na prewencję urazów poprzez wzmacnianie ścięgien, więzadeł i kości. Badania kliniczne wskazują na istotną korelację pomiędzy zmniejszeniem liczby urazów osteoartkularnych a regularnym wykonywaniem ćwiczeń siłowych [16]. Efekt ten jest szczególnie istotny dla sportowców, którzy bardziej niż przeciętni ludzie cierpią w wyniku kontuzji. Badanie przeprowadzone na osobach regularnie uprawiających najbardziej urazogenne sporty kontaktowe ujawniło, że osoby, które regularnie wzbogacały swoją aktywność o ćwiczenia siłowe, obniżyły swoje ryzyko kontuzji nawet o 30% [17].

Poprawa zdrowia psychicznego ćwiczących jest być może najmniej znaną, lecz niemniej istotną korzyścią szeroko pojętego treningu oporowego. Wyniki niedawno sporządzonych metaanaliz są obiecujące w kontekście leczenia depresji i zaburzeń lękowych za pomocą różnych form aktywności fizycznej [18,19]. Badania jasno wskazują na poprawę stanu pacjentów po wdrożeniu regularnej aktywności fizycznej. Efekt ten można zaobserwować w metaanalizie z 2023 roku, w której osoby badane zanotowały wyraźny spadek symptomów depresyjnych (Hedge's  $g = -1.06$ ) oraz lękowych (Hedge's  $g = -1.02$ ) dzięki systematycznemu zaangażowaniu w trening oporowy [19]. Ponadto różne formy treningu siłowego wpływają pozytywnie nie tylko na osoby z problemami natury psychicznej, lecz również na samopoczucie mentalne osób zdrowych [20]. Częste uprawianie treningu oporowego wpływa pozytywnie na samoocenę, nastrój i pewność siebie, co przekłada się na większe zadowolenie z życia [19].

## 1.2 Fizjologia treningu oporowego

### 1.2.1 Charakterystyka szlaków bioenergetycznych

Długo panującym przeświadczeniem w środowiskach naukowych było stwierdzenie, że trening oporowy opiera się na mechanizmach ściśle anaerobowych. Jednakże współczesna fizjologia wysiłku fizycznego redefiniuje ten typ treningu, odchodząc od klasycznego modelu pracy wyłącznie beztlenowej na rzecz koncepcji zintegrowanego continuum energetycznego.



Rycina 2. Zależność pomiędzy obrotem ATP i wykorzystaniem systemów energetycznych a czasem wysiłku [21]

Badania wykazują, że resynteza adenosynotryfosforanu (ATP) podczas intensywnego wysiłku nie zachodzi sekwencyjnie, lecz poprzez symultaniczną aktywację systemów fosfagenowego, glikolitycznego i mitochondrialnego, gdzie ich wzajemny udział jest determinowany intensywnością skurczu oraz czasem trwania napięcia mięśniowego [21] (Ryc. 2).

W początkowej fazie generowania mocy kluczową rolę odgrywa hydroliza fosfokreatyny (CrP), która zapewnia natychmiastową dostępność grup fosforanowych. Jednakże w typowych dla treningu kulturystycznego protokołach wieloseryjnych zasoby te ulegają szybkiemu wyczerpaniu, co wymusza dominację glikolizy beztlenowej. Proces ten wiąże się z akumulacją metabolitów, takich jak jony wodorowe i mleczan, które tradycyjnie utożsamiane są ze zmęczeniem, lecz w rzeczywistości pełnią istotne funkcje sygnałowe [21]. Nowe badania sugerują, że produkcja mleczanu przez mięśnie jest korzystna dla skurczów włókien i metabolizmu substratów. Mechanizm ten działa poprzez usuwanie pirogronianu i regenerowanie jonów dinukleotydu nikotynoamidoadeninowego (NAD<sup>+</sup>) by utrzymać wysoką intensywność regeneracji ATP poprzez glikolizę oraz metaboliczne buforowanie protonów. W świetle tych doniesień wnioskuje się, że człowiek nie byłby w stanie wykonywać intensywnych ćwiczeń fizycznych przez czas dłuższy niż 10–15 sekund bez produkcji mleczanu [21]. Kluczowym elementem bioenergetyki treningu oporowego wykraczającym poza samą produkcję ATP, lecz będącym jej niezbędnym elementem, jest mechanizm dostarczania substratów energetycznych do pracujących mięśni [21]. Głównym substratem wymagającym uwagi w kontekście tego mechanizmu jest glukoza. Transport tego monosacharydu w tym przypadku odbywa się niezależnie od ścieżki insulinowej, wykorzystując unikalny szlak sygnałowy aktywowany przez napięcie mechaniczne. Z rezultatów badań wynika, że za translokację transportera glukozy 4 (GLUT4) do błony komórkowej podczas skurczu odpowiada białko Rac1, które reaguje na stres mechaniczny cytoszkieletu [22]. Jest to odkrycie fundamentalne dla zrozumienia fizjologii treningu oporowego dowodzące, że sam akt generowania siły i rozciągania mięśnia pod obciążeniem bezpośrednio steruje wychwytem glukozy z krwi. Proces ten współdziała z kinazą białkową aktywowaną adenosyno-5'-monofosforanem (AMPK), która z kolei monitoruje stan energetyczny komórki [22]. Oznacza to, że trening oporowy aktywuje molekularną maszynę metaboliczną w sposób specyficzny, odmienny od wysiłków o charakterze ciągłym, co ma istotne implikacje dla wspierania metabolizmu węglowodanów u osób z zaburzeniami glikemii.

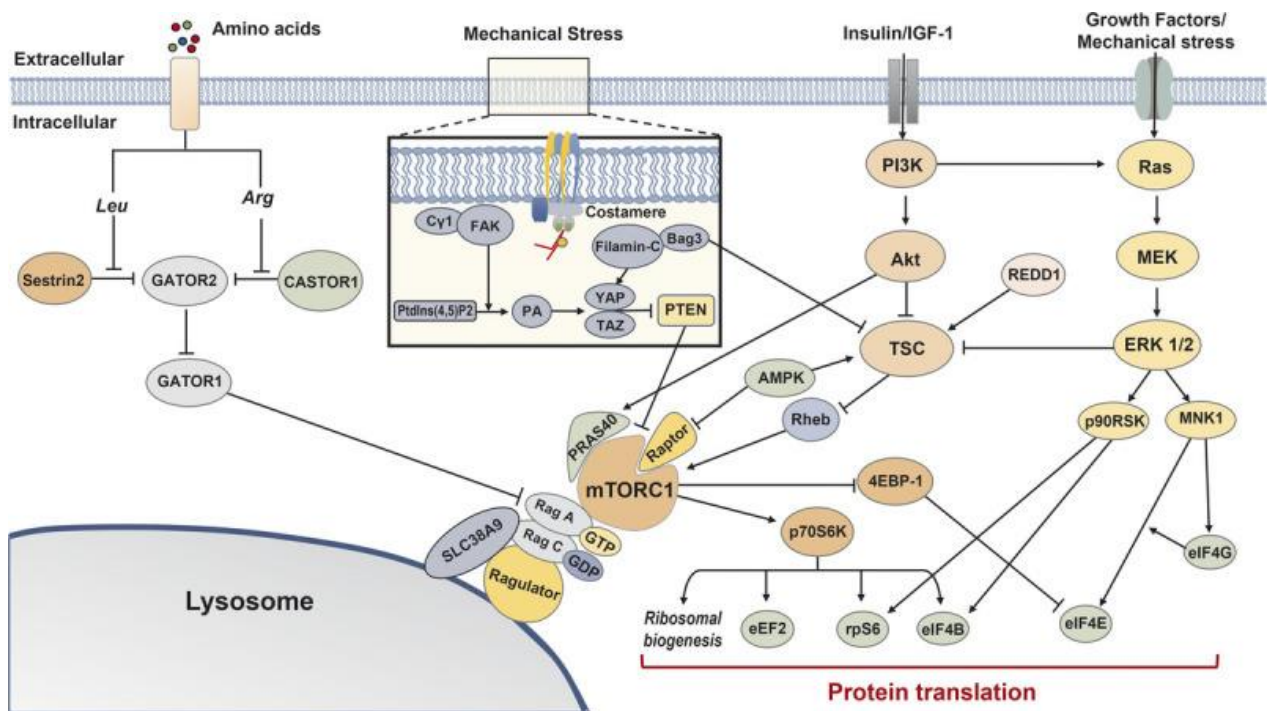
Dopełnieniem profilu energetycznego treningu oporowego jest rola metabolizmu tlenowego, który jest marginalny podczas samej serii, ale staje się dominujący w okresach przerw między seriami oraz po zakończeniu jednostki treningowej. To właśnie system tlenowy odpowiada za resyntezę fosfokreatyny oraz utylizację mleczanu, co jest procesem energochłonnym. Zjawisko to manifestuje się jako zwiększona powysiłkowa konsumpcja tlenu (EPOC), będąca miarą długu tlenowego zaciągniętego podczas pracy beztlenowej [23]. W niedawnym badaniu porównującym trening interwałowy o dużej intensywności (HIIT) z treningiem oporowym typu obwodowego (*circuit training*) wykazano, że obie formy wysiłku prowadzą do istotnego podniesienia spoczynkowego wydatku energetycznego utrzymującego się nawet do 14 godzin po zakończeniu sesji [23]. Wyniki te potwierdzają, że trening oporowy, poprzez głębokie zaburzenie homeostazy wewnątrzkomórkowej i konieczność odbudowy zasobów energetycznych, generuje istotny wydatek kaloryczny długo po zaprzestaniu aktywności fizycznej, co pozycjonuje go jako skuteczne narzędzie kontroli masy ciała i poprawy zdrowia metabolicznego.

### **1.2.2 Mechanizm hipertrofii mięśniowej**

Współczesna fizjologia wysiłku fizycznego przechodzi istotną zmianę paradygmatu w kontekście rozumienia mechanizmów sterujących wzrostem masy mięśniowej. Skutkuje to stopniowym odchodzeniem od modeli opartych wyłącznie na uszkodzeniach włókien czy stresie metabolicznym na rzecz dominującej roli napięcia mechanicznego [24]. Hipertrofia mięśni szkieletowych, definiowana jako wzrost pola przekroju poprzecznego włókien mięśniowych, jest procesem wieloczynnikowym. Najnowsze dowody naukowe jednak jednoznacznie wskazują na to, że to mechanotransdukcja, czyli proces przekształcania bodźców fizycznych w sygnały biochemiczne, stanowi nadrzędny bodziec prowadzący do adaptacji anabolicznych [24]. Napięcie mechaniczne, generowane zarówno aktywnie przez mostki poprzeczne aktyny i miozyny, jak i pasywnie przez elementy strukturalne sarkomeru, jest wykrywane przez wyspecjalizowane sensory komórkowe [24]. Warto zaznaczyć, że siła bodźca nie musi prowadzić do mikrourazów, aby stymulować wzrost. Kluczowe za to jest odkształcenie cytoszkieletu, które inicjuje kaskady sygnałowe prowadzące do zwiększenia syntezy białek miofibrylarnych (MPS) i biogenezy rybosomów [24].

Fundamentalnym elementem procesu hipertrofii jest zjawisko wspomnianej wcześniej mechanotransdukcji, które zachodzi w strategicznych punktach komórki mięśniowej, takich jak kostamery oraz linia Z sarkomeru. Kostamery jako kompleksy białkowe zakotwiczone w błonie komórkowej pełnią funkcję molekularnych mostów łączących macierz zewnątrzkomórkową

(ECM) z wnętrzem włókna [25]. Kluczową rolę odgrywają tutaj integryny, które pod wpływem obciążenia mechanicznego aktywują kinazę ogniskową (FAK). Aktywacja FAK uruchamia szereg szlaków wewnątrzkomórkowych, w tym szlak kinazy fosfatydyloinozytolu-3 (PI3K) oraz kinaz aktywowanych mitotycznie (MAPK), co bezpośrednio wpływa na stabilność cytoszkieletu i translację białek [26]. Równolegle wewnątrz sarkomeru białko tytyna funkcjonuje jako wewnątrzkomórkowa „sprężyna” i sensor mechaniczny. Badania sugerują, że domena kinazowa tytyny jest aktywowana poprzez napięcie mechaniczne działające na sarkomery w rozciągniętej pozycji podczas skurczu miofibrilarnego, co może przekładać się na sygnały anaboliczne i w konsekwencji tego prowadzić do przyrostów masy mięśniowej [26]. Centralnym węzłem integrującym hipertroficzne sygnały mechaniczne jest kompleks mTORC1 (*mechanistic Target of Rapamycin Complex 1*) (Ryc. 3).



Rycina 3. Schemat szlaku syntezy białek związanych z kompleksem mTORC1 [26]

Mimo tego, że przez lata uważano, że jego aktywacja zależy głównie od czynników hormonalnych, obecnie wiadomo, że napięcie mechaniczne może aktywować mTORC1 w sposób od nich niezależny [26]. Kluczowym mediatorem jest tutaj kwas fosfatydowy (PA), lipidowy przekaźnik drugiego rzędu, którego stężenie wzrasta w odpowiedzi na skurcz mięśnia dzięki aktywności kinazy diacyloglicerolu. PA wiąże się bezpośrednio z domeną FRB (*FKBP-Rapamycin-Binding*) białka mTOR, wypierając jego inhibitory i umożliwiając fosforylację efektorów translacji, takich jak kinaza p70S6K1 oraz białko 4E-BP1. Oprócz kanonicznego szlaku mTOR coraz większą uwagę badaczy przykuwa szlak Hippo oraz jego efekторы

transkrypcyjne YAP (*Yes-associated protein*) i TAZ [25]. W warunkach spoczynku białka te są degradowane, jednak pod wpływem napięcia mechanicznego i sztywności macierzy zewnątrzkomórkowej ulegają defosforylacji i translokacji do jądra komórkowego. Tam, działając jako koaktywatory transkrypcji, promują ekspresję genów odpowiedzialnych za proliferację komórek i wzrost tkanki, stanowiąc mechanizm komplementarny do szlaku mTOR [26].

Z praktycznego punktu widzenia implikacje tych mechanizmów molekularnych znajdują odzwierciedlenie w zasadach doboru optymalnych obciążeń treningowych. Aby wywołać najwyższą odpowiedź hipertroficzną konieczne jest wygenerowanie wysokiego napięcia mechanicznego we włóknach wysokoprogowych (typu II), które posiadają największy potencjał wzrostu [27]. Zgodnie z zasadą wielkości Hennemana rekrutacja tych jednostek wymaga albo zastosowania dużych obciążeń zewnętrznych, albo wykonywania serii z mniejszym obciążeniem do momentu bliskiego upadkowi mięśniowemu. Wskutek tych bodźców wymuszane jest zaangażowanie pełnego spektrum włókien w miarę narastania zmęczenia. Najnowsze analizy, w tym metaregresja z 2024 roku, wskazują jednak na nieliniową zależność między powtórzeniami do upadku a hipertrofią [27]. Oznacza to, że trening blisko upadku mięśniowego, w zakresie 1–3 RIR (*Reps In Reserve* – powtórzenia do upadku mięśniowego, definiowanego jako niemożność wykonania kolejnego pełnego powtórzenia z poprawną techniką mimo maksymalnego wysiłku) pozwala maksymalizować zaangażowanie włókien mięśniowych [27]. Jednocześnie korzyści wynikające z doprowadzania każdej serii do całkowitego upadku mięśniowego (0 RIR) mogą być nieproporcjonalnie małe względem generowanego zmęczenia ośrodkowego i uszkodzeń mięśni. Nadmierne nagromadzenie wspomnianych mikrourazów może utrudniać regenerację, a w konsekwencji ograniczać przyrosty masy mięśniowej. Tym samym napięcie mechaniczne należy rozpatrywać jako bodziec, który musi być precyzyjnie dawkowany – wystarczająco silny, by przekroczyć próg aktywacji sensorów mechanicznych, ale nie tak destrukcyjny, by przekroczyć możliwości regeneracyjne tkanki [27].

### **1.2.3 Rola układu nerwowego i hormonalnego**

Adaptacja organizmu do treningu oporowego jest procesem wielopłaszczyznowym. Wymaga ścisłej koordynacji pomiędzy układem nerwowym, inicjującym ruch, a układem hormonalnym, który moduluje środowisko metaboliczne włókien mięśniowych. Współczesna fizjologia wysiłku odchodzi od postrzegania tych układów jako oddzielnych bytów, wskazując na ich synergistyczne działanie w procesie rozwoju siły i hipertrofii [28]. W początkowych

fazach treningu, szczególnie u osób nietreningujących, dominującą rolę odgrywają adaptacje neuronalne, które odpowiadają za gwałtowny przyrost siły jeszcze przed wystąpieniem znaczących zmian fizjologicznych w tkance mięśniowej. Badania z wykorzystaniem elektromiografii wysokiej rozdzielczości (HD-EMG) potwierdzają, że wzrost maksymalnej siły wolicjonalnej (MVF) – obserwowany na poziomie 7% (po 4 tygodniach) do 10% (po 8 tygodniach) w mięśniach nietreningowanych (efekt krzyżowy) oraz 11% (4 tyg.) do 19% (8 tyg.) w mięśniach treningowanych – jest silnie skorelowany ze zmianami w układzie nerwowym [28]. Kluczowym mechanizmem jest tutaj obniżenie progu rekrutacji jednostek motorycznych, co pozwala na wcześniejsze i bardziej efektywne włączanie do pracy wysokoprogowych, szybko kurczliwych włókien typu II, które dysponują największym potencjałem siłowym [28].

Równie istotnym parametrem adaptacyjnym jest zmiana charakterystyki wyładowań motoneuronów, określana jako częstotliwość sygnałów (*firing rate*). Badania wykazują, że bardziej zaawansowani sportowcy potrafią generować siłę submaksymalną z mniejszym zaangażowaniem włókien mięśniowych co sugeruje, że wytrenowane mięśnie wymagają mniejszej liczby motoneuronów lub niższej częstotliwości sygnałów by wyprodukować tą samą siłę całkowitą [29]. Ta wydajność prowadzi do większej wytrzymałości i mniejszego wyczerpania mięśniowego w kontekście treningu oporowego. Ćwiczenia siłowe prowadzą również do polepszenia koordynacji między parami mięśni działającymi przeciwstawnie na zasadzie agonista-antagonista, co skutkuje bardziej precyzyjną alokacją wyprodukowanej siły [29]. Przykładowo, u wytrenowanych sportowców podczas wykonywania ćwiczenia, które angażuje głównie mięsień agonistyczny, np. uginanie na biceps, aktywacja agonisty (bicepsa) jest wysoka, podczas gdy aktywacja antagonisty (tricepsa) pozostaje minimalna. Pozwala to na bardziej wydajną transmisję siły. Z drugiej strony, osoby nietreningujące często napinają mięśnie antagonistyczne nieintencjonalnie, zmniejszając wydajność oraz zwiększając wydatek energetyczny [29].

Z punktu widzenia układu hormonalnego, tradycyjne paradygmaty łączące ostre, powysiłkowe wyrzuty hormonów anabolicznych takich jak testosteron (T) lub hormon wzrostu (GH) bezpośrednio z hipertrofią mięśniową uległy w ostatnich latach znaczącej rewizji. Choć intensywny trening oporowy, wywołujący duży stres metaboliczny, potrafi sprokurować wielokrotny wzrost stężenia GH i T to dowody wskazują na małe znaczenie tych krótkotrwałych fluktuacji w kontekście stymulacji syntezy białek mięśniowych [30]. Trzeba zaznaczyć również, że metaanalizy z ostatnich lat wskazują na znikomy wpływ treningu oporowego na poziomy całkowitego i wolnego testosteronu u zdrowych mężczyzn. Oznacza

to, że sam trening, mimo ostrych wyrzutów hormonalnych tuż po wysiłku, nie podnosi trwale testosteronu w sposób znaczący farmakologicznie, chyba że towarzyszy mu redukcja nadmiernej tkanki tłuszczowej [31].

W kontekście hipertrofii kluczowa wydaje się rola permissywna hormonów (ich obecność umożliwia wzrost mięśni, ale nie jest jego bezpośrednią przyczyną) oraz ich działanie lokalne – autokryne i parakryne (np. mechaniczny czynnik wzrostu MGF, pochodna IGF-1 (*Insulin-like Growth Factor-1*) [32]. Potwierdzeniem ograniczonej roli systemowego testosteronu w procesie samej hipertrofii są badania porównawcze kobiet i mężczyzn. Mimo drastycznie niższego stężenia androgenów u kobiet (10–20-krotnie mniej niż u mężczyzn), są one w stanie osiągać zbliżone względne przyrosty masy i siły mięśniowej w odpowiedzi na identyczny bodziec treningowy [30]. Sugeruje to, że mechanizmy wewnątrzkomórkowe i wrażliwość receptorów androgenowych mogą kompensować różnice w stężeniach krążących hormonów. W obliczu nowych wyników badań naukowcy wysunuli tzw. hipotezę receptorową, która zakłada, że to nie ilość hormonów, ale gęstość i wrażliwość receptorów androgenowych w tkance mięśniowej determinują odpowiedź anaboliczną. Badania nad tym założeniem wykazały silną korelację pomiędzy zawartością receptorów androgenów w mięśniu a siłą maksymalną przez niego produkowaną. Co więcej, sam trening oporowy działa jako bodziec do zwiększenia liczby receptorów androgenowych [33]. Oznacza to, że regularny trening uwrażliwia mięśnie na działanie testosteronu, pozwalając na efektywniejsze wykorzystanie fizjologicznych stężeń tego hormonu. Zjawisko to tłumaczy również fenomen ogromnie zwiększonych przyrostów podczas podawania sterydów anaboliczno-androgennych i uprawiania ćwiczeń siłowych, gdzie trening zwiększa liczbę receptorów, a farmakologia dostarcza nadmiar liganda.

Kolejnym błędnym przeświadczeniem, które dalej panuje w niektórych kręgach, jest całkowita demonizacja kortyzolu jako hormonu “zjadającego mięśnie”. Badania wskazują jednak, że w kontekście intensywnego wysiłku fizycznego jego wyrzut jest absolutnie niezbędny dla kontynuacji pracy mięśniowej. W odpowiedzi na wysiłek, z kory nadnerczy uwalniane są glukokortykoidy, które mobilizują substraty energetyczne poprzez stymulację lipolizy w tkance tłuszczowej oraz glukoneogenezy w wątrobie. Ponadto wyniki badań sugerują, że przejściowe, gwałtowne podniesienie poziomu kortyzolu może być nieznacznie, lecz pozytywnie skorelowane z hipertrofią włókien typu II [33]. Może to wynikać z faktu, że duży wyrzut kortyzolu świadczy o wysokiej intensywności treningu, co stanowi silny bodziec adaptacyjny. Kolejno, można stwierdzić, że ostra odpowiedź kortyzolu jest markerem

intensywności wysiłku, a niekoniecznie sygnałem prowadzącym do atrofii mięśniowej [33]. Mimo tego nie można stwierdzić, że kortyzol ma jednoznacznie pozytywny wpływ na adaptacje hipertroficzne, a stosunek testosteron: kortyzol pozostaje ważnym biomarkerem w procesie monitorowania obciążenia treningowego. Spadek tego stosunku o więcej niż 30% jest uznawany za wskaźnik stanu przetrenowania, który prowadzi do negatywnych efektów zdrowotnych, takich jak zaburzenia snu lub zwiększone ryzyko sercowo-naczyniowe [34]. Trzeba wspomnieć również o wpływie spożycia składników odżywczych takich jak węglowodany i białka na odpowiedź hormonalną organizmu podczas treningu oporowego. Paradoksalnie, posiłek przed lub w trakcie treningu może znacząco zmniejszyć ostry wyrzut testosteronu i kortyzolu, jednocześnie podnosząc poziom insuliny. Zgodnie ze starymi założeniami taki stan byłby niekorzystny, jednak w obliczu nowych badań, dostępność aminokwasów i glukozy prowadzi do lepszej syntezy białek mięśniowych w dłuższym okresie czasu. Wyniki te ponownie wskazują na fakt, iż krótkotrwałe zmiany stężeń hormonów we krwi są mniej istotne niż dostępność substratów budulcowych i aktywacja szlaków mTOR [30].

### **1.3 Metody treningu oporowego ukierunkowane na hipertrofię**

Maksymalizacja hipertrofii w treningu oporowym jest problemem, z którym od wielu lat zmagają się zarówno trenerzy, jak i badacze próbujący opracować najskuteczniejszy program treningowy. Przez wiele lat metody treningowe opierały się głównie na dowodach anegdotycznych i wiedzy praktycznej starszych zawodników, co przekładało się na suboptymalne wyniki. Dopiero od niedawna zaczęto kłaść większy nacisk na podejście naukowe i opracowywanie planów treningowych w zależności od wyników najnowszych badań [35]. Przez długi czas funkcjonował tzw. mit zakresu powtórzeń, zgodnie z którym maksymalną odpowiedź hipertroficzną organizmu można osiągnąć wyłącznie w zakresie 8–12 powtórzeń. Nowoczesne dowody naukowe rygorystycznie weryfikują panujące paradygmaty, jednoznacznie wskazując na to, że wysoki bodziec hipertroficzny może być wywołany w niezwykle szerokim spektrum powtórzeń, używając obciążenia na poziomie  $\geq \sim 30\%$  1 RM (*Rep Maximum* - Obciążenie maksymalne) [35]. Warunkiem kluczowym do stymulacji wzrostu tkanek mięśniowych jest wykonywanie serii z odpowiednio wysokim stopniem wysiłku, zbliżonym do upadku mięśniowego, z uwagi na rekrutację wysokoprogowych jednostek motorycznych. Z praktycznego punktu widzenia, wykonywanie serii przy użyciu niskich obciążeń ( $<60\%$  RM) i bardzo wysokich powtórzeń, może być detrymentalne, ponieważ prowadzi do zakwaszenia metabolicznego i utrudnienia procesów regeneracyjnych [35].

Niezmiernie istotną zmienną, którą należy wziąć pod uwagę podczas planowania treningu oporowego jest również tygodniowa objętość treningowa. W przeszłości często używano podejścia, które zakładało równomierny wzrost hipertrofii łącznie z objętością treningową, co skutkowało bardzo wysoką ilością tygodniowych serii. W dzisiejszych czasach badacze stopniowo odchodzą od tego przekonania, zaznaczając, że chociaż pewna dawka objętości treningowej jest kluczowa by stymulować hipertrofię to zbyt duża ilość serii prowadzi do zmęczenia ośrodkowego i obwodowego, tym samym zmniejszając skuteczność treningu [36]. Panujący obecnie konsensus zakłada, że 12-20 ciężkich serii na daną partię mięśniową w skali tygodnia przynosi najlepsze rezultaty, ponieważ zapewnia odpowiedni bodziec i nie powoduje nadmiernego zmęczenia układu nerwowego [36]. Prawidłowy rozkład serii w tygodniu jest również wysoce istotny, gdyż dużo lepsze rezultaty osiągnie się poprzez rozdzielenie objętości treningowej danej grupy mięśniowej na 2-3 dni w tygodniu, niż wykonywanie wszystkich serii jednego dnia [36].

Praktyczna optymalizacja pozostałych zmiennych treningowych wymaga stanowczego odejścia od dążenia do skrajnego wyczerpania metabolicznego na rzecz utrzymania wysokiej jakości napięcia mechanicznego w każdej serii. Obecne wyniki badań potwierdzają, że wydłużone przerwy spoczynkowe (powyżej 60–90 sekund, a w ćwiczeniach wielostawowych nawet od 2 do 3 minut) są znacznie korzystniejsze, ponieważ umożliwiają resyntezę układu fosfagenowego i zachowanie pożądanej objętości roboczej w kolejnych seriach [37]. Co więcej, ruch powinien być wykonywany z pełną kontrolą fazy ekscentrycznej w maksymalnym, bezpiecznym zakresie ruchu, ze szczególnym uwzględnieniem obciążenia mięśnia w pozycji jego skrajnego rozciągnięcia, co dodatkowo stymuluje miogenezę poprzez niezależne od mostków poprzecznych ścieżki mechanotransdukcji [38]. Równocześnie stanowczo odradza się stosowanie intencjonalnie spowolnionego tempa skurczu (np. powyżej 10 sekund na powtórzenie), które drastycznie redukuje siłę i stopień rekrutacji włókien szybko kurczliwych [38]. Jednakże najbardziej kluczową zmienną, którą zawsze trzeba brać pod uwagę podczas programowania treningowego jest periodyzacja, która zakłada stopniowe zwiększanie napięcia mechanicznego poprzez używanie większych obciążeń lub objętości treningowej [38].

## **1.4 Periodyzacja w treningu oporowym**

Periodyzacja, definiowana jako systematyczne manipulowanie zmiennymi treningowymi (objętość, intensywność, częstotliwość), jest kluczowa w procesie optymalizacji adaptacji nerwowo-mięśniowych. Programy, w których zastosowano schemat periodyzacji, bezspornie generują wyższe przyrosty siły maksymalnej, masy mięśniowej i wytrzymałości

[39]. Analiza porównawcza dwóch najpopularniejszych metod periodyzacji treningowej (LP – *Linear Periodization* - periodyzacja liniowa, DUP - *Daily Undulating Periodization* - periodyzacja falowa) wykazuje niemal identyczną skuteczność (standaryzowana różnica średnich Cohen's  $d = -0.02$ ). Zarówno stopniowy wzrost obciążeń przy jednoczesnym ograniczeniu objętości, jak i częste rotacje bodźców przynoszą silnie korzystne efekty w kontekście treningu oporowego. Średnia wzrostu hipertrofii wynosiła  $3.9\% \pm 3.0\%$  dla LP oraz  $5.1\% \pm 4.2\%$  dla DUP [40]. W świetle tych wyników można stwierdzić, iż głównymi zmiennymi wpływającymi na syntezę białek mięśniowych w procesie periodyzacji są całkowita objętość robocza i progresywne przeładowanie, a nie sam układ mikrocykli.

Poza oczywistymi zastosowaniami periodyzacji w treningu zarówno zawodowych, jak i amatorskich sportowców, istnieją również korzyści, które z wymienionych wyżej modeli mogą czerpać osoby zmagające się z problemami zdrowotnymi. Zarówno model periodyzacji liniowej, jak i falowej poprawił u badanych lipidogram, pomógł w regulacji glukozy we krwi oraz wpłynął korzystnie na gospodarkę insulinową [41].

## **1.5 Regeneracja i superkompensacja**

### **1.5.1 Fizjologiczny proces regeneracji i zjawisko superkompensacji**

Proces regeneracji po intensywnym treningu oporowym jest z fizjologicznego punktu widzenia wysoce zintegrowanym, wielosystemowym mechanizmem, podczas którego następuje przejście organizmu ze stanu dominującego katabolizmu w etap anabolizmu. Niezbędną zmienną w tym czasie jest dostępność egzogennych substratów energetycznych, które z perspektywy biochemicznej służą do zahamowania powysiłkowej proteolizy, złagodzenia reakcji zapalnej oraz odnowy rezerwuarów energetycznych [42]. Największą skuteczność w odnawianiu zapasów glikogenu mięśniowego obserwuje się natychmiast po zakończeniu treningu. W takim przypadku tempo resyntezy zapasów wynosi od 6 do  $8 \text{ mmol} \cdot \text{kg}^{-1} \cdot \text{h}^{-1}$ , jednakże w przypadku opóźnienia podaży suplementu, tempo syntezy jest aż o 50% mniejsze [42]. Tak istotne zmiany w regeneracji wynikają z potreningowej podwyższonej wrażliwości mięśni na insulinę, co skutkuje większym potencjałem ogólnoustrojowym do wchłaniania glukozy. W przypadku stosowania suplementów wyłącznie węglowodanowych najlepsze efekty regeneracyjne obserwuje się stosując podaż węglowodanów na poziomie 1.2 - 1.5 g/kg masy ciała (m.c.). Jednakże efektywność magazynowania zapasów glikogenu mięśniowego może zostać dodatkowo zmaksymalizowana poprzez dodatek białka do suplementu potreningowego. Zastosowanie mieszanki 0.8 g/kg m.c. węglowodanów łącznie z 0.2 g/kg m.c. białka wykazuje lepsze efekty poprzez poprawę syntezy

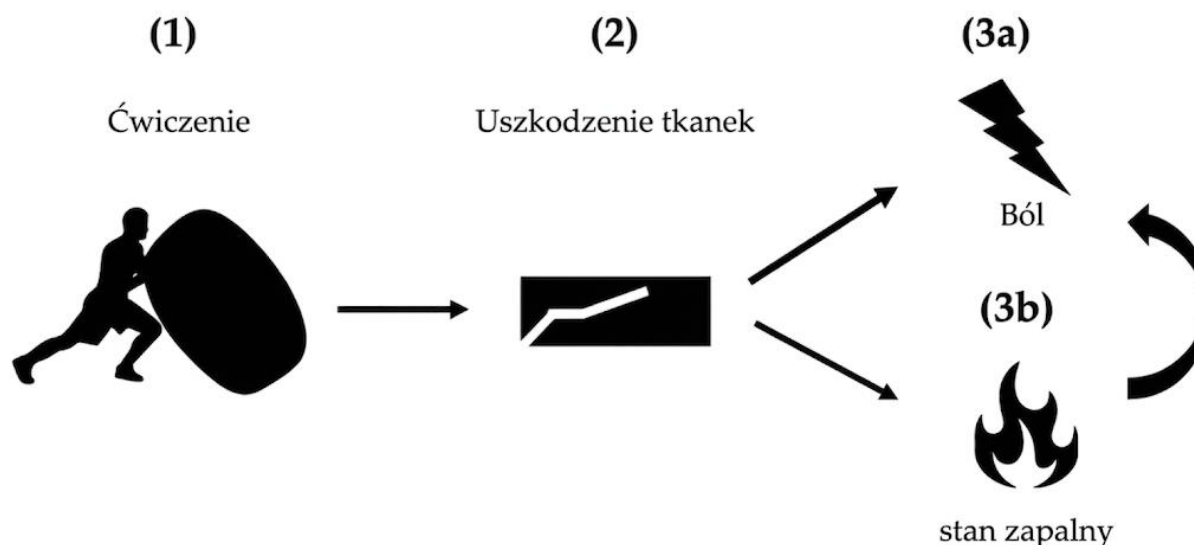
glikogenu, minimalizowanie potreningowych uszkodzeń mięśniowych oraz zwiększenie przyrostu białek mięśniowych [42]. Przedstawione korzystne efekty wynikają z podwyższonej odpowiedzi hormonalnej oraz zwiększenia stężenia aminokwasów w osoczu, co łącznie z wyrzutem insuliny bezpośrednio inicjuje syntezę białek mięśniowych i procesy naprawcze uszkodzonych sarkomerów [42]. Istotną zmienną, którą należy wziąć pod uwagę podczas wybierania suplementu służącego do regeneracji potreningowej, jest typ węglowodanów w nim zawartych. Natychmiast po treningu większą skuteczność wykazują węglowodany z wysokim indeksem glikemicznym, stymulując większe poziomy resyntezy glikogenu przez 24 godziny po zakończeniu wysiłku, w porównaniu z węglowodanami o niskim indeksie glikemicznym [43]. Co więcej, badania wykazują, że fruktoza w porównaniu z glukozą i sacharozą, w mniejszym stopniu stymuluje wydzielanie insuliny, co w konsekwencji prowadzi do zmniejszonej resyntezy glikogenu mięśniowego. Wynika to z preferencyjnego używania fruktozy przez organizm do resyntezy glikogenu wątrobowego [43]. Należy również podkreślić, że czas wymagany na regenerację organizmu w następstwie treningu oporowego zależy w znacznej mierze od intensywności oraz objętości wykonywanych ćwiczeń [44]. Adekwatna alokacja czasu oraz substratów energetycznych w okresie regeneracji powysiłkowej jest kluczowa w kontekście maksymalizacji przyrostów siły, masy mięśniowej oraz prewencji urazów [44].

Zjawisko superkompensacji, rozumiane jako adaptacyjna nadbudowa struktur białkowych oraz rezerw energetycznych do pułapu przekraczającego homeostazę bazową organizmu, jest nadrzędnym celem większości osób wykonujących trening oporowy. Dzięki niemu sportowcy z każdą kolejną sesją treningową przygotowują swój ustrój na coraz intensywniejsze przeciążenia, tym samym poprawiając swoją wydolność, siłę oraz szeroko pojętą sprawność. Badania wykazały, że trening oporowy indukuje intensywny wzrost poboru glukozy przez trenowane mięśnie szkieletowe, zapewniając większy dostęp do energii podczas wysiłku [45]. Co więcej, zaobserwowano zjawisko, w którym wydłużona aktywacja AMPK podnosi wrażliwość tkanek na insulinę i prowadzi do fizycznego zwiększenia objętości granul glikogenu w obrębie trenowanych tkanek. Ponadto propaguje ona oksydację kwasów tłuszczowych, co pozwala wewnątrzkomórkowej glukozie na wzmożoną syntezę glikogenu ponad objętość bazową [45]. Niezwykle interesującym fenomenem jest również superkompensacja w obrębie ośrodkowego układu nerwowego (OUN). Badania na szczurach wykazały, że superkompensacja glikogenu zachodzi zarówno w mózgu, jak i w mięśniach szkieletowych w następstwie intensywnego wysiłku [46]. Wyniki sugerują, że im bardziej

spada poziom glikogenu w mózgu podczas treningu, tym większa skala superkompensacji po jego zakończeniu [46]. Zaobserwowano również wzrost bazowych stężeń glikogenu w hipokampie i korze mózgowej w wyniku intensywnego wysiłku [46]. Pomimo braku badań nad występowaniem analogicznych mechanizmów u ludzi, badacze są przekonani, że ludzki OUN odpowiada na trening oporowy w podobny sposób.

### 1.5.2 Fizjologia stanu zapalnego i objaw opóźnionej bolesności mięśniowej

Stan zapalny jest zjawiskiem, które przeważającej części populacji kojarzy się tylko i wyłącznie z negatywnymi mechanizmami, jednak w kontekście treningu oporowego jest on nieuniknioną konsekwencją, która prowadzi do przeróżnych adaptacji ustroju. Fizjologiczną odpowiedzią na uszkodzenie tkanek np. pod wpływem napięcia mechanicznego, jest stan zapalny (Ryc. 4). Jego konsekwencją jest produkcja cytokin - białek, wpływających na procesy przetrwania, rozmnażania i różnicowania komórek odpornościowych i innych systemów ustroju [47].



Rycina 4. Schematyczny model DOMS w odpowiedzi na trening oporowy, zmodyfikowano na podstawie [48]

Ostry stan zapalny, charakteryzujący się 2-3 krotnie podwyższonym stężeniem cytokin takich jak TNF- $\alpha$  (*Tumor Necrosis Factor- $\alpha$* ), IL-6 (*Interleukin-6*) i CRP (*C-Reactive Protein*), jest kluczową, lokalnie protekcyjną odpowiedzią na uraz tkanek [47]. Krótkoterminowa odpowiedź zapalna jest niezwykle istotna w procesie regeneracji, jednakże może być detrymentalna w perspektywie długoterminowego stanu zapalnego. Trening oporowy jest związany z istotnie niższym ryzykiem chorób wynikających z przewlekłego stanu zapalnego takich jak miażdżyca, otyłość, cukrzyca typu 2 lub insulinooporność [47]. Wynika to z jego pozytywnego wpływu na poziom bazowy cytokin TNF- $\alpha$  i IL-6 odpowiedzialnych za metabolizm glukozy. Istnieje również oddzielna grupa cytokin katalizująca hipertrofię

mięśniową, wskutek powtarzalnych odpowiedzi zapalnych organizmu. Należą do niej cytokiny IL-4, IL-4 $\alpha$ , IL-13 i IL-13 $\alpha$ , które działają poprzez promowanie formacji nowych miofibryli, co sprzyja regeneracji mięśniowej [47]. Co istotne, pozytywne działanie treningu oporowego na markery stanu zapalnego i odpowiedź organizmu jest obserwowane tylko wtedy, gdy przerwy regeneracyjne pomiędzy sesjami treningowymi są odpowiednio zaplanowane, jednak w przypadku zbyt krótkich przerw, efekt może być odwrotny od zamierzonego.

Zjawisko opóźnionej bolesności mięśniowej (*Delayed Onset Muscle Soreness* - DOMS) jest mechanizmem ściśle sprzężonym z odpowiedzią zapalną organizmu występującą w odstępie 24 - 72 godzin po epizodzie intensywnego wysiłku mięśniowego [48]. Charakterystyczne objawy to ból i sztywność mięśniowa w obszarach, które były poddane ćwiczeniom, a w szczególności skurczom ekscentrycznym. Istnieje wiele teorii próbujących wytłumaczyć ten fenomen, takich jak opóźniony stan zapalny, uszkodzenia strukturalne lub bardzo popularne i często przywoływane "zakwasy" czyli akumulacja kwasu mlekowego w obrębie trenowanego obszaru, jednak współczesne dowody naukowe redefiniują jego anatomiczne i fizjologiczne źródła. Badania wskazują na istotną rolę powięzi głębokiej, wysoce unerwionej tkanki łącznej, która poprzez działanie jako amortyzator mechaniczny podczas skurczów ekscentrycznych ulega licznym mikrouszkodzeniom oraz intensywnemu remodelingowi [48]. Powięź ta jest podatna na odkształcenia podczas napięcia mechanicznego mięśnia, ponieważ jest nierozzerwalnie związana z włóknami mięśniowymi poprzez strukturę podobną do plastra miodu. Tym samym zapewnia ona połączenie z innymi mięśniami ustawionymi równolegle lub szeregowo [48]. Według ostatnich badań to właśnie głęboka kolagenowa tkanka łączna była bardziej wrażliwa na ból, w porównaniu z tkanką mięśniową w okresie potreningowym [48].

Zjawisko DOMS może być wysoce problematyczne dla sportowców, obniżając ich sprawność, wytrzymałość lub technikę, tym samym zwiększając ryzyko kontuzji i przetrenowania. Prowadzone są badania nad modyfikacjami diety, które byłyby skuteczne w niwelowaniu wymienionych efektów. Jedną z substancji o udowodnionym efekcie łagodzącym DOMS jest kofeina, w przypadku której spożycie 5 mg/kg m.c. na 1 godzinę przed treningiem działa korzystnie na objawy potreningowe, zmniejszając bolesność i sztywność mięśniową [49]. Kolejnym suplementem o obiecującym działaniu hamującym objawy są kwasy tłuszczowe omega-3, a w szczególności kwas eikozapentaenowy (EPA) i dokozaheksaenowy (DHA), które po spożyciu powodują spadek stężeń cytokin prozapalnych IL-6, TNF- $\alpha$  i CRP [49]. Najbardziej efektywną dawką mającą na celu limitowanie efektów DOMS jest

1.8 – 3 g kwasów tłuszczowych omega-3 po treningu. Korzystne efekty przynosiło również spożywanie tauryny i polifenoli, które wykazywały pozytywne działanie w zakresie niwelowania stresu oksydacyjnego [49].

### **1.5.3 Rola snu i rytmu dobowego**

Niezaprzeczalnie kluczowym elementem w procesie regeneracji jest sen. Stanowi on biologiczny fundament optymalizacji mechanizmów regeneracyjnych i adaptacyjnych w treningu oporowym. Podczas fazy snu głębokiego (N3) obserwuje się wyrzut hormonu wzrostu, testosteronu oraz IGF-1, hormonów niezbędnych do procesu naprawy tkanek, syntezy białek i hipertrofii [50]. Nawet jedna noc bez snu potrafi zmniejszyć poziom testosteronu o 25%, a jego przewlekły niedobór promuje dominację kataboliczną i zakłóca regulację kortyzolu, co wpływa negatywnie na regenerację [50]. Ponadto podczas fazy drugiej NREM (*Non-Rapid Eye Movement*) zachodzą istotne zmiany w mózgu, które wpływają na poprawę zdolności motorycznych i technik sportowych. Deprywacja snu pogarsza skupienie, spowalnia czas reakcji oraz obniża koordynację ruchową, tym samym mając detrymentalny wpływ na wyniki sportowe [50]. Na poziomie somatycznym sen jest najważniejszym okresem regeneracyjnym dla ciała i to właśnie podczas snu głębokiego intensyfikują się procesy naprawy mięśniowej oraz syntezy białek, a zapasy energii w postaci glikogenu są uzupełniane [50]. Co istotne, sen również bierze udział w regulacji systemu odpornościowego, wspomagając produkcję przeciwzapalnych cytokin, a jego niedobór prowadzi do wzrostu markerów stanu zapalnego takich jak IL-6 i CRP [50]. W konsekwencji niedobór snu prowadzi do częstszych urazów mięśni szkieletowych w przypadku młodych sportowców, a u profesjonalistów objawia się zmniejszeniem efektywności treningowej i wydłużeniem czasu powrotu do szczytowej formy. Przez wzgląd na przedstawione informacje, oczywistym wydaje się, że maksymalizowanie efektywności snu jest kluczowe dla poprawy lub utrzymania zdolności sportowej. Czynniki wpływające na jakość snu to m.in. długie podróże, poziom stresu, ekspozycja na urządzenia elektroniczne oraz dieta [50]. Istotnymi parametrami są czas spożywania posiłków, ich kompozycja oraz suplementacja. Zaburzenia w rytmie karmienia indukują desynchronizację peryferyjnych zegarów biologicznych, co prowadzi do zaburzeń homeostazy glukozowej i lipidowej, deregulacji hormonów oraz podwyższenia systemowej odpowiedzi zapalnej. Korzystny wpływ na sen może mieć spożywanie pokarmów bogatych w tryptofan i węglowodany złożone, ponieważ zwiększają one produkcję melatoniny - hormonu odpowiedzialnego za regulację snu [50]. Z badań wynika, że dieta śródziemnomorska, bogata w błonnik, witaminy z grupy B, magnez i cynk, wpływa pozytywnie na jakość snu [50].

Przeciwny efekt ma stosowanie diety zachodniej, bogatej w przetworzone produkty, cukry proste i tłuszcze nasycone, które pogarszają jakość snu poprzez promowanie procesów zapalnych [50].

Spożywanie kofeiny jest niezwykle popularne u sportowców z uwagi na jej działanie pobudzające. Raporty wykazują, że nawet do 90% uczestników zażywa ją przed lub w trakcie zawodów [50]. Z wyników badań można natomiast wyczytać, że przyjmowanie napojów z dużą zawartością kofeiny związane jest z obniżeniem jakości snu i występowaniem nieregularnego oddechu [50]. Sportowcy są również grupą szczególnie narażoną na niedobory wielonienasyconych kwasów tłuszczowych omega-3, które mogą być absolutnie detrymentalne dla wyników sportowych. Ich niedobór powoduje spadek wytrzymałości, siły mięśniowej, regeneracji oraz jakości snu [50]. Szczególnie istotne są kwasy EPA i DHA, które bogato występują w tłustych rybach [50].

Ustalonym zakresem, który wydaje się być najbardziej optymalny dla pełnej regeneracji w przypadku sportowców jest 9-10 godzin pełnego snu [50]. Problemem pozostaje fakt, iż wielu sportowców nie jest w stanie poświęcić odpowiedniego czasu na sen, w wyniku obowiązków oraz licznych treningów, co w długiej perspektywie prowadzi do wyczerpania i kontuzji [50]. Łącznie z czasem trwania i jakością snu, bezsprzecznie kluczowym elementem umożliwiającym sportowcom odpowiednią regenerację jest stabilny rytm okołodobowy. Mechanizm ten jest precyzyjnie zarządzany za pomocą wewnątrzkomórkowych pętli sprzężeń zwrotnych, w których centralną rolę odgrywają białka zegarowe BMAL1 oraz CLOCK [51]. W mięśniach szkieletowych występują również peryferyjne zegary, których głównym zadaniem jest koordynowanie aktywności i zdolności do proliferacji komórek satelitarnych, obrotu białek mięśniowych oraz funkcji mitochondriów [51]. Zaburzenia tego systemu wynikające z przekraczania licznych stref czasowych lub dezorganizacji snu prowadzą do desynchronizacji wewnętrznej, co bezpośrednio upośledza tempo regeneracji. Warto zaznaczyć, iż rytm dobowy człowieka nie zależy tylko i wyłącznie od czynników wewnętrznych; jest on również wysoce responsywny na sygnały środowiskowe tzw. *zeitgebers*, które mają istotny wpływ na sen [51]. Najbardziej efektywny *zeitgeber* to światło, jednak w przeciągu ostatnich lat poświęcono sporo uwagi innym bodźcom takim jak wysiłek fizyczny lub pory przyjmowania posiłków [51]. Sesje treningowe wykonywane regularnie o stałych porach potrafią skutecznie synchronizować lokalne zegary peryferyjne, tym samym optymalizując odpowiedź na bodziec hipertroficzny. Wykorzystywanie założeń chrono-ćwiczeń, rozumianych jako dopasowanie cięższych jednostek treningowych do godzin

popołudniowo-wieczornych, gdy temperatura głęboka ciała jest najwyższa, wykazuje obiecujące efekty w leczeniu i zapobieganiu sarkopenii u osób starszych [51]. Efekt ten jest dodatkowo spotęgowany poprzez równoczesne wdrożenie założeń chronożywienia, rozumianych jako strategiczne okresy podawania białka w zgodzie z rytmem dobowym [51].

#### **1.5.4 Regeneracja aktywna i pasywna**

Od wielu lat powszechnie znany jest fakt, iż należyta regeneracja pomiędzy seriami ćwiczeń podczas jednostki treningowej jest kluczowa dla podtrzymania najwyższego poziomu sprawności. Rzadko eksplorowanym tematem są jednak różnice w typach regeneracji stosowanej przez sportowców, którzy dążą do maksymalizacji efektywności treningowej. Główne typy regeneracji stosowane podczas jednostki treningowej to regeneracja pasywna (PR) i regeneracja aktywna (AR). Hipoteza, która została zaproponowana w ostatnich latach twierdzi, że akumulacja kwasu mlekowego w obrębie tkanki mięśniowej wykonującej pracę wpływa negatywnie na wydajność fizyczną poprzez upośledzenie glikolizy i procesu skurczu mięśni [52]. Z uwagi na te doniesienia przeprowadzono badanie porównujące wpływ AR i PR na akumulację kwasu mlekowego i efektywność treningową. Jako PR zastosowano odpoczynek w pozycji siedzącej, natomiast sportowcy stosujący AR wykonywali między seriami lekkie ćwiczenie „*bench step*” [52]. Co ciekawe, wyniki wskazują na brak różnicy pomiędzy grupami w kategoriach maksymalnej liczby powtórzeń i generowanej siły podczas wykonywania ćwiczeń, pomimo istotnego statystycznie wyższego stężenia kwasu mlekowego podczas PR w porównaniu do AR [52]. Biorąc pod uwagę przedstawione rezultaty, na obecną chwilę nie można jednoznacznie stwierdzić, że jeden typ regeneracji pomiędzy seriami ćwiczeń w danej jednostce treningowej jest skuteczniejszy od drugiego.

#### **1.5.5 Zjawisko przetrenowania**

Biorąc pod uwagę przetrenowanie, kluczowe jest rozróżnienie trzech odrębnych typów tego zjawiska. *Functional Overreaching* (FOR) jest mechanizmem zachodzącym po zwiększeniu obciążenia treningowego, co prowadzi do wyczerpania i tymczasowego obniżenia wydolności fizycznej [53]. Jeśli wdrożona zostanie odpowiednia regeneracja oraz dieta, wyczerpanie to może zostać zastąpione mechanizmem superkompensacji i pozytywnymi adaptacjami [53]. Jednakże, w przypadku ciągłego wysokiego obciążenia treningowego, z niewystarczającą regeneracją po intensywnych sesjach wysiłku fizycznego, wyczerpanie się nawarstwia i prowadzi do długoterminowych spadków formy sportowej [53]. Ten stan określany jest mianem *Non-functional Overreaching* (NFOR), który w ekstremalnych i wydłużonych przypadkach może przekształcić się w *Overtraining Syndrome* (OTS) [53].

Obecnie, przetrenowanie w treningu oporowym jest tematem znacznie mniej przebadanym niż to samo zjawisko w treningu wytrzymałościowym. Na ten moment nie opracowano innych narzędzi diagnostycznych służących do rozpoznania podanych przypadłości poza spadkiem wyników sportowych [53]. W świetle obecnych dowodów, jedyne co można stwierdzić to fakt, iż częste, monotonne treningi z wysoką intensywnością skutkują większą podatnością na kontuzje [53]. Z tego powodu kluczowe jest zindywidualizowane podejście do treningu każdego sportowca, który chce utrzymać szczytową formę przez dłuższy okres. Praktyczne podejście bazujące na dotychczasowych wynikach z włączoną autoregulacją kolejnych sesji wydaje się skuteczniejsze niż ustalone z góry plany zakładające stopniową periodyzację w ściśle określonych odstępach czasu [54]. W przypadku bardziej zaawansowanych sportowców, efektywne wydaje się podejście bazujące na skoncentrowaniu się ściśle na trwającej jednostce treningowej i ustalanie obciążenia w oparciu o skalę RIR i RPE (*Rate of Perceived Exertion*, rozumiane jako subiektywna ocena ćwiczącego dotycząca intensywności serii w skali od 1 do 10) [54]. Taki model treningowy zapewnia odpowiedni poziom intensywności przy każdej jednostce treningowej, jednocześnie działając zapobiegawczo w kontekście NFOR.

## **1.6 Wpływ podaży makroskładników na efektywność treningową**

### **1.6.1 Białko**

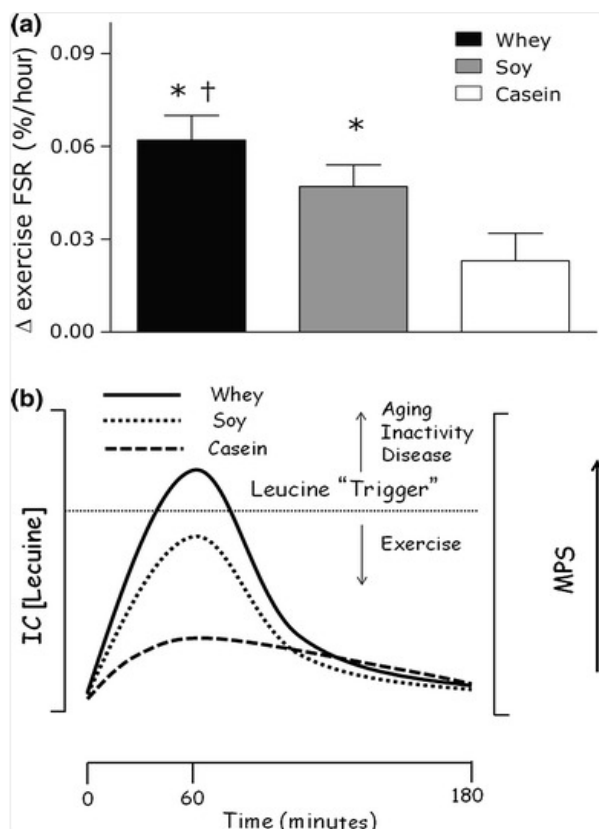
Całkowita masa mięśni szkieletowych jest w dużej mierze determinowana przez utrzymanie dodatniego bilansu białkowego netto (NPB) [55]. Do osiągnięcia takiego stanu kluczowe jest utrzymanie wysokiego poziomu syntezy białek przy równoczesnym ograniczeniu ich rozpadu, co jest możliwe poprzez stymulację mięśni szkieletowych za pomocą bodźca mechanicznego oraz indukowania hiperaminokwasemii poposiłkowej odpowiednią dietą [55]. Wskutek spełnienia tych dwóch wymagań zachodzi proces hipertrofii mięśniowej i adaptacje do treningu oporowego. Najwyższy wzrost syntezy białek mięśniowych można zaobserwować w okresie od 1 do 4 godzin po posiłku zawierającym białko. Jest ona wtedy podwyższona o 30-100% w zależności od zawartości aminokwasów egzogennych (EAA) [56]. Z drugiej strony, w stanie głodu MPS jest obniżona, a bilans białkowy organizmu jest ujemny i nie zmienia się powyślikowo, co wynika z obniżonego stężenia aminokwasów egzogennych w osoczu [56]. Wrażliwość mięśni szkieletowych na efekty białka jest podwyższona do 24 godzin po jednostce treningowej; wówczas kluczowe jest dostarczenie odpowiedniej ilości białka i kalorii potrzebnych do odbudowy uszkodzonych włókien mięśniowych [56]. Niektóre źródła donoszą o skuteczności spożycia mieszanki aminokwasów egzogennych z węglowodanami przed sesją

treningową, co wpływa pozytywnie na syntezę białek i minimalizuje ich degradację, jednak są potrzebne dalsze badania w tym obszarze by dojść do jednoznacznej konkluzji [56].

Obecne zalecenia dotyczące konsumpcji białka dla ogólnej populacji wynoszą 0.8 g/kg m.c., jednak wielokrotnie udowodnione zostało, że liczba ta jest znacząco za mała dla sportowców [56]. Dzielne zapotrzebowanie na białko uzależnione jest m.in. od objętości treningowej, wieku, składu ciała lub całkowitej podaży energii i powinno być indywidualizowane dla każdego sportowca [56]. Zakres 1.4 - 2.0 g/kg m.c. służy jako dobry wyznacznik dla osób uprawiających regularnie aktywność fizyczną, może on być jednak podwyższony w przypadku restrykcji energetycznych stosowanych w celu redukcji masy ciała [56]. Seria kontrolowanych badań wykazała, że spożycie białka na poziomie 2.5 - 3.3 g/kg m.c. nie powodowało negatywnych zmian w zakresie profilu lipidowego oraz funkcjonowaniu wątroby i nerek u zdrowych, aktywnych sportowo badanych [56]. Pory spożywania posiłków odgrywają zdecydowanie mniejszą rolę niż całkowita podaż białka. Źródła podają jednak, że jedzenie co 3-4 godziny może promować syntezę białek mięśniowych poprzez stałe utrzymywanie wysokiego stężenia aminokwasów w osoczu [56]. Ludzki organizm dysponuje pulą dwudziestu aminokwasów na potrzeby syntezy białek, z tego dziewięć stanowią aminokwasy egzogenne, które nie mogą zostać zsyntetyzowane w ustroju i muszą pochodzić z pożywienia. To właśnie te aminokwasy są kluczowe w procesie syntezy białek mięśniowych, a w szczególności podgrupa aminokwasów rozgałęzionych (BCAA), do których należą izoleucyna, leucyna i walina [56]. BCAA wykazują indywidualne zdolności do stymulowania translacji białek, a w szczególności leucyna, której podaż w wysokości 1-3 gramów na posiłek wydaje się potrzebna do syntezy białek mięśniowych [56]. Na poziomie molekularnym, wewnątrzkomórkowa dostępność aminokwasów egzogennych, a w szczególności leucyny, stanowi krytyczny parametr decydujący o aktywności syntezy białek mięśniowych [55].

Udowodnione zostało, że nawet małe dawki białka, które stanowiły tylko 25% dawki maksymalnie efektywnej, mogły optymalnie stymulować syntezę białek mięśniowych po dodaniu leucyny [55]. Zawartość leucyny w białkach mleka krowiego jest również powodem, dla którego jest ono bardziej efektywne w procesie hipertrofii mięśniowej niż białka roślinne np. sojowe [55]. Co ciekawe, białko serwatkowe jest również bardziej efektywne niż kazeina w procesie stymulacji syntezy białek, mimo tego, że ma tylko 20% więcej leucyny [55]. W tym przypadku różnica leży w przyswajalności, ponieważ kazeina trawi się dużo wolniej niż serwatka, nie zapewnia ona odpowiedniego stężenia aminokwasów w osoczu w okresie powysiłkowym i przez to daje gorsze efekty [55]. Z zebranych dowodów badacze wysnuli

hipotezę o ‘bodźcu’ leucynowym, która opiera się na założeniu, że leucyna jest kluczowym aminokwasem, będącym odpowiedzialnym za wzrost syntezy białek mięśniowych (Ryc. 5) [55].



Rycina 5. Koncept ‘bodźca’ leucynowego porównujący efekt białka serwatkowego, sojowego i kazeiny [55]

Z tego powodu białka z wyższą zawartością leucyny są bardziej efektywne w procesie hipertrofii mięśniowej w porównaniu z białkami o niższej zawartości. Co więcej, szybkość trawienia i przez to szczytowa ‘leucynemia’ jest również istotna, gdyż warunkuje ona podaż leucyny w procesie stymulowania syntezy białek [55]. Przedstawiony koncept podkreśla również fakt, że wysiłek fizyczny zwiększa wrażliwość organizmu na leucynę, a wiek i brak aktywności ją obniżają. Wyżej wymienione dowody wskazują na silną efektywność konsumpcji szybko trawionego białka z wysoką zawartością leucyny po wysiłku na syntezę białek mięśniowych [55].

Obecnie, wybór żywności bogatej w białko jest większy niż kiedykolwiek i istnieje wiele opcji dla sportowców próbujących uzupełnić swoją dietę. Trzeba jednak pamiętać, że każda z nich niesie ze sobą wady i korzyści. Jakość źródeł białka określana jest na podstawie zawartości aminokwasów egzogennych, tłuszczu, kalorii, mikroelementów, błonnika, stopnia przetworzenia i wielu innych czynników, którymi sportowcy muszą się kierować, jeśli chcą

w pełni zoptymalizować swoje wyniki [56]. Generalnie, zwierzęce źródła białka takie jak mleko, wołowina, jaja lub drób mają bardziej kompletny profil aminokwasowy i zawierają więcej leucyny niż białka pochodzenia roślinnego [56]. Co więcej, białka soi, które są najbardziej przebadane w kontekście białek roślinnych wykazały działanie inhibicyjne szlaku mTOR, co działa negatywnie na syntezę białek mięśniowych [56]. Oczywiście, poza zawartością EAA, należy wziąć pod uwagę podaż tłuszczu, cholesterolu czy mikroelementów i stosować zbilansowaną dietę.

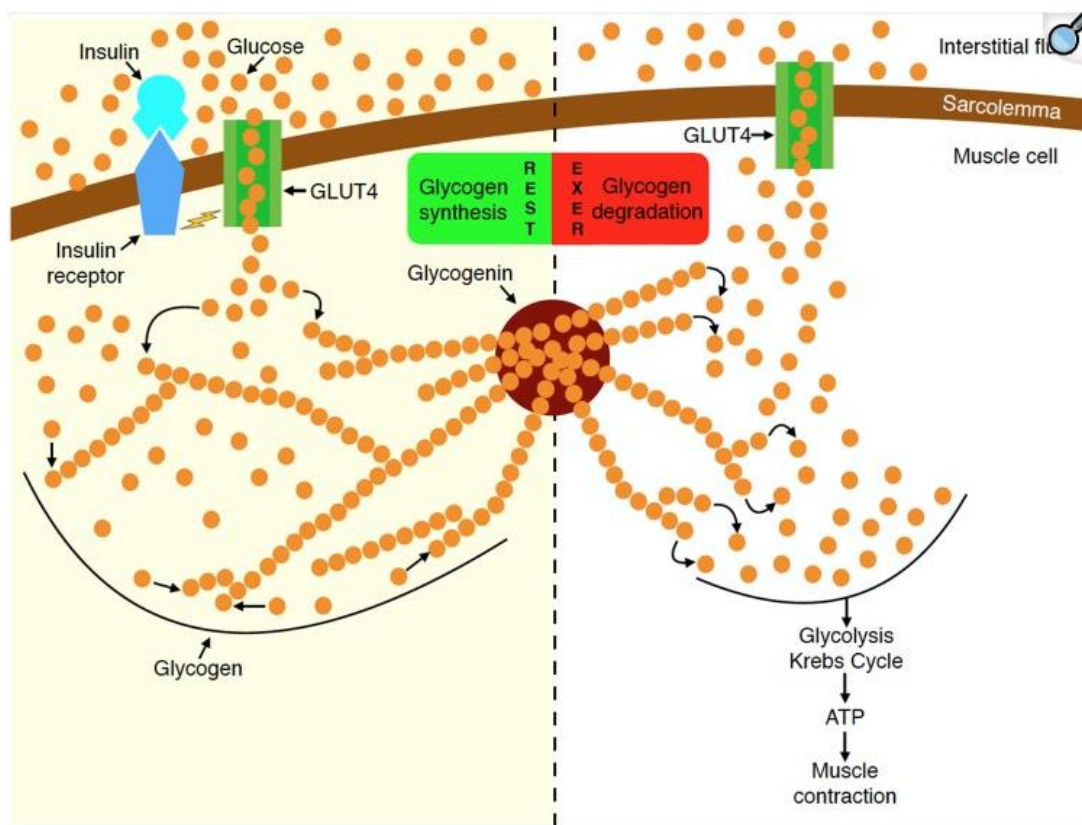
### **1.6.2. Węglowodany**

Wysoka podaż węglowodanów jest często rekomendowana zawodnikom uprawiającym najróżniejsze rodzaje sportu, w tym trening oporowy. Przeważająca część badań dotyczy jednak stosowania suplementów węglowodanowych w kontekście treningów wytrzymałościowych, z uwagi na to, iż węglowodany są preferowanym substratem energetycznym dla mięśni podczas umiarkowanie intensywnego wysiłku [57]. Znacznie mniej badań zgłębia wpływ węglowodanów w sportach siłowo-sylwetkowych takich jak olimpijskie podnoszenie ciężarów, trójbój siłowy czy kulturystyka. Trening oporowy jest metabolicznie odmienny od treningu wytrzymałościowego i prowadzi do odrębnych adaptacji, przez co różnią się również jego wymagania węglowodanowe [57].

Węglowodany są magazynowane w ciele jako źródło energii w postaci glikogenu, który przydaje się podczas wysiłku lub w okresie głodu. Głównymi rezerwuarami są wątroba (80 – 120 g) oraz mięśnie szkieletowe (350 – 700 g) [57]. Podczas treningu oporowego zapasy glikogenu są dynamicznie wykorzystywane na potrzeby glikolizy aerobowej i anaerobowej. Wskutek ich nadmiernego wyczerpania dochodzi do spadku syntezy ATP oraz wolniejszego uwalniania jonów wapnia z retikulum sarkoplazmatycznego, co pogarsza pracę mięśni i prowadzi do obniżenia wyników sportowych [57]. Z uwagi na to, przedtreningowe wysycenie mięśni glikogenem może być kluczowe u sportowców pragnących osiągnąć maksymalny poziom wysiłku. Nie ma jednoznacznego konsensusu co do odpowiedniej podaży węglowodanów u sportowców, aczkolwiek w przeszłości przeglądy systematyczne badań proponowały wartości w zakresie 8-10 g/kg m.c. w przypadku ‘ciężkiego wysiłku anaerobowego’ [57]. Inne rekomendacje obejmują zakres 4-7 g/kg m.c. dla sportowców skupiających się na sile oraz hipertrofii lub 6-12 g/kg m.c. dla zawodników sportów wytrzymałościowych [57]. Pomimo braku zgody co do jednoznacznej wartości pewne jest to, że regularny wysiłek fizyczny zwiększa możliwości magazynowania glikogenu przez nasz

organizm, co skutkuje zarówno poprawą wyników sportowych, jak i zwiększonym zapotrzebowaniem na substraty [57].

Podtrzymanie ciągłych skurczów mięśni szkieletowych podczas wysiłku wymaga nieprzerwanych dostaw energii do komórek w formie ATP. Jest ono produkowane przez oksydację kwasów tłuszczowych, dostawy glukozy z krwiobiegu oraz wewnątrzmięśniowych zapasów glikogenu. Podczas wysiłku fizycznego produkcja ATP w mięśniach jest kolosalna i nawet w stanie odpoczynku każda komórka mięśniowa zawiera koło miliarda cząsteczek ATP, które są zużywane i wymieniane co 2 minuty. Podczas intensywnego treningu produkcja ta może wzrosnąć nawet 1000-krotnie [58]. Kiedy glukoza trafia do komórki podczas treningu, zostaje ona natychmiast fosforyzowana przez heksokinazę i tworzy glukozo-6-fosforan, który następnie zostaje utleniony w procesie glikolizy i cyklu Krebsa by wyprodukować ATP (Ryc. 6) [58].



Rycina 6. Uproszczony schemat metabolizmu glikogenu podczas wysiłku i spoczynku [58]

Z drugiej strony, jeśli węglowodany są spożywane w okresie odpoczynku i regeneracji powysiłkowej, napływ glukozy do komórki jest katalizowany przez insulinę, a glukozo-6-fosforan allosterycznie aktywuje enzym syntazy glikogenowej, jednocześnie stymulując dodatek cząsteczek glukozy do cząsteczki glikogenu [58]. Transporter GLUT4 jest kluczowym

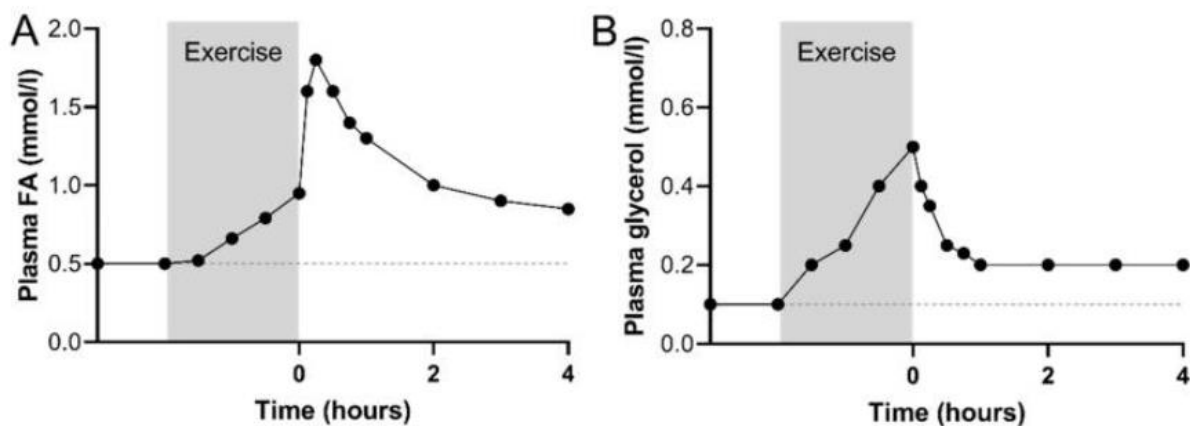
elementem podczas procesu pobierania glukozy z krwiobiegu. W przypadku odpoczynku insulina katalizuje szlaki metaboliczne, które sprawiają, że jest on transportowany do błony komórkowej, a w przypadku wysiłku fizycznego przemieszcza się on samoistnie [58]. Z uwagi na zwiększoną przepuszczalność błony komórkowej dla glukozy dzięki transporterom GLUT4 i GLUT1, powysiłkowo zwiększa się produkcja glikogenu. Proces ten jest zależny od odpowiedniej suplementacji węglowodanami, a w przypadku niewystarczającego stężenia substratu, transportery GLUT4 są usuwane z błony po 30-60 minutach [58].

Pomimo faktu, iż glikogen jest kluczowy podczas wydłużonego wysiłku fizycznego, nadmierna podaż węglowodanów nie przynosi korzystnych efektów, jeśli wysiłek nie jest odpowiednio wyczerpujący [57]. Podczas standardowego treningu oporowego nieobejmującego protokołów zawierających powyżej 10 serii roboczych na grupę mięśniową, wysiłek nie jest odpowiednio duży by wyczerpać zapasy glikogenu, przez co nie ma wskazań do nadmiernej konsumpcji węglowodanów [57]. Jednakże treningi wytrzymałościowe zawierające więcej niż 10 serii roboczych na dane grupy mięśniowe oraz powtarzane wielokrotnie tego samego dnia, będą wymagały wzmożonej suplementacji węglowodanowej przed i powysiłkowo [57]. Co więcej, w okresie potreningowym spożycie węglowodanów jest kluczowe, niezależnie od typu wysiłku w celu uzupełnienia zapasów glikogenu oraz zapewnienia źródła energii potrzebnego do syntezy białek mięśniowych. Istotny jest również typ spożywanych węglowodanów. Badania wykazały, że spożywanie posiłków o wysokim indeksie glikemicznym (IG) przyspiesza tempo regeneracji glikogenu [58]. Odpowiednio szybka podaż bolusa węglowodanowego jest równie ważna. Przyjmuje się, że spożycie mieszanki glukozy i fruktozy w stosunku 2:1 w ilości 1-1.2 g/kg m.c. w okresie 4 godzin po wysiłku jest kluczowe, by zapewnić maksymalną regenerację zapasów glikogenu w mięśniach szkieletowych, a opóźnienie posiłku prowadzi do niekompletnej regeneracji i gorszych wyników następnego dnia [59].

### **1.6.3 Tłuszcze**

Z uwagi na to, że tłuszcz jest bezsprzecznie najmniej istotnym makroskładnikiem w kontekście treningu oporowego i regeneracji, jego rola często bywa spłycona do biernego rezerwuaru energetycznego, który służy tylko i wyłącznie jako źródło kalorii. Przekonanie to jest jednak jak najbardziej błędne, gdyż w ostatnich latach funkcje, które pełnią kwasy tłuszczowe zostały zredefiniowane. Wysiłek fizyczny, a w szczególności, jego utrzymanie przez dłuższy okres, wymaga dużej ilości pracy, która jest napędzana przez substraty energetyczne [60]. Stan występujący po treningu charakteryzuje się zmianami metabolicznymi

ukierunkowanymi na przywrócenie homeostazy i ‘splacenie’ długu tlenowego, który spowodowany jest przez podwyższoną powysiłkową konsumpcję tlenu [60]. Ponadto nawet po spożyciu posiłku bogatego w węglowodany, w organizmie zaobserwować można podwyższoną oksydację kwasów tłuszczowych przez kilka godzin po wysiłku [60]. Wynikiem, który dodatkowo podkreśla tezę zwiększonej lipolizy powysiłkowej, jest wzrost stężenia zarówno wolnych kwasów tłuszczowych, jak i glicerolu w osoczu krwi w oknie czasowym do 4 godzin po wysiłku (Ryc. 7).



Rycina 7. Ilustracja reprezentująca stężenie kwasów tłuszczowych i glicerolu w osoczu w okresie wysiłku i po nim [60]

Podwyższone tempo lipolizy i oksydacji kwasów tłuszczowych jest powodowane metaboliczną koniecznością odnowienia zapasów glikogenu w mięśniach szkieletowych. W konsekwencji kinaza AMP wykorzystuje dostępną glukozę do regulacji procesu syntezy glikogenu, a jako źródła energii w mięśniach używa kwasów tłuszczowych [60]. Co ciekawe, typ spożytego posiłku bezpośrednio wpływa na metabolizm. Badania wykazały, że w stanie głodu lub po posiłku ubogim w węglowodany i bogatym w tłuszcze, stężenie kwasów tłuszczowych w osoczu było 260% wyższe, co pobudzało receptory PPAR (*Peroxisome Proliferator Activated Receptors*) do transkrypcji genów odpowiedzialnych za metabolizm lipidów [60].

Wielonienasycone kwasy tłuszczowe omega-3 (n-3 PUFA) należą do grupy niezbędnych kwasów tłuszczowych razem z n-6 PUFA [61]. Charakteryzują się one wiązaniem podwójnym na 3 atomie węgla licząc od ostatniej grupy metylowej, a najważniejsze z nich to: kwas alfa-linolenowy (ALA), kwas eikozapentaenowy i kwas dokozaheksaenowy [61]. DHA jest dominującym kwasem omega-3 w błonach komórkowych i znajduje się we wszystkich organach takich jak wątroba, mięśnie szkieletowe czy serce, ale największe stężenie wykazuje

w strukturach neurologicznych jak mózg czy siatkówka oka [61]. Z uwagi na istotny balans pomiędzy prozapalnymi kwasami omega-6 i przeciwzapalnymi kwasami omega-3, zaleca się prioryteźowanie konsumpcji pokarmów bogatych w EPA i DHA, takich jak tłuste ryby i niektóre orzechy [61]. Zwiększona podaż tych pokarmów przynosi wiele korzyści zarówno sercowo-naczyniowych, jak i neurologicznych, jednak co ciekawe, ostatnio wykazano związek pomiędzy n-3 PUFA a poprawą wydolności sportowej i lepszą regeneracją [61]. Obiecująca jest również zależność pomiędzy spożyciem kwasów omega-3 a zmniejszonym efektem DOMS oraz lepszą naprawą tkanek po treningu oporowym [61]. Ponadto niektóre badania podają pozytywny wpływ n-3 PUFA na funkcję mięśni, co objawia się lepszym zakresem ruchu oraz mniejszym obrzękiem i sztywnością w okresie bezpośrednio po wykonaniu ćwiczenia [61]. Co więcej, obserwuje się spadek markerów prozapalnych krwi, takich jak IL-6, CRP, CK i TNF- $\alpha$ , w grupach suplementujących n-3 PUFA w porównaniu do placebo [61].

Podaż tłuszczów dla sportowców uprawiających trening oporowy powinna spełniać parę najważniejszych funkcji, takich jak odpowiednie spożycie niezbędnych kwasów tłuszczowych i witamin rozpuszczalnych w tłuszczach, odnawianie wewnątrzmięśniowych zapasów trójglicerydów i utrzymanie balansu energetycznego [62]. Podczas przygotowywania się do zawodów sportowcy sylwetkowi, jak i podnoszący ciężary, dążą do redukcji masy ciała i tkanki tłuszczowej, co prowadzi do poważnych restrykcji kalorycznych [62]. Z uwagi na istotną rolę zarówno białka, jak i węglowodanów w kontekście treningu oporowego, zwykle makroskładnikiem, który jest najmocniej ograniczony jest tłuszcz [62]. Dzieje się tak nie bez powodu – badania wykazały, że w procesie przygotowywania się do zawodów diety kładące nacisk na podaż białka i węglowodanów są skuteczniejsze niż diety białkowo-tłuszczowe [62]. Aczkolwiek, programy dążące do agresywnej redukcji masy ciała (>0.5% m.c./tydzień) oraz ograniczające spożycie tłuszczu poniżej 0.5g/kg m.c. mogą przynieść efekt odwrotny do zamierzonego [62]. Ograniczenie spożycia tłuszczu poniżej tego poziomu może prowadzić do upośledzonej produkcji testosteronu, niedoborów witamin A, D, E i K, niewystarczającej podaży n-3 PUFA oraz ogólnego pogorszenia samopoczucia [62]. By temu zapobiec, istotne jest zapewnienie podaży tłuszczu na poziomie 20-30% dziennego zapotrzebowania energetycznego oraz stosowanie mniej agresywnych protokołów redukcji masy ciała [62].

## **1.7 Wpływ bilansu energetycznego na trening oporowy**

### **1.7.1 Nadwyżka energetyczna**

Bezspornym faktem jest, że budowanie mięśni wymaga energii. Taki stan rzeczy wynika z tego, że nie tylko samo wykonywanie aktywności fizycznej wymaga pracy; również

następujące po nim procesy budowy nowych tkanek są energochłonne. Biorąc to pod uwagę, trzeba być ostrożnym podczas formułowania zaleceń uwzględniających nadwyżkę kaloryczną, by nie osiągnąć efektu dalekiego od zamierzonego.

Badania wykazują, że przekarmianie młodych mężczyzn nie wpływa pozytywnie na kompozycję składu ciała, a wręcz przeciwnie, po 100 dniach nadwyżki kalorycznej, średnio przybrali oni 2 kilogramy tłuszczu na każdy kilogram beztłuszczowej masy ciała [9]. Wyniki te ilustrują, że sama nadwyżka kaloryczna może być detrymentalna jeśli jest zbyt wysoka w stosunku do potrzeb lub nie jest łączona z odpowiednim protokołem treningu oporowego [9]. Ponadto optymalna wartość, jaką powinny spożywać osoby pragnące zbudować masę mięśniową bez dokładania zbędnej tkanki tłuszczowej, jest trudna do ustalenia. Standardowe zalecenia przyjmują wartość 1500-2000 kJ/dzień w przypadku sportowców ze stabilną masą ciała. Wartość ta jednak może wzrosnąć nawet do 4000 kJ/dzień w przypadku osób mających problemy z przybraniem na wadze lub zawodników z bardzo dużym obciążeniem treningowym [9]. Problemem pozostaje fakt, że większość tych wskazówek bierze pod uwagę tylko to, że 1 kilogram mięśni jest zbudowany w 75% z wody, 20% z białek i 5% z tłuszczu, glikogenu oraz innych metabolitów [9]. Jednakże podaż kaloryczna powinna także uwzględnić koszt samej syntezy białek oraz zwiększony metaboliczny koszt utrzymania większej ilości tkanek, jak i termogenezę poposiłkową [9]. Niektóre badania próbujące zbadać tę zależność doszły do wyników takich jak 7440 kJ czy 6050 kJ energii potrzebnej do zbudowania jednego kilograma tkanki mięśniowej [9]. Niemniej, z obecnie dostępnej literatury, konkretne ustalenie wartości energetycznej, która jest potrzebna do zbudowania jednego kilograma mięśni szkieletowych, jest niemożliwe [9]. Wynika to z wpływu indywidualnych niuansów osób badanych, takich jak: wiek, genetyka, doświadczenie treningowe, płeć, kompozycja ciała czy adaptacje organizmu do nadwyżki kalorycznej [9].

Biorąc wszystkie te zależności pod uwagę, obecne zalecenia skupiają się na indywidualizacji treningu i żywienia ze szczególnym naciskiem na potrzeby sportowca, które należy badać na poziomie jednostki i odpowiednio dostosowywać z biegiem czasu [9]. Istotną zmienną pozostaje również typ makroskładników, które zapewniają nadwyżkę kaloryczną. W stanie energetycznego wysycenia organizmu procesy kataboliczne są mniejszym zagrożeniem, a w szczególności atrofia mięśniowa. Z uwagi na to, obecne zalecenia przyjmują wartość spożycia białka na poziomie 1.6 g/kg m.c. jako wystarczającą na potrzeby maksymalizacji syntezy białek mięśniowych i przez to hipertrofii [9]. Normy spożycia tłuszczu nie ulegają dużym zmianom w trakcie stosowania nadwyżki kalorycznej i wahają się

w granicach 20 – 35% całkowitej podaży energii [9]. Przypadki, w których można rozważyć wdrożenie większej podaży energii z tłuszczów, obejmują problemy z przybraniem na wadze lub przypadłości medyczne, takie jak mukowiscydoza, które wymagają wysokoenergetycznych posiłków o mniejszej objętości [9]. W konsekwencji u większości sportowców, którzy stosują nadwyżkę kaloryczną, pochodzi ona głównie z węglowodanów [9]. Jest to logiczne, biorąc pod uwagę fakt, że stanowią one główne źródło energii podczas treningu, jak i są kluczowe podczas procesów odbudowy glikogenu potreningowo [9]. Założenia te są zgodne z wynikami badań, które systematycznie udowadniają, że synteza białek mięśniowych jest obniżona w przypadku stosowania bogatych w tłuszcz diet ‘ketogenicznych’ w porównaniu ze zrównoważoną podażą [9].

### **1.7.2 Deficyt energetyczny**

Okresowe fazy restrykcji kalorycznych są często używane jako narzędzie służące zmniejszaniu masy ciała, przy czym priorytetem jest utrata tkanki tłuszczowej, a spadek beztłuszczowej masy ciała pozostaje negatywnym efektem ubocznym w przypadku wydłużonego okresu deficytu energetycznego. Sportowcy są grupą, która musi dodatkowo uważać na utratę mięśni podczas deficytu energetycznego, a szczególnie zawodnicy, którzy rywalizują w sportach sylwetkowych lub siłowych. Z tego powodu strategie żywieniowe i modyfikacje stylu życia ukierunkowane na zachowanie jak największej ilości beztłuszczowej masy ciała są tak istotne. Jednym z najbardziej oczywistych podejść jest regularny trening oporowy. Badania wykazały, że podczas redukcji masy ciała wywołanej tylko dietą, aż 24% utraconej masy ciała stanowiły tkanki beztłuszczowe, a w przypadku programu opierającego się na wysiłku fizycznym wspomaganym dietą, wynik ten wynosił 11% [63]. Zachowanie beztłuszczowej masy ciała zależy od dynamicznego balansu pomiędzy syntezą białek mięśniowych a proteolizą [63]. Podczas restrykcji kalorycznej organizm wykazuje mniejszą wrażliwość na bodźce anaboliczne oraz antykataboliczne w porównaniu z balansem energetycznym [63]. Ponadto istnieją dowody na to, że stan ten prowadzi do zwiększonej aktywności szlaków proteolizy poprzez zmniejszone poziomy insuliny, jak również ma negatywny wpływ na tempo syntezy białek mięśniowych, co stanowi mechanizm obronny ukierunkowany na zachowanie energii [63]. W konsekwencji tego, optymalne metody zachowania beztłuszczowej masy ciała w warunkach hipokalorycznych powinny bazować na przeciwdziałaniu spadkowi syntezy białek poprzez modyfikacje bodźców żywieniowych i mechanicznych [63]. Modyfikacje protokołów treningowych w okresie restrykcji kalorycznej są zróżnicowane. Przez długi czas panowało założenie twierdzące, iż konieczne jest

limitowanie objętości treningowej wynikające z ograniczonej podaży energii [63]. Aczkolwiek ostatnie badania wykazały, że ograniczanie w ten sposób bodźców mechanicznych może mieć efekt odwrotny od zamierzonego i przez to prowadzić do zwiększonych strat beztłuszczowej masy ciała [63]. Mimo to, dowody są niewystarczające by stwierdzić, że trening oporowy o większej objętości roboczej jednoznacznie przekłada się na zachowanie większej ilości beztłuszczowej masy ciała. Wyniki wskazują na statystycznie istotną poprawę u badanych kobiet, ale nie u mężczyzn [63].

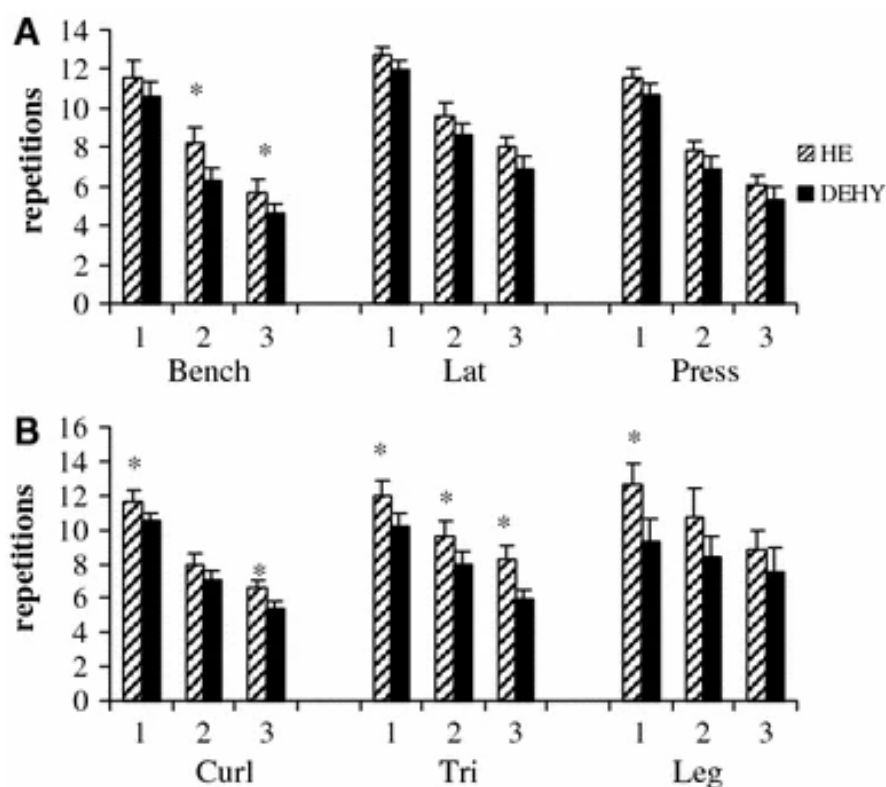
Zmiany w diecie w okresie restrykcji energetycznej nie powinny być zbyt drastyczne. Przyjmuje się, że optymalne tempo redukcji masy ciała wynosi 0.5% w skali tygodnia, jeśli celem pozostaje również zachowanie maksymalnej ilości beztłuszczowej masy ciała [62]. W przypadkach bardziej ekstremalnych, wymagających szybszych efektów, redukcja do 1% masy ciała na tydzień również jest możliwa, lecz kluczowe jest monitorowanie kompozycji ciała oraz samopoczucia sportowca w tym okresie [62]. Ponadto im niższy jest procent tkanki tłuszczowej w ciele, tym bardziej konserwatywnie powinno się podchodzić do deficytu, z uwagi na większe ryzyko utraty białek mięśniowych [62]. Zapotrzebowanie na makroskładniki również jest modyfikowane, by akomodować zmieniające się potrzeby organizmu. Niewątpliwie kluczowe jest zwiększenie podaży białka, która wynosić może nawet 2.2 – 3.0 g/kg m.c. w przypadku sportów wymagających zejścia do ekstremalnie niskich poziomów tkanki tłuszczowej jak kulturystyka [62]. Tak wysoce zwiększone zapotrzebowanie na białko wynika z nasilenia procesów katabolicznych oraz zmniejszenia tempa syntezy białek mięśniowych. Organizm stosuje te procesy jako mechanizmy obronne w przypadku długotrwałej restrykcji kalorycznej [62]. Co więcej, dieta bogata w białko ma również pozytywny wpływ na uczucie sytości, co jest bardzo ważne w perspektywie długiego okresu redukcji masy ciała [62]. Następnym fundamentalnym makroskładnikiem są węglowodany, których podaż powinna być dostosowana w zależności od poziomu aktywności w przyjętym zakresie 2 – 5 g/kg m.c. w przypadku treningu oporowego [62]. Po ustaleniu odpowiedniej podaży białka i węglowodanów, pozostała energia może zostać przeznaczona na tłuszcze, zapewniając minimalną wartość 0.5 g/kg m.c. [62]. Potencjalnie korzystna może być też suplementacja kofeiny w zakresie 3 – 6 mg/kg m.c. oraz monohydratu kreatyny w przedziale 3 – 10 g na dzień z uwagi na ich działanie ergogeniczne w kontekście treningu oporowego [62].

## **1.8 Znaczenie podaży płynów w treningu oporowym**

Nawodnienie pełni niezwykle ważną rolę podczas wysiłku fizycznego gdyż wpływa na szereg istotnych zmiennych takich jak efektywność treningowa, zapobieganie kontuzjom czy

regeneracja powysiłkowa [64]. Niewątpliwie lepiej przebadano wpływ nawodnienia na ćwiczenia aerobowe oraz wytrzymałościowe, w których niekorzystny wpływ niedostatecznej podaży płynów jest oczywisty [65]. W kontekście treningu oporowego sytuacja nie jest aż tak przejrzysta, dlatego też zawodnicy w sportach z podziałem na kategorie wagowe często intencjonalnie się odwadniają, by szybko zredukować wagę [65]. Takie podejście może być jednak zgubne, szczególnie w przypadku sportów, które wymagają wydłużonego wysiłku [65].

Badanie na aktywnych fizycznie, zaznajomionych z treningiem oporowym młodych mężczyzn wykazało, iż odwodnienie na poziomie 2.5% jak i 5% nie miało wpływu na wysokość skoku wzwyż, szczytową siłę kończyn dolnych (mierzoną poprzez przysiad z wyskokiem) ani szczytową moc kończyn dolnych (mierzoną poprzez izometryczny przysiad na maszynie Smith) w protokole zakładającym jedno powtórzenie z maksymalnym wysiłkiem. Jednak w perspektywie całej sesji treningu oporowego stwierdzono istotnie zmniejszoną efektywność wykonywanych ćwiczeń [66]. Co więcej, inne badanie porównujące wpływ odwodnienia na poziomie ~3% w zestawieniu z ekspozycją na ciepło wykazało, że w protokole sesji treningu oporowego zakładającym 6 ćwiczeń na różne partie ciała, z całkowitą objętością wynoszącą 18 serii roboczych, osoby odwodnione były w stanie wykonać o 1-2 powtórzenia mniej w każdej serii (Ryc. 8).



Rycina 8. Ilość powtórzeń w poszczególnych ćwiczeniach i seriach, w warunkach ekspozycji na ciepło (HE) i odwodnienia (DEHY) [65]

Osoby odwodnione prezentowały wyższe tętno przed seriami oraz zgłaszały większe zmęczenie na subiektywnej skali RPE, co sugeruje suboptymalną regenerację pomiędzy seriami [65]. Rezultaty te wskazują na detrymentalną rolę odwodnienia w standardowych protokołach treningu oporowego, z obniżoną efektywnością treningową oraz upośledzoną regeneracją, co prowadzi do gorszych przyrostów masy i siły mięśni [65]. By tego uniknąć, kluczowe jest spożywanie co najmniej 35 ml płynów na kg m.c. Badania wykazały, że sportowcy, którzy nie byli w stanie pokryć tego zapotrzebowania, wykazywali oznaki odwodnienia [67].

Biorąc to pod uwagę, należy również pamiętać o negatywnych efektach hiperhydratacji, prowadzącej do hiponatremii, która może mieć miejsce gdy sportowcy spożywają wodę lub napoje hipotoniczne w ilościach znacznie przekraczających straty związane z potem [68]. Problem ten występuje głównie podczas ekstremalnych wysiłków wytrzymałościowych takich jak maratony lub triatlony, jednak śmierć dwóch zawodników futbolu amerykańskiego w 2014 roku podkreśla, że nie jest on odizolowany [68]. W związku z tym istotne jest zachowanie całkowitej wody w ciele w wąskim zakresie w celu utrzymania homeostazy [68]. Kluczowe jest również rozpoczęcie wysiłku fizycznego w stanie euhydratacji, który może być osiągnięty przez przyjmowanie 5-7 ml płynów na kg m.c. około 4 godziny przed wysiłkiem [69]. Mimo to, mechanizm regulowania wody w organizmie człowieka jest zbyt skomplikowany i indywidualny, by skonstruować definitywne zalecenia dotyczące zapotrzebowania na płyny. Kluczowa pozostaje indywidualizacja oraz obserwacja stanu organizmu [70].

## **1.9 Suplementacja w treningu oporowym**

Efektywna regeneracja po sesji treningu oporowego jest kluczowa, a jej podstawą jest niewątpliwie zdrowa i zbilansowana dieta. Jednak w przypadku, gdy zapewnienie wszystkich niezbędnych składników odżywczych nie jest możliwe w postaci zwykłych posiłków, niezastąpione okazują się suplementy diety. Suplementacja jest szerokim pojęciem, obejmującym zarówno uzupełnianie niedoborów makroskładników poprzez odżywki białkowe lub suplementy węglowodanowe, jak i modelowanie podaży witamin, mikroelementów czy innych związków [71]. W przypadku niedostatecznej podaży białka, najbardziej powszechną formą suplementacji pozostają odżywki białkowe na bazie serwatki, które są bogate w EAA oraz BCAA, aminokwasy o największej wartości biologicznej w kontekście hipertrofii [71]. Z kolei suplementy węglowodanowe o wysokim indeksie glikemicznym wykazują największą efektywność w szybkim odnawianiu źródeł glikogenu w przypadku konsumpcji do 2 godzin po sesji treningowej [71]. Ponieważ wysiłek fizyczny często idzie w parze z nadmierną utratą minerałów oraz wody w postaci potu, optymalne może być ich uzupełnienie w postaci napojów

sportowych zawierających sód, potas, magnez i wapń, gdyż niedobory tych związków mogą prowadzić do nieprawidłowej regulacji temperatury ciała, upośledzonego przepływu krwi lub nieoptymalnego działania mięśni [71]. Zapewnienie odpowiedniej podaży witamin jest równie istotne, ponieważ pełnią one niezwykle ważne funkcje. Przykładowo, witaminy z grupy B są centralne w procesie konwertowania energii z pożywienia w ATP, witamina C jest fundamentalnym elementem syntezy kolagenu, niezbędnego w regeneracji tkanki łącznej, a witamina D pełni znaczącą rolę we wchłanianiu wapnia oraz stymulowaniu siły mięśni [71]. Z uwagi na to, odpowiednia podaż tych oraz wielu innych witamin i minerałów powinna stanowić nieodłączny element diety każdego sportowca, kierującego się maksymalizacją procesów regeneracyjnych [71]. Aczkolwiek z uwagi na zróżnicowaną podaż tych związków w diecie oraz indywidualne potrzeby każdego sportowca, niemożliwe jest określenie jednoznacznych zaleceń co do ich suplementacji. Z uwagi na to, zasadnicze są regularne badania na obecność niedoborów oraz wyspecjalizowane plany żywieniowe uwzględniające wszystkie zależności.

Kreatyna, a w szczególności monohydrat kreatyny, jest najbardziej przebadanym suplementem na świecie, cenionym za wspomaganie regeneracji potreningowej oraz podnoszenie wyników sportowych [71]. Mechanizm działania kreatyny polega na zwiększaniu rezerw fosfokreatyny w mięśniach, co z kolei prowadzi do szybszej regeneracji ATP niezbędnego podczas wysiłku. W wyniku tego sportowiec ma więcej energii i może ćwiczyć ciężiej i dłużej [71]. Co więcej, kreatyna wspomaga regenerację poprzez minimalizowanie uszkodzeń mięśniowych i stanu zapalnego oraz sprzyja retencji wody w tkance mięśniowej, co wpływa korzystnie na syntezę białek mięśniowych [71]. Ponadto suplementacja kreatyny może wpływać pozytywnie na funkcje poznawcze z powodu zwiększonej syntezy ATP w mózgu, równocześnie wspierając klarowność myśli i pamięć [71]. Regularne przyjmowanie dawek w zakresie 3-5 gramów dziennie jest standardowe, jednak możliwe jest również szybkie 'ładowanie' kreatyny dawkami sięgającymi 20 gramów dziennie przez 5-7 dni [72]. Kolejnym szeroko stosowanym i intensywnie przebadanym suplementem jest kofeina, której działanie jest dobrze znane prawie każdemu. Jej główne funkcje to m.in. prewencja wyczerpania, wspomaganie skupienia oraz poprawa wydolności fizycznej [72]. Jest ona szczególnie przydatna w przypadku sportów wymagających krótkich zrywów wysiłku o bardzo dużej intensywności, jak np. trójbój siłowy [72]. Głównym efektem spożycia kofeiny jest stymulacja centralnego układu nerwowego, wskutek czego sportowiec mniej odczuwa zmęczenie i bardziej skupia się na wysiłku [72]. Zalecana dawka dla sportowców wynosi 3-6 mg/kg m.c. spożyte

30-60 min przed treningiem. Należy jednak unikać wysokich dawek w późnych godzinach wieczornych oraz uważnie monitorować stan zawodnika, gdyż nadmierne spożycie kofeiny może prowadzić do problemów ze snem [72].

Szereg innych związków może mieć potencjalnie istotne znaczenie w kontekście treningu oporowego. Przykładowo kwasy omega-3, polifenole i antyoksydanty mogą mieć pozytywny wpływ na regenerację poprzez modulację odpowiedzi zapalnej organizmu. Probiotyki i prebiotyki natomiast, mogą odgrywać kluczową rolę w procesie wchłaniania składników odżywczych i utrzymywania układu pokarmowego w dobrym stanie [71]. Jednakże zawsze trzeba mieć na uwadze, że źle dobrana suplementacja może być detrymentalna dla wyników sportowych, a w ekstremalnych przypadkach może nawet zagrażać życiu [71]. W związku z tym, centralnym punktem pozostaje indywidualizacja i przemyślane strategie żywieniowo-suplementacyjne, biorące pod uwagę zapotrzebowanie sportowca i podaż składników odżywczych z dietą [71].

## **1.10 Analiza wpływu wybranych diet na trening oporowy**

Wraz z rosnącą świadomością o niewątpliwie kluczowej roli diety w procesie treningu i regeneracji, wzrasta również liczba strategii żywieniowych ukierunkowanych na wydolność i wyniki sportowe. Mimo to nie wszystkie z nowych koncepcji są słuszne, a niektóre mogą być wręcz szkodliwe w przypadku złego stosowania.

Jedną z najpopularniejszych i najbardziej przebadanych diet jest dieta śródziemnomorska (DŚ), ceniona za prewencję chorób sercowo-naczyniowych oraz promowanie zbilansowanego żywienia [73]. Główne wytyczne DŚ zakładają codzienne spożywanie świeżych warzyw i owoców, produktów zbożowych pełnoziarnistych, produktów mlecznych oraz oliwy z oliwek [73]. Inne produkty, które są kluczowe to białe mięso, jaja, ryby lub owoce morza, rośliny strączkowe, orzechy oraz czerwone wino w umiarkowanych ilościach. Produkty ograniczone obejmują słodycze, mocno przetworzoną żywność i czerwone mięso [73]. Z uwagi na właściwości przeciwzapalne oraz zbilansowaną podaż składników odżywczych, DŚ przyczyniła się do poprawy wyników sportowych podczas interwencji żywieniowych u sportowców. Udowadniają to lepsze wyniki testów sprawnościowych obejmujących sprinty oraz siłę przysiadu u kickboxerów [73]. Ponadto duży wybór produktów w DŚ w połączeniu z odpowiednią podażą wysokowartościowego białka, złożonych węglowodanów i tłuszczów nienasyconych przyczynia się do wysokiego wskaźnika adherencji do diety oraz poprawy kompozycji składu ciała [73]. Co więcej, wysoka podaż błonnika

pokarmowego na poziomie około 14 g na każde 1000 spożywanych kcal powoduje wyraźną poprawę profilu lipidowego, a w szczególności frakcji LDL [74]. Zastrzeżenia jakie może budzić DŚ obejmują niską podaż kaloryczną, która może być niewystarczająca w przypadku elitarnych sportowców oraz spożycie czerwonego wina, które jest kontrowersyjne z uwagi na zawartość alkoholu.

Diety ketogeniczne oraz niskowęglowodanowe również cieszą się dużym poważaniem w niektórych kręgach. Ich główna zasada polega na ekstremalnym ograniczeniu węglowodanów, co z kolei wywołuje stan ketozy w organizmie i promuje wydzielanie ciał ketonowych takich jak acetoocetan, aceton i beta-hydroksymaślan [73]. Wyniki badań na temat diet ketogenicznych w sporcie są niejednoznaczne. Niektóre źródła donoszą, że ograniczenie węglowodanów <10% dziennej podaży energii, przyczynia się do redukcji masy ciała (w tym beztuszczowej), jednocześnie utrzymując bazowy poziom wydolności bez spadków siły lub wytrzymałości [73]. Aczkolwiek, obecna literatura wskazuje, że diety ketogeniczne mają minimalny wpływ na maksymalną zdolność zużycia tlenu i mogą prowadzić do spadków masy mięśniowej, co wpływa negatywnie na sporty siłowe [73]. Co więcej, przedłużone stosowanie diet bardzo niskowęglowodanowych ma potencjalnie negatywny wpływ na zdrowie kości, metabolizm żelaza oraz markery stresowe i prozapalne [73]. Ponadto restrykcyjna natura diet ketogenicznych powoduje, że poziom adherencji jest niski, a stan psychologiczny sportowców może ulec pogorszeniu [73].

Dużą i ciągle rosnącą popularność wykazują także diety wegetariańskie oraz wegańskie. Weganizm cechuje się niespożywaniem mięsa ani żadnych produktów pochodzenia zwierzęcego [73]. Wegetarianizm jest trochę mniej surową opcją i chociaż dalej zabrania spożywania mięsa to pozwala na włączenie do diety produktów odzwierzęcych takich jak jaja lub przetwory mleczne [73]. Badania wykazują, że wegetarianie i weganie spożywają średnio mniej kalorii, tłuszczów nasyconych, cholesterolu i białka, a więcej błonnika i żelaza [73]. Jednakże, źle zaplanowane diety wegańskie prowadzą do dużego ryzyka deficytów białkowych oraz witamin B12 i D oraz żelaza, cynku, wapnia i jodu [73]. Skutkiem niedostatecznej podaży tych składników odżywczych jest wyczerpanie oraz upośledzone leczenie kontuzji, co drastycznie obniża wydolność sportową, regenerację i ogólne zdrowie [73]. Ciekawą zależność stanowią większe niedobory żelaza połączone z jego większą podażą. Wynika to z mniejszej biodostępności roślinnych źródeł żelaza w porównaniu ze źródłami zwierzęcymi [73]. Problemem pozostaje również jakość białek roślinnych, które charakteryzują się mniejszą zawartością BCAA, a szczególnie leucyny, która jest kluczowa w procesie syntezy białek

mięśniowych [73]. Pomimo tego, wyniki badań nie wskazują jednoznacznie na przewagę diet wszystkożerców nad dietami wegańskimi, w przypadku optymalnej struktury posiłków [73]. Doniesienia te ponownie podkreślają znaczenie indywidualnego programowania dietetycznego u sportowców, a w szczególności tych, którzy stosują diety restrykcyjne [73].

## **2. PODSUMOWANIE CZĘŚCI TEORETYCZNEJ**

Niniejsza praca stanowi kompleksowy przegląd najnowszej literatury obejmującej tematy związane z treningiem oporowym oraz regeneracją. Wyszczególnia ona fizjologiczne mechanizmy kierujące wysiłkiem fizycznym oraz podkreśla kluczową rolę diety w procesie budowania masy mięśniowej i szeroko pojętej wydolności fizycznej.

Opracowanie to kładzie nacisk na rosnącą popularność treningu oporowego oraz szereg korzyści płynących z zaangażowania w tę formę wysiłku fizycznego. Ponadto praca eksploruje nowatorskie poglądy oraz hipotezy dotyczące fizjologii sportu, szczególnie zaznaczając jak żywienie wpływa nie tylko na efektywność jednostek treningowych, ale przede wszystkim na aspekt superkompensacji następujący po wysiłku.

Dzięki szerokiemu zakresowi omawianych spraw, niniejsza praca może być użyteczna zarówno dla sportowców, jak i trenerów, fizjoterapeutów, dietetyków lub zwykłych ludzi, mających na celu poszerzenie wiedzy w omawianych tematach.

Należy jednak zaznaczyć, że przedstawiona praca licencjacka nie wyczerpuje w pełni zagadnień związanych z treningiem oporowym, regeneracją i dietą, z uwagi na dynamiczny rozwój tych dziedzin. W dalszym ciągu kluczowa jest dogłębna analiza poszczególnych przypadków i przygotowywanie indywidualnych zaleceń.

W dalszej części pracy przedstawiono siedmiodniowy jadłospis opracowany dla wybranego przypadku, którego celem jest wsparcie adaptacji treningowych, procesu regeneracji oraz realizacji założeń wynikających z regularnego treningu oporowego.

### 3. OPIS PRZYPADKU I ZALECENIA DIETETYCZNE

Charakterystyka sportowca:

- Płeć: Mężczyzna
- Wiek: 20 lat
- Waga: 85 kilogramów
- Wzrost: 185 centymetrów
- BMI: 24.8 kg/m<sup>2</sup>
- Procent tkanki tłuszczowej: 13-15%
- Doświadczenie w treningu oporowym: 3.5 roku treningów
- Obecny protokół treningowy: 4 treningi siłowe w tygodniu, w tym dwie 30 minutowe sesje treningu aerobowego po treningu siłowym w tygodniu
- Cel: budowa masy mięśniowej oraz siły przy minimalnym wzroście tkanki tłuszczowej
- PPM (Podstawowa Przemiana Materii) z wzoru Harrisa-Benedicta [75] (SWE (spoczynkowy wydatek energetyczny kcal) =  $66.5 + (13.75 \times \text{masa ciała [kg]} + (5.003 \times \text{wzrost [cm]} - (6.775 \times [\text{wiek}]))) = 2025 \text{ kcal}$
- Biorąc pod uwagę program treningowy sportowca, założono PAL (Physical Activity Level) na poziomie 1.6
- CPM (Całkowita Przemiana Materii):  $2025 \text{ kcal} * 1.6 = 3240 \text{ kcal}$
- Biorąc pod uwagę cel sportowca założono konserwatywną nadwyżkę kaloryczną na poziomie 1500 kJ (358 kcal) co daje finalną wartość energetyczną na poziomie **3598 kcal**
- Podział makroskładników w diecie:
  - Białko: 1.8 g/kg m.c. = **153 g** (612 kcal, 17% zapotrzebowania energetycznego). Wartość ta leży bliżej górnej wartości przedziału 1.4-2.0 g/kg m.c. zalecanego sportowcom uprawiającym trening oporowy z uwagi na stosunkowo wysokie obciążenie treningowe, może być ona odpowiednio dostosowywana z czasem i obserwacją.
  - Tłuszcze: **80 g**. Wartość ta pochodzi z uwzględnienia 20% zapotrzebowania energetycznego na tłuszcze (720 kcal), co służy zapobieganiu niedoborom witamin A, D, E i K oraz kwasów omega-3.

- Węglowodany: **566.5 g** (2266 kcal, 63% zapotrzebowania energetycznego). Reszta kalorii uzupełniana jest z węglowodanów, które zapewnią źródło substratów energetycznych niezbędnych do budowania mięśni.
- Podaż płynów: Woda systematycznie pita w ciągu dnia zgodnie z potrzebą (ok. 35 ml/kg m.c. + 425-595 ml napoju z elektrolitami przed wysiłkiem. = ok. **3500 ml**)
  - Dieta oparta na założeniach DŚ, duża ilość warzyw i owoców oraz podaż tłuszczów głównie nienasyconych, faworyzowanie chudych źródeł białka i spożywanie zbilansowanych posiłków.
  - Podaż błonnika według standardowych zaleceń DŚ jest równa 14 g na każde 1000 kcal, czyli w tym przypadku 50.6 g. Jednakże profil diety nie jest przystosowany do diet wysokokalorycznych i tak duża ilość błonnika mogłaby wywoływać zaburzenie ze strony układu pokarmowego, z tego powodu założono wartość **40 g** jako zalecaną.
  - Suplementacja: 5 g monohydratu kreatyny dziennie, 200 mg kofeiny 30-60 minut przed sesją treningową.

## 4. JADŁOSPIS SIEDMIODNIOWY

### 4.1 Dzień pierwszy (treningowy)

Tabela 1. Dzielne podsumowanie wartości odżywczych - dzień 1

Energia	Białko	Tłuszcz	Węglowodany	Błonnik
<b>3577.8 kcal</b>	<b>151 g</b>	<b>75.7 g</b>	<b>549.9 g</b>	<b>42.7 g</b>

Tabela 2. Śniadanie - dzień 1

Czekoladowa owsianka z malinami				
Energia	Białko	Tłuszcze	Węglowodany	Błonnik
<b>937.4 kcal</b>	<b>31.7 g</b>	<b>30 g</b>	<b>128.3 g</b>	<b>13.6 g</b>
Mleko spożywcze, 2% tłuszczu 300 g Płatki owsiane 150 g Maliny 30 g Orzechy włoskie 15 g Syrop klonowy 15 g Czekolada gorzka 12 g Woda 400 ml				

Tabela 3. Drugie śniadanie - dzień 1

Kanapki z chleba baltonowskiego z szynką z kurczaka i pomidorem				
Energia	Białko	Tłuszcze	Węglowodany	Błonnik
<b>493.6 kcal</b>	<b>20.5 g</b>	<b>15.4 g</b>	<b>65.7 g</b>	<b>5.7 g</b>
Chleb baltonowski 120 g Oliwa z oliwek 10 g Szynka delikatesowa z kurczaka 60 g Pomidor 120 g Sól biała 1 g Pieprz czarny mielony 1 g Woda 400 ml				

Tabela 4. Obiad – dzień 1

Aromatyczny ryż z kurczakiem i brokułem				
Energia	Białko	Tłuszcze	Węglowodany	Błonnik
<b>843.2 kcal</b>	<b>48 g</b>	<b>14.1 g</b>	<b>127.3 g</b>	<b>8.8 g</b>

Brokuły 100 g
Mięso z piersi kurczaka, bez skóry 150 g
Ryż biały 150 g
Cebula 30 g
Kukurydza, konserwowa 30 g
Olej rzepakowy 10 g
Pietruszka, liście 6 g
Kolendra, suszone liście 4 g
Zioła prowansalskie 3 g
Sól biała 1 g
Pieprz czarny mielony 1 g
Woda 400 ml

**Tabela 5. Posilek przedtreningowy – dzień 1**

Wafle ryżowe z dodatkami, żel energetyczny				
Energia	Białko	Tłuszcze	Węglowodany	Błonnik
<b>478.7 kcal</b>	<b>8.4 g</b>	<b>2.4 g</b>	<b>105.2 g</b>	<b>6.1 g</b>
Wafle ryżowe z solą morską 60 g				
Banan 120 g				
Miód pszczeli 15 g				
Izotoniczny żel energetyczny z kofeiną 60 g				
Woda 600 ml				

**Tabela 6. Posilek potreningowy – dzień 1**

Makaron penne z indykiem i warzywami				
Energia	Białko	Tłuszcze	Węglowodany	Błonnik
<b>824.9 kcal</b>	<b>42.4 g</b>	<b>13.8 g</b>	<b>123.4 g</b>	<b>8.5 g</b>
Makaron penne 160 g				
Papryka czerwona 100 g				
Cebula 50 g				
Czosnek 5 g				
Mięso z piersi indyka, bez skóry 100 g				
Oliwa z oliwek 10 g				
Zioła prowansalskie 3 g				
Sól biała 1 g				
Pieprz czarny mielony 1 g				

Woda 500 ml
Monohydrat kreatyny 5 g

## 4.2 Dzień drugi (treningowy)

Tabela 7. Dzielne podsumowanie wartości odżywczych – dzień 2

Energia	Białko	Tłuszcz	Węglowodany	Błonnik
<b>3602.3 kcal</b>	<b>161.1 g</b>	<b>87.2 g</b>	<b>522.1 g</b>	<b>37.9 g</b>

Tabela 8. Śniadanie – dzień 2

Omlet ze szpinakiem i bagietka francuska z pomidorem				
Energia	Białko	Tłuszcze	Węglowodany	Błonnik
<b>662.5 kcal</b>	<b>40.3 g</b>	<b>28.2 g</b>	<b>56.4 g</b>	<b>10.2 g</b>
Jaja kurze całe 224 g (4 sztuki) Masło ekstra 5 g Bagietka francuska 140 g Szpinak 25 g Szczypiorek 10 g Pomidor 120 g Sól biała 1 g Pieprz czarny mielony 1 g Woda 400 ml				

Tabela 9. Drugie śniadanie – dzień 2

Smoothie z owocami i herbatniki				
Energia	Białko	Tłuszcze	Węglowodany	Błonnik
<b>577.1 kcal</b>	<b>22.3 g</b>	<b>17.6 g</b>	<b>79.2 g</b>	<b>6.7 g</b>
Jogurt naturalny 250 g Truskawki 120 g Borówki amerykańskie 100 g Mleko spożywcze, 2% tłuszczu 250 g Herbatniki 30 g Miód pszczeli 15 g				

Tabela 10. Obiad – dzień 2

Dorsz pieczony w piekarniku ze szparagami i batatami
--

Energia	Białko	Tłuszcze	Węglowodany	Błonnik
<b>571.2 kcal</b>	<b>34.1 g</b>	<b>10.8 g</b>	<b>72.1 g</b>	<b>14.6 g</b>
Dorsz świeży, filety bez skóry 150 g Oliwa z oliwek 10 g Szparagi 100 g Bataty 350 g Sól biała 1 g Pieprz czarny mielony 1 g Woda 400 ml				

**Tabela 11. Posilek przedtreningowy – dzień 2**

Kasza manna na mleku z dodatkami, żel energetyczny				
Energia	Białko	Tłuszcze	Węglowodany	Błonnik
<b>707.5 kcal</b>	<b>22.6 g</b>	<b>16.9 g</b>	<b>113.5 g</b>	<b>6.1 g</b>
Kasza manna 60 g Mleko spożywcze, 2 % tłuszczu 400 g Gruszka 130 g Syrop klonowy 15 g Migdały 15 g Izotoniczny żel energetyczny z kofeiną 60 g Woda 600 ml				

**Tabela 12. Posilek potreniingowy – dzień 2**

Leczo z kurczaka z ryżem				
Energia	Białko	Tłuszcze	Węglowodany	Błonnik
<b>956.2 kcal</b>	<b>39.2 g</b>	<b>13.8 g</b>	<b>165.3 g</b>	<b>9.2 g</b>
Ryż biały 200 g Passata pomidorowa z ziołami 175 g Cukinia 100 g Mięso z piersi kurczaka, bez skóry 100 g Oliwa z oliwek 10 g Sól biała 1 g Pieprz czarny mielony 1 g Woda 500 ml Monohydrat kreatyny 5 g				

## 4.3 Dzień trzeci (nietreningowy)

Tabela 13. Dzielne podsumowanie wartości odżywczych – dzień 3

Energia	Białko	Tłuszcz	Węglowodany	Błonnik
<b>3590.4 kcal</b>	<b>147 g</b>	<b>73.8 g</b>	<b>555.4 g</b>	<b>45.4 g</b>

Tabela 14. Śniadanie – dzień 3

Kanapki z szynką z kurczaka, awokado i warzywami				
Energia	Białko	Tłuszcze	Węglowodany	Błonnik
<b>591.8 kcal</b>	<b>27.2 g</b>	<b>10.9 g</b>	<b>92.6 g</b>	<b>7.2 g</b>
Chleb pszenny 120 g Szynka z piersi kurczaka 60 g Awokado 50 g Pomidor 120 g Sałata 30 g Sok pomarańczowy 250 g				

Tabela 15. Drugie śniadanie – dzień 3

Chrupkie pieczywo kukurydziane z serkiem homogenizowanym				
Energia	Białko	Tłuszcze	Węglowodany	Błonnik
<b>588.9 kcal</b>	<b>30 g</b>	<b>6.7 g</b>	<b>101.1 g</b>	<b>3.4 g</b>
Pieczywo chrupkie kukurydziane 90 g Serek twarogowy, homogenizowany, truskawkowy 150 g Woda 400 ml				

Tabela 16. Obiad – dzień 3

Makaron tagliatelle z polędwicą wołową				
Energia	Białko	Tłuszcze	Węglowodany	Błonnik
<b>804.7 kcal</b>	<b>39 g</b>	<b>19.3 g</b>	<b>116.4 g</b>	<b>5.5 g</b>
Wołowina, polędwica 100 g Oliwa z oliwek 12 g Cebula 50 g Czosnek 5 g Makaron tagliatelle 150 g Woda 500 ml				

**Tabela 17. Przekąska – dzień 3**

Płatki kukurydziane z jogurtem naturalnym i dodatkami				
Energia	Białko	Tłuszcze	Węglowodany	Błonnik
<b>803.4 kcal</b>	<b>20.1 g</b>	<b>11.6 g</b>	<b>149.5 g</b>	<b>10.5 g</b>
Płatki kukurydziane 120 g Rodzynki, suszone 40 g Miód pszczeli 20 g Jogurt naturalny 300 g Woda 500 ml				

**Tabela 18. Kolacja – dzień 3**

Komosa ryżowa z ciecierzycą i warzywami				
Energia	Białko	Tłuszcze	Węglowodany	Błonnik
<b>801.6 kcal</b>	<b>30.7 g</b>	<b>25.3 g</b>	<b>95.8 g</b>	<b>18.8 g</b>
Komosa ryżowa 100 g Ciecierzycy 70 g Papryka czerwona 100 g Pomidory koktajlowe 100 g Oliwa z oliwek 15 g Sól biała 1 g Pieprz czarny mielony 1 g Woda 600 ml Monohydrat kreatyny 5 g				

## 4.4 Dzień czwarty (treningowy)

**Tabela 19. Dzielne podsumowanie wartości odżywczych – dzień 4**

Energia	Białko	Tłuszcz	Węglowodany	Błonnik
<b>3594.9 kcal</b>	<b>161.7 g</b>	<b>72.5 g</b>	<b>551.1 g</b>	<b>41.3 g</b>

**Tabela 20. Śniadanie – dzień 4**

Bananowy omlet z borówkami				
Energia	Białko	Tłuszcze	Węglowodany	Błonnik
<b>701.9 kcal</b>	<b>36.6 g</b>	<b>24.8 g</b>	<b>79.6 g</b>	<b>8.9 g</b>
Skyr waniliowy 100 g Banan 120 g				

Jaja kurze całe 112 g (2 sztuki)
Borówki amerykańskie 50 g
Płatki owsiane 50 g
Mleko spożywcze 2 % tłuszczu 40 g
Orzechy arachidowe 15 g
Oliwa z oliwek 2 g
Cynamon 2 g
Sól morską 0.3 g
Woda 400 ml

**Tabela 21. Drugie śniadanie – dzień 4**

Półbagietka pszenna z łososiem wędzonym i ogórkiem				
Energia	Białko	Tłuszcze	Węglowodany	Błonnik
<b>625.5 kcal</b>	<b>31.9 g</b>	<b>15.1 g</b>	<b>88.1 g</b>	<b>4.7 g</b>
Półbagietka pszenna 150 g				
Łosoś, wędzony 80 g				
Ogórek 40 g				
Masło ekstra 5 g				
Woda 400 ml				

**Tabela 22. Obiad – dzień 4**

Indyk pieczony z ziemniakami i surówką z tartej marchewki				
Energia	Białko	Tłuszcze	Węglowodany	Błonnik
<b>662.7 kcal</b>	<b>30 g</b>	<b>17.9 g</b>	<b>93 g</b>	<b>13.8 g</b>
Ziemniaki 490 g				
Mięso z piersi indyka, bez skóry 100 g				
Oliwa z oliwek 11 g				
Pieprz czarny mielony 1 g				
Sól biała 1 g				
Marchew 45 g				
Jabłko 70 g				
Olej rzepakowy 5 g				
Chrzan tarty 5 g				
Woda 500 ml				

**Tabela 23. Posilek przedtreningowy – dzień 4**

Wafle ryżowe z dodatkami, żel energetyczny				
Energia	Białko	Tłuszcze	Węglowodany	Błonnik
<b>623.3 kcal</b>	<b>9.8 g</b>	<b>2.7 g</b>	<b>137.7 g</b>	<b>4.5 g</b>
Wafle ryżowe naturalne 90 g Banan 120 g Miód pszczeli 24 g Izotoniczny żel energetyczny z kofeiną 60 g Woda 600 ml				

**Tabela 24. Posilek potreningowy – dzień 4**

Makaron penne z kaczką i warzywami, posypany parmezanem				
Energia	Białko	Tłuszcze	Węglowodany	Błonnik
<b>982.5 kcal</b>	<b>53.4 g</b>	<b>12 g</b>	<b>152.7 g</b>	<b>9.4 g</b>
Czosnek 5 g Cebula 50 g Papryka czerwona 80 g Filet z piersi kaczki, bez skóry 80 g Śmietana, 12% tłuszczu 30 g Makaron penne 200 g Ser, parmezan 5 g Pieprz czarny mielony 1 g Woda 500 ml Monohydrat kreatyny 5 g				

## 4.5 Dzień piąty (treningowy)

**Tabela 25. Dzielne podsumowanie wartości odżywczych – dzień 5**

Energia	Białko	Tłuszcz	Węglowodany	Błonnik
<b>3602.5 kcal</b>	<b>139.9 g</b>	<b>74.9 g</b>	<b>561.7 g</b>	<b>43.7 g</b>

**Tabela 26. Śniadanie – dzień 5**

Ryżanka na mleku z owocami, orzechami i miodem				
Energia	Białko	Tłuszcze	Węglowodany	Błonnik
<b>849.9 kcal</b>	<b>21.2 g</b>	<b>14.7 g</b>	<b>153.1 g</b>	<b>6.2 g</b>
Płatki ryżowe 120 g				

Mleko spożywcze, 2% tłuszczu 300 g  
 Banan 120 g  
 Orzechy pekan 10 g  
 Czarne jagody 50 g  
 Miód pszczeli 15 g  
 Woda 400 ml

**Tabela 27. Drugie śniadanie – dzień 5**

Quesadilla z kurczakiem				
Energia	Białko	Tłuszcze	Węglowodany	Błonnik
<b>983.9 kcal</b>	<b>65.8 g</b>	<b>33.2 g</b>	<b>96.7 g</b>	<b>9.4 g</b>
Tortilla pszenna 160 g Mięso z piersi kurczaka, bez skóry 150 g Kukurydza, konserwowa 30 g Cebula 50 g Papryka czerwona 100 g Ser, gouda tłusty 60 g Oliwa z oliwek 5 g Woda 400 ml				

**Tabela 28. Obiad – dzień 5**

Kasza jęczmienna z fasolą i warzywami				
Energia	Białko	Tłuszcze	Węglowodany	Błonnik
<b>550.3 kcal</b>	<b>15.6 g</b>	<b>12.8 g</b>	<b>85.2 g</b>	<b>12.6 g</b>
Kasza jęczmienna, pęczak 100 g Fasola czerwona w zalewie (konserwowa) 80 g Pomidor 120 g Cebula 50 g Kapusta pekińska 30 g Pietruszka, liście 12 g Oliwa z oliwek 10 g Pieprz czarny mielony 1 g Sól himalajska 1 g Czosnek granulowany 1 g Woda 500 ml				

**Tabela 29. Posilek przedtreningowy – dzień 5**

Wafle ryżowe z pieczonym jabłkiem, żel energetyczny				
Energia	Białko	Tłuszcze	Węglowodany	Błonnik
<b>618.4 kcal</b>	<b>10.3 g</b>	<b>3.3 g</b>	<b>132.7 g</b>	<b>8.5 g</b>
Wafle ryżowe naturalne 100 g Jabłko 150 g Cynamon 5 g Miód pszczeli 20 g Izotoniczny żel energetyczny z kofeiną 60 g Woda 600 ml				

**Tabela 30. Posilek potreniingowy – dzień 5**

Bajgle z pastą z tuńczyka i warzywami				
Energia	Białko	Tłuszcze	Węglowodany	Błonnik
<b>600 kcal</b>	<b>27 g</b>	<b>10.9 g</b>	<b>94 g</b>	<b>7 g</b>
Bajgiel pełnoziarnisty 160 g Papryka czerwona 70 g Tuńczyk w sosie własnym 45 g Ogórek 40 g Serek naturalny do smarowania 25 g Koper ogrodowy 16 g Pieprz czarny mielony 1 g Woda 500 ml Monohydrat kreatyny 5 g				

## 4.6 Dzień szósty (nietreningowy)

**Tabela 31. Dzielne podsumowanie wartości odżywczych – dzień 6**

Energia	Białko	Tłuszcz	Węglowodany	Błonnik
<b>3611.3 kcal</b>	<b>159.8 g</b>	<b>82 g</b>	<b>542.5 g</b>	<b>36.3 g</b>

**Tabela 32. Śniadanie – dzień 6**

Omlet z bananem i twarogiem				
Energia	Białko	Tłuszcze	Węglowodany	Błonnik
<b>861.1 kcal</b>	<b>44.2 g</b>	<b>14.9 g</b>	<b>134.1 g</b>	<b>6.6 g</b>
Mąka pszenna 130 g				

Jaja kurze całe 56 g (1 sztuka)
Mleko spożywcze, 2% tłuszczu 200 g
Twaróg półtłusty naturalny 100 g
Banan 120 g
Cynamon 3 g
Woda 400 ml

**Tabela 33. Drugie śniadanie – dzień 6**

Smoothie na kefirze z owocami				
Energia	Białko	Tłuszcze	Węglowodany	Błonnik
<b>476.5 kcal</b>	<b>23.8 g</b>	<b>10.9 g</b>	<b>68.1 g</b>	<b>8.5 g</b>
Kefir 250 g				
Czarne jagody, mrożone 100 g				
Truskawki, mrożone 100 g				
Mleko spożywcze, 2% tłuszczu 200 g				
Płatki owsiane 50 g				

**Tabela 34. Obiad – dzień 6**

Makaron ryżowy z tofu i warzywami				
Energia	Białko	Tłuszcze	Węglowodany	Błonnik
<b>863.8 kcal</b>	<b>30.8 g</b>	<b>22.7 g</b>	<b>133.4 g</b>	<b>8.8 g</b>
Makaron ryżowy 150 g				
Tofu wędzone 120 g				
Warzywa na patelnię chińskie 200 g				
Olej sezamowy 10 g				
Sos sojowy jasny 15 g				
Imbir 10 g				
Czosnek 5 g				
Woda 500 ml				

**Tabela 35. Przekąska – dzień 6**

Budyń jaglany z borówkami i wiórkami kokosowymi				
Energia	Białko	Tłuszcze	Węglowodany	Błonnik
<b>713.9 kcal</b>	<b>23.5 g</b>	<b>18.2 g</b>	<b>110.9 g</b>	<b>7.5 g</b>
Mleko spożywcze, 2% tłuszczu 400 g				

Borówki amerykańskie 100 g
Kasza jaglana 80 g
Miód pszczeli 30 g
Wiórki kokosowe 12 g
Woda 400 ml

**Tabela 36. Kolacja – dzień 6**

Ryż jaśminowy z kurczakiem i pieczarkami				
Energia	Białko	Tłuszcze	Węglowodany	Błonnik
<b>696 kcal</b>	<b>37.5 g</b>	<b>15.3 g</b>	<b>96 g</b>	<b>4.9 g</b>
Ryż jaśminowy 120 g				
Mięso z piersi kurczaka, bez skóry 100 g				
Pieczarka uprawna 150 g				
Oliwa z oliwek 10 g				
Ser, parmezan 8 g				
Pieprz czarny mielony 1 g				
Woda 500 ml				
Monohydrat kreatyny 5 g				

## 4.7 Dzień siódmy (nietreningowy)

**Tabela 37. Dzielne podsumowanie wartości odżywczych – dzień 7**

Energia	Białko	Tłuszcz	Węglowodany	Błonnik
<b>3606.9 kcal</b>	<b>141.5 g</b>	<b>87.7 g</b>	<b>530.5 g</b>	<b>38.4 g</b>

**Tabela 38. Śniadanie – dzień 7**

Tortilla z serem śmietankowym, polędwicą z kurczaka i warzywami				
Energia	Białko	Tłuszcze	Węglowodany	Błonnik
<b>704.4 kcal</b>	<b>29.9 g</b>	<b>21.6 g</b>	<b>90.1 g</b>	<b>6.9 g</b>
Tortilla pszenna 160 g				
Serek śmietankowy szczypiorek i cebula 40 g				
Ogórek 80 g				
Pomidory koktajlowe 100 g				
Polędwica z piersi kurczaka 60 g				
Woda 400 ml				

**Tabela 39. Drugie śniadanie – dzień 7**

Chlebek bananowy				
Energia	Białko	Tłuszcze	Węglowodany	Błonnik
<b>584.9 kcal</b>	<b>11 g</b>	<b>21.3 g</b>	<b>83.5 g</b>	<b>8.6 g</b>
Banan 150 g Płatki owsiane 80 g Olej rzepakowy 15 g Cynamon 1 g Soda oczyszczona 3 g Proszek do pieczenia 2 g Sól biała 1 g Woda 400 ml				

**Tabela 40. Obiad – dzień 7**

Makaron orzo z pieczonym łososiem i szpinakiem				
Energia	Białko	Tłuszcze	Węglowodany	Błonnik
<b>985.8 kcal</b>	<b>45.3 g</b>	<b>34.2 g</b>	<b>119.7 g</b>	<b>7.7 g</b>
Makaron orzo 150 g Łosoś, świeży 100 g Szpinak 100 g Czosnek 5 g Jogurt grecki 100 g Oliwa z oliwek 10 g Sól biała 1 g Woda 500 ml				

**Tabela 41. Przekąska – dzień 7**

Bowl ze skyrem waniliowym, płatkami migdałowymi i owocami				
Energia	Białko	Tłuszcze	Węglowodany	Błonnik
<b>536.8 kcal</b>	<b>20.1 g</b>	<b>7.3 g</b>	<b>93.5 g</b>	<b>10.3 g</b>
Truskawki 120 g Banan 120 g Skyr waniliowy 150 g Kiwi 100 g Jabłko 150 g				

Migdały w płatkach 10 g
Miód pszczeli 20 g
Woda 400 ml

Tabela 42. Kolacja – dzień 7

Ryż basmati z krewetkami na ostro				
Energia	Białko	Tłuszcze	Węglowodany	Błonnik
<b>795 kcal</b>	<b>35.2 g</b>	<b>3.3 g</b>	<b>143.7 g</b>	<b>4.9 g</b>
Ryż basmati 150 g				
Cebula 50 g				
Czosnek 5 g				
Papryczka chili 20 g				
Krewetki 150 g				
Sos sojowy ciemny 20 g				
Miód pszczeli 20 g				
Kukurydza, konserwowa 30 g				
Szczypiorek 30 g				
Woda 500 ml				
Monohydrat kreatyny 5 g				

## 4.8 Podsumowanie jadłospisu

Tabela 43. Podsumowanie wartości energetycznej i odżywczej jadłospisu z 7 dni

	Założenia jadłospisu	Średnia z jadłospisu	% realizacji
<b>Energia</b>	3598 kcal	3598.0 kcal	100%
<b>Białko</b>	153 g	151.7 g	99%
<b>Tłuszcze</b>	80 g	79.1 g	99%
<b>Węglowodany</b>	566.5 g	544.7 g	96%
<b>Błonnik</b>	40 g	40.8 g	102%
<b>Nawodnienie</b>	~ 3500 ml	3623.7 ml	104%

Nadrzędne założenia jadłospisu obejmowały zapewnienie odpowiedniej ilości kalorii, białka oraz węglowodanów w celu dostarczenia zarówno składników budulcowych, jak i energii niezbędnej w procesie budowania mięśni, co udało się osiągnąć. Ponadto istotny element stanowiła podaż odpowiedniej ilości tłuszczów w celu zapobiegania niedoborom oraz uwzględnienie błonnika ze świeżych warzyw i owoców by zapewnić prawidłową pracę układu

pokarmowego. Zastosowanie produktów zbożowych z pszenicy, takich jak makarony lub bagietki, jest również uzasadnione w tym przypadku, gdyż jest to dieta wysokokaloryczna, w której podaż błonnika jest wystarczająca z samych warzyw i owoców, a jego nadmiar mógłby skutkować dyskomfortem i dolegliwościami ze strony układu pokarmowego. Co więcej, zastosowanie łatwo przyswajalnych produktów węglowodanowych w połączeniu z cukrami prostymi takimi jak miód ma zastosowanie w dni treningowe jako metoda przedtreningowego wysycenia mięśni glikogenem i zapewnienia niezbędnych podczas wysiłku substratów energetycznych. W jadłospisie uwzględnione zostały również aspekty nawodnienia oraz suplementacji. Należy jednak pamiętać, że sprawy te pozostają wysoce zależne od indywidualnych potrzeb jednostki i powinny być dostosowywane po należytej obserwacji.

## SPIS TABEL

Tabela 1. Dzielne podsumowanie wartosci odzywczych - dzien 1.....	50
Tabela 2. Sniadanie - dzien 1.....	50
Tabela 3. Drugie sniadanie - dzien 1.....	50
Tabela 4. Obiad – dzien 1.....	50
Tabela 5. Posilek przedtreningowy – dzien 1.....	51
Tabela 6. Posilek potreniugowy – dzien 1.....	51
Tabela 7. Dzielne podsumowanie wartosci odzywczych – dzien 2.....	52
Tabela 8. Sniadanie – dzien 2.....	52
Tabela 9. Drugie sniadanie – dzien 2.....	52
Tabela 10. Obiad – dzien 2.....	52
Tabela 11. Posilek przedtreningowy – dzien 2.....	53
Tabela 12. Posilek potreniugowy – dzien 2.....	53
Tabela 13. Dzielne podsumowanie wartosci odzywczych – dzien 3.....	54
Tabela 14. Sniadanie – dzien 3.....	54
Tabela 15. Drugie sniadanie – dzien 3.....	54
Tabela 16. Obiad – dzien 3.....	54
Tabela 17. Przekaska – dzien 3.....	55
Tabela 18. Kolacja – dzien 3.....	55
Tabela 19. Dzielne podsumowanie wartosci odzywczych – dzien 4.....	55
Tabela 20. Sniadanie – dzien 4.....	55
Tabela 21. Drugie sniadanie – dzien 4.....	56
Tabela 22. Obiad – dzien 4.....	56
Tabela 23. Posilek przedtreningowy – dzien 4.....	57
Tabela 24. Posilek potreniugowy – dzien 4.....	57
Tabela 25. Dzielne podsumowanie wartosci odzywczych – dzien 5.....	57
Tabela 26. Sniadanie – dzien 5.....	57
Tabela 27. Drugie sniadanie – dzien 5.....	58
Tabela 28. Obiad – dzien 5.....	58
Tabela 29. Posilek przedtreningowy – dzien 5.....	59
Tabela 30. Posilek potreniugowy – dzien 5.....	59
Tabela 31. Dzielne podsumowanie wartosci odzywczych – dzien 6.....	59
Tabela 32. Sniadanie – dzien 6.....	59
Tabela 33. Drugie sniadanie – dzien 6.....	60
Tabela 34. Obiad – dzien 6.....	60
Tabela 35. Przekaska – dzien 6.....	60
Tabela 36. Kolacja – dzien 6.....	61
Tabela 37. Dzielne podsumowanie wartosci odzywczych – dzien 7.....	61
Tabela 38. Sniadanie – dzien 7.....	61
Tabela 39. Drugie sniadanie – dzien 7.....	62
Tabela 40. Obiad – dzien 7.....	62
Tabela 41. Przekaska – dzien 7.....	62
Tabela 42. Kolacja – dzien 7.....	63
Tabela 43. Podsumowanie wartosci energetycznej i odzywczej jadlospisu z 7 dni.....	63

## SPIS RYCIN

Rycina 1. Metaanaliza przedstawiająca zależność pomiędzy uprawianiem i nieuprawianiem treningu oporowego a umieralnością [14].....	13
Rycina 2. Zależność pomiędzy obrotem ATP i wykorzystaniem systemów energetycznych a czasem wysiłku [21].....	14
Rycina 3. Schemat szlaku syntezy białek związanych z kompleksem mTORC1 [26]..	17
Rycina 4. Schematyczny model DOMS w odpowiedzi na trening oporowy, zmodyfikowano na podstawie [48].....	25
Rycina 5. Koncept ‘bodźca’ leucynowego porównujący efekt białka serwatkowego, sojowego i kazeiny [55].....	32
Rycina 6. Uproszczony schemat metabolizmu glikogenu podczas wysiłku i spoczynku [58].....	34
Rycina 7. Ilustracja reprezentująca stężenie kwasów tłuszczowych i glicerolu w osoczu w okresie wysiłku i po nim [60] .....	36
Rycina 8. Ilość powtórzeń w poszczególnych ćwiczeniach i seriach, w warunkach ekspozycji na ciepło (HE) i odwodnienia (DEHY) [65].....	41

## BIBLIOGRAFIA

- 1 Heitz E. QuickStats: Percentage of Adults Aged  $\geq 18$  Years Who Met the Federal Guidelines for Muscle-Strengthening Physical Activity,† by Age Group and Sex — National Health Interview Survey, United States, 2020§. *MMWR Morb Mortal Wkly Rep.* 2025;71:642. doi: 10.15585/MMWR.MM7118A6
- 2 Bennie JA, De Cocker K, Smith JJ, *et al.* The epidemiology of muscle-strengthening exercise in Europe: A 28-country comparison including 280,605 adults. *PLoS One.* 2020;15:e0242220. doi: 10.1371/JOURNAL.PONE.0242220
- 3 Scholler J, Otis JS. Exercise as a community treatment for obesity and the metabolic disease epidemic. *J Clin Transl Sci.* 2023;7. doi: 10.1017/cts.2023.631
- 4 Hughes DC, Ellefsen S, Baar K. Adaptations to endurance and strength training. *Cold Spring Harb. Perspect. Med.* 2018;8.
- 5 Schoenfeld BJ. The mechanisms of muscle hypertrophy and their application to resistance training.
- 6 Carroll TJ, Riek S, Carson RG. Neural Adaptations to Resistance Training Implications for Movement Control. 2001.
- 7 Wilson J, Wilson GJ. Contemporary Issues in Protein Requirements and Consumption for Resistance Trained Athletes. 2006.
- 8 Fernández-Lázaro D, Arribalzaga S, Gutiérrez-Abejón E, *et al.* Omega-3 Fatty Acid Supplementation on Post-Exercise Inflammation, Muscle Damage, Oxidative Response, and Sports Performance in Physically Healthy Adults—A Systematic Review of Randomized Controlled Trials. *Nutrients.* 2024;16.
- 9 Slater GJ, Dieter BP, Marsh DJ, *et al.* Is an Energy Surplus Required to Maximize Skeletal Muscle Hypertrophy Associated With Resistance Training. *Front. Nutr.* 2019;6.
- 10 Heffernan SM, Horner K, De Vito G, *et al.* The role of mineral and trace element supplementation in exercise and athletic performance: a systematic review. *Nutrients.* 2019;11. doi: 10.3390/nu11030696
- 11 Currier BS, D’Souza AC, Singh MAF, *et al.* American College of Sports Medicine Position Stand. Resistance Training Prescription for Muscle Function, Hypertrophy, and Physical Performance in Healthy Adults: An Overview of Reviews. *Med Sci Sports Exerc.* 2026;58:851–72. doi: 10.1249/MSS.0000000000003897
- 12 Westcott WL. Resistance Training is Medicine: Effects of Strength Training on Health. 2012.
- 13 Nazir A, Heryaman H, Juli C, *et al.* Resistance Training in Cardiovascular Diseases: A Review on Its Effectiveness in Controlling Risk Factors. *Integr. Blood Press. Control.* 2024;17:21–37.
- 14 Shailendra P, Baldock KL, Li LSK, *et al.* Resistance Training and Mortality Risk: A Systematic Review and Meta-Analysis. *Am. J. Prev. Med.* 2022;63:277–85.
- 15 Chen N, He X, Feng Y, *et al.* Effects of resistance training in healthy older people with sarcopenia: a systematic review and meta-analysis of randomized controlled trials. *European Review of Aging and Physical Activity.* 2021;18.

- 16 Lauersen JB, Andersen TE, Andersen LB. Strength training as superior, dose-dependent and safe prevention of acute and overuse sports injuries: A systematic review, qualitative analysis and meta-analysis. *Br. J. Sports Med.* 2018;52:1557–63.
- 17 Chen Z, Wang J, Zhao K, *et al.* Adherence to Strength Training and Lower Rates of Sports Injury in Contact Sports: A Systematic Review and Meta-analysis. *Orthop. J. Sports Med.* 2025;13.
- 18 Banyard H, Edward KL, Garvey L, *et al.* The Effects of Aerobic and Resistance Exercise on Depression and Anxiety: Systematic Review With Meta-Analysis. *Int. J. Ment. Health Nurs.* 2025;34.
- 19 Marinelli R, Parker AG, Levinger I, *et al.* Resistance training and combined resistance and aerobic training as a treatment of depression and anxiety symptoms in young people: A systematic review and meta-analysis. *Early Interv. Psychiatry.* 2024;18:585–98.
- 20 Amore M, Alfarano A, Sorgente V, *et al.* Single-Bout Strength: Acute Mental Health Responses to Resistance Training in Active Adults. *Sports.* 2025;13. doi: 10.3390/sports13070221
- 21 Baker JS, McCormick MC, Robergs RA. Interaction among skeletal muscle metabolic energy systems during intense exercise. *J. Nutr. Metab.* 2010;2010.
- 22 Sylow L, Møller LLV, Kleinert M, *et al.* Stretch-stimulated glucose transport in skeletal muscle is regulated by Rac1. *Journal of Physiology.* 2015;593:645–56. doi: 10.1113/jphysiol.2014.284281
- 23 Kjerulf B, ‡1 G, O’Brien J, *et al.* EPOC Comparison Between Resistance Training and High-Intensity Interval Training in Aerobically Fit Women. 2021.
- 24 Roberts M, McCarthy J, Hornberger T, *et al.* Mechanisms of mechanical overload-induced skeletal muscle hypertrophy current understanding and future directions. *american physiological society.*
- 25 Mirzoev TM. Mechanotransduction for Muscle Protein Synthesis via Mechanically Activated Ion Channels. Published Online First: 2023. doi: 10.3390/life
- 26 Lim C, Nunes EA, Currier BS, *et al.* An Evidence-Based Narrative Review of Mechanisms of Resistance Exercise-Induced Human Skeletal Muscle Hypertrophy. *Med Sci Sports Exerc.* 2022;54:1546–59. doi: 10.1249/MSS.0000000000002929
- 27 Robinson ZP, Pelland JC, Remmert JF, *et al.* Exploring the Dose–Response Relationship Between Estimated Resistance Training Proximity to Failure, Strength Gain, and Muscle Hypertrophy: A Series of Meta-Regressions. *Sports Medicine.* 2024;54:2209–31. doi: 10.1007/s40279-024-02069-2
- 28 Lecce E, Conti A, Del Vecchio A, *et al.* Cross-education: motor unit adaptations mediate the strength increase in non-trained muscles following 8 weeks of unilateral resistance training. *Front Physiol.* 2024;15. doi: 10.3389/fphys.2024.1512309
- 29 Aslam S, Habyarimana JDD, Bin SY. Neuromuscular adaptations to resistance training in elite versus recreational athletes. *Front. Physiol.* 2025;16.
- 30 Van Every DW, D’Souza AC, Phillips SM. Hormones, Hypertrophy, and Hype: An Evidence-Guided Primer on Endogenous Endocrine Influences on Exercise-Induced Muscle Hypertrophy. *Exerc Sport Sci Rev.* 2024;52:117–25. doi: 10.1249/JES.0000000000000346

- 31 Potter NJ, Tomkinson GR, Dufner TJ, *et al.* Effects of Exercise Training on Resting Testosterone Concentrations in Insufficiently Active Men: A Systematic Review and Meta-Analysis. 2021.
- 32 Yoshida T, Delafontaine P. Mechanisms of IGF-1-Mediated Regulation of Skeletal Muscle Hypertrophy and Atrophy. *Cells*. 2020;9.
- 33 Kraemer WJ, Ratamess NA. Hormonal Responses and Adaptations to Resistance Exercise and Training. 2005.
- 34 Mondal S, Hathi DK, Bhattacharya S, *et al.* The Testosterone: Cortisol Ratio - A Tool with Practical Use and Research Potential in Endocrinology. *Indian J. Endocrinol. Metab.* 2025;29:510–6.
- 35 Schoenfeld BJ, Grgic J, Van Every DW, *et al.* Loading Recommendations for Muscle Strength, Hypertrophy, and Local Endurance: A Re-Examination of the Repetition Continuum. *Sports*. 2021;9. doi: 10.3390/sports9020032
- 36 Baz-Valle E, Balsalobre-Fernández C, Alix-Fages C, *et al.* A Systematic Review of the Effects of Different Resistance Training Volumes on Muscle Hypertrophy. *J. Hum. Kinet.* 2022;81:199–210.
- 37 Singer A, Wolf M, Generoso L, *et al.* Give it a rest: a systematic review with Bayesian meta-analysis on the effect of inter-set rest interval duration on muscle hypertrophy. *Front. Sports Act. Living*. 2024;6.
- 38 Bernárdez-Vázquez R, Raya-González J, Castillo D, *et al.* Resistance Training Variables for Optimization of Muscle Hypertrophy: An Umbrella Review. *Front. Sports Act. Living*. 2022;4.
- 39 Lorenz DS, Reiman MP, Walker JC. Periodization: Current review and suggested implementation for athletic rehabilitation. *Sports Health*. 2010;2:509–18.
- 40 Grgic J, Mikulic P, Podnar H, *et al.* Effects of linear and daily undulating periodized resistance training programs on measures of muscle hypertrophy: A systematic review and meta-analysis. *PeerJ*. 2017;2017. doi: 10.7717/peerj.3695
- 41 Zhang ZY, Ya X, Zhao X, *et al.* Comparison of linear and undulating periodization resistance training on athletic capacities and health promotion: a systematic review and meta-analysis. *Front. Public Health*. 2026;14.
- 42 Ivy JL. Regulation of muscle glycogen repletion, muscle protein synthesis and repair following exercise. *Las* 2004.
- 43 Alghannam AF, Gonzalez JT, Betts JA. Restoration of muscle glycogen and functional capacity: Role of post-exercise carbohydrate and protein co-ingestion. *Nutrients*. 2018;10. doi: 10.3390/nu10020253
- 44 Sousa CA, Zourdos MC, Storey AG, *et al.* The Importance of Recovery in Resistance Training Microcycle Construction. *Journal of Human Kinetics* . 2024;91:205–23.
- 45 Hingst JR, Bruhn L, Hansen MB, *et al.* Exercise-induced molecular mechanisms promoting glycogen supercompensation in human skeletal muscle. *Mol Metab.* 2018;16:24–34. doi: 10.1016/j.molmet.2018.07.001
- 46 Matsui T, Ishikawa T, Ito H, *et al.* Brain glycogen supercompensation following exhaustive exercise. *Journal of Physiology*. 2012;590:607–16. doi: 10.1113/jphysiol.2011.217919

- 47 Calle MC, Fernandez ML. Effects of resistance training on the inflammatory response. *Nutr Res Pract.* 2010;4:259. doi: 10.4162/nrp.2010.4.4.259
- 48 Wilke J, Behringer M. Is “delayed onset muscle soreness” a false friend? The potential implication of the fascial connective tissue in post-exercise discomfort. *Int. J. Mol. Sci.* 2021;22.
- 49 Kim J, Lee J. A review of nutritional intervention on delayed onset muscle soreness. Part I. *J Exerc Rehabil.* 2014;10:349–56. doi: 10.12965/jer.140179
- 50 Kaczmarek F, Bartkowiak-Wieczorek J, Matecka M, *et al.* Sleep and Athletic Performance: A Multidimensional Review of Physiological and Molecular Mechanisms. *J. Clin. Med.* 2025;14.
- 51 Su Z, Xiang L. Exercise, circadian rhythms, and muscle regeneration: a path to healthy aging. *Front. Neurosci.* 2025;19.
- 52 Lopes FAS, Panissa VLG, Julio UF, *et al.* The effect of active recovery on power performance during the bench press exercise. *J Hum Kinet.* 2014;40:161–9. doi: 10.2478/hukin-2014-0018
- 53 Grandou C, Wallace L, Impellizzeri FM, *et al.* Overtraining in Resistance Exercise: An Exploratory Systematic Review and Methodological Appraisal of the Literature. *Sports Medicine.* 2020;50:815–28.
- 54 Helms ER, Kwan K, Sousa CA, *et al.* Methods for Regulating and Monitoring Resistance Training. *J Hum Kinet.* 2020;74:23–42. doi: 10.2478/hukin-2020-0011
- 55 Phillips SM. A brief review of critical processes in exercise-induced muscular hypertrophy. *Sports Medicine.* 2014;44. doi: 10.1007/s40279-014-0152-3
- 56 Jäger R, Kerksick CM, Campbell BI, *et al.* International Society of Sports Nutrition Position Stand: Protein and exercise. *J. Int. Soc. Sports Nutr.* 2017;14.
- 57 Henselmans M, Bjørnsen T, Hedderman R, *et al.* The Effect of Carbohydrate Intake on Strength and Resistance Training Performance: A Systematic Review. *Nutrients.* 2022;14.
- 58 Murray B, Rosenbloom C. Fundamentals of glycogen metabolism for coaches and athletes. *Nutr Rev.* 2018;76:243–59. doi: 10.1093/NUTRIT/NUY001
- 59 Naderi A, Rothschild JA, Santos HO, *et al.* Nutritional Strategies to Improve Post-exercise Recovery and Subsequent Exercise Performance: A Narrative Review. *Sports Medicine.* 2025;55:1559–77.
- 60 Lundsgaard AM, Fritzen AM, Kiens B. The importance of fatty acids as nutrients during post-exercise recovery. *Nutrients.* 2020;12.
- 61 Therdyothin A, Phiphophatsanee N. The Effect of Omega-3 on Mitigating Exercise-Induced Muscle Damage. *Cureus.* Published Online First: 1 April 2025. doi: 10.7759/cureus.81559
- 62 Ruiz-Castellano C, Espinar S, Contreras C, *et al.* Achieving an optimal fat loss phase in resistance-trained athletes: A narrative review. *Nutrients.* 2021;13.
- 63 Roth C, Schoenfeld BJ, Behringer M. Lean mass sparing in resistance-trained athletes during caloric restriction: the role of resistance training volume. *Eur. J. Appl. Physiol.* 2022;122:1129–51.

- 64 Judge LW, Bellar DM, Popp JK, *et al.* Hydration to Maximize Performance and Recovery: Knowledge, Attitudes, and Behaviors among Collegiate Track and Field Throwers. *J Hum Kinet.* 2021;79:111–22. doi: 10.2478/hukin-2021-0065
- 65 Kraft JA, Green JM, Bishop PA, *et al.* Impact of dehydration on a full body resistance exercise protocol. *Eur J Appl Physiol.* 2010;109:259–67. doi: 10.1007/s00421-009-1348-3
- 66 Judelson DA, Maresh CM, Farrell MJ, *et al.* Effect of hydration state on strength, power, and resistance exercise performance. *Med Sci Sports Exerc.* 2007;39:1817–24. doi: 10.1249/mss.0b013e3180de5f22
- 67 Francisco R, Jesus F, Di Vincenzo O, *et al.* Assessment of exercise-induced dehydration in underhydrated athletes: Which method shows the most promise? *Clinical Nutrition.* 2024;43:2139–48. doi: 10.1016/j.clnu.2024.08.003
- 68 McDermott BP, Anderson SA, Armstrong LE, *et al.* National athletic trainers' association position statement: Fluid replacement for the physically active. *J. Athl. Train.* 2017;52:877–95.
- 69 The Science of Hydration: How Much Water Should You Drink? | American Physiological Society. <https://www.physiology.org/publications/news/the-physiologist-magazine/2021/july/the-science-of-hydration?SSO=Y> (accessed 7 May 2026)
- 70 Armstrong LE, Johnson EC. Water intake, water balance, and the elusive daily water requirement. *Nutrients.* 2018;10.
- 71 Wang L, Meng Q, Su CH. From Food Supplements to Functional Foods: Emerging Perspectives on Post-Exercise Recovery Nutrition. *Nutrients.* 2024;16.
- 72 Hwang DJ, Yang HJ. Nutritional Strategies for Enhancing Performance and Training Adaptation in Weightlifters. *Int. J. Mol. Sci.* 2025;26.
- 73 Kaufman M, Nguyen C, Shetty M, *et al.* Popular Dietary Trends' Impact on Athletic Performance: A Critical Analysis Review. *Nutrients.* 2023;15.
- 74 Tosti V, Bertozzi B, Fontana L. Health Benefits of the Mediterranean Diet: Metabolic and Molecular Mechanisms. *Journals of Gerontology - Series A Biological Sciences and Medical Sciences.* 2018;73:318–26.
- 75 PPM - Wzór Harris-Benedicta kalkulator | Program dla dietetyków | Dietetykpro. <https://dietetykpro.pl/kalkulatory/ppm-harris-benedict> (accessed 7 May 2026)