

Akademia Wychowania Fizycznego i Sportu

im. Jędrzeja Śniadeckiego w Gdańsku

Wydział Kultury Fizycznej



mgr inż. Dawid Perenc

**EFEKT PO-AKTYWACYJNEGO WZROSTU
SPRAWNOŚCI FIZYCZNEJ (PAPE) KOŃCZYN
DOLNYCH PO ZASTOSOWANIU
SUPRAMAKSYMALNYCH OBCIĄŻEŃ
TRENINGOWYCH**

promotor:

dr hab. Michał Krzysztofik prof. AWF Katowice

Gdańsk 2023

Spis treści

1. WPROWADZENIE TEORETYCZNE	4
2. WYKORZYSTANIE EFEKTU PAPE W PRAKTYCE TRENINGOWEJ	8
2.1. Wpływ intensywności treningowej ćwiczenia aktywacyjnego na wystąpienie efektu PAPE	9
2.2. Wpływ objętości treningowej ćwiczenia aktywacyjnego na wystąpienie efektu PAPE	11
2.3. Wpływ czasu trwania przerwy wypoczynkowej na wystąpienie efektu PAPE	13
3. POTENCJALNE MECHANIZMY LEŻĄCE U PODSTAW ZJAWISKA PAPE	15
4. WYKORZYSTANIE FAZY EKSCENTRYCZNEJ W KSZTAŁTOWANIU MOCY MIĘŚNIOWEJ	19
5. PROBLEMATYKA, CEL PRACY, PYTANIA I HIPOTEZY BADAWCZE	23
5.1. Problem badawczy	23
5.2. Cel pracy, pytania i hipotezy badawcze	26
6. MATERIAŁ I METODY BADAWCZE	29
6.1. Materiał badawczy	29
6.2. Metody badawcze	30
6.2.1. Sesja zapoznawcza i test 1RM w przysiadzie ze sztangą	31
6.2.2. Ćwiczenia aktywacyjne	32
6.2.3. Termografia	33
6.2.4. Pomiar sprawności w skoku pionowym	34
6.2.5. Miotonometria	34
6.3. Metody analizy statystycznej	35
7. WYNIKI	37
7.1. Rzetelność pomiarów	37
7.2. Efektywność ćwiczeń aktywacyjnych w badanej grupie	38
7.3. Wysokość i poziom względnej mocy mięśniowej podczas skoku pionowego	38
7.4. Wysokość i poziom względnej mocy mięśniowej podczas skoku pionowego po indywidualnej optymalnej przerwie czasowej	38
7.5. Biomechaniczne właściwości mięśni	40
7.5.1. Biomechaniczne właściwości głowy bocznej mięśnia czworogłowego uda po indywidualnej optymalnej przerwie czasowej	40
7.6. Temperatura powierzchniowa skóry	42
7.6.1. Temperatura powierzchniowa skóry po indywidualnej optymalnej przerwie czasowej	42
7.7. Powiązania między analizowanymi parametrami	43
8. DYSKUSJA	45
9. WNIOSKI	53
Streszczenie	54
Summary	56

Bibliografia	58
Spis tabel	76
Spis rycin	76
Spis wykresów	76

OZNACZENIA I SKRÓTY UŻYTE W PRACY

ANOVA – analysis of variance = analiza wariancji

BA – baseline = wartość wyjściowa

CA – conditioning activity = ćwiczenie aktywacyjne

CI – confidence interval = przedział ufności

CMJ – countermovement jump = skok pionowy bez zamachu ramion

CV – coefficient of variation = współczynnik zmienności

ICC – intraclass correlation coefficient = współczynnik korelacji wewnątrzklasowej

MRLC – myosin regulatory light chain = lekki regulacyjny łańcuch miozyny

PAP – post-activation potentiation = wzmocnienie po-aktywacyjne

PAPE – post-activation performance enhancement = po-aktywacyjny wzrost sprawności fizycznej

SD – standard deviation = odchylenie standardowe

SWC – smallest worthwhile change = minimalna istotna zmiana

WR – weight releaser = przybór zwalniający obciążenie zewnętrzne

1RM – one repetition maximum = jedno powtórzenie maksymalne

1. WPROWADZENIE TEORETYCZNE

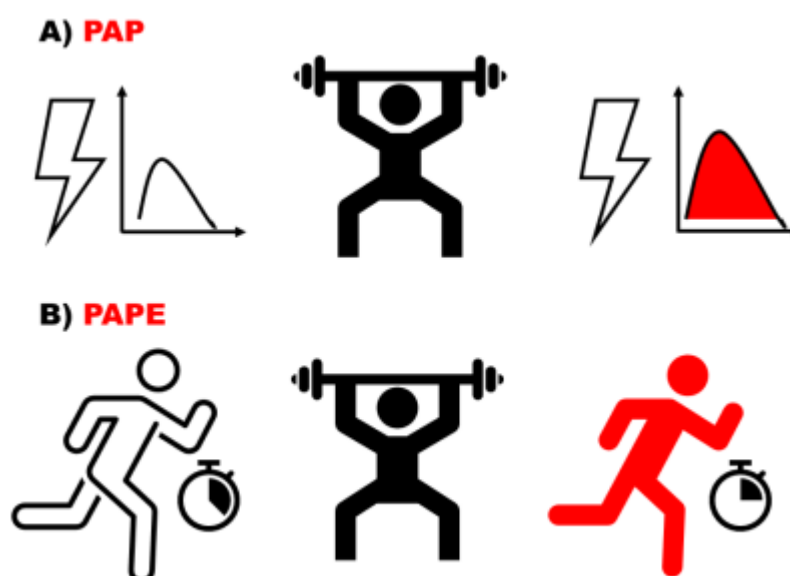
Odnotowywany wzrost poziomu sportowego jest wynikiem nieustannego doskonalenia dotychczasowych metod treningowych i poszukiwania nowych rozwiązań (Bompa i Haff, 1994). Wyraźną i natychmiastową poprawę wyników sportowych można osiągnąć poprzez zastosowanie różnych strategii treningowych lub psychologicznych w trakcie sesji treningowych czy rywalizacji sportowej (lub bezpośrednio przed nią). W odniesieniu do znaczącej poprawy wyników sportowych wiele uwagi poświęcono zastosowaniu strategii wywołujących wzmocnienie po-aktywacyjne (post-activation potentiation - PAP) (Zimmermann i wsp., 2020). Zjawisko PAP definiowane jest jako zwiększona odpowiedź skurczowa mięśnia (weryfikowana stymulacją elektryczną) na dany bodziec po intensywnym skurczu dobrowolnym (MacIntosh i wsp., 2012). Badania dotyczące efektu PAP mają długą historię naukową sięgającą lat 40. XX wieku (Ramsey i Street, 1941). Niemniej do dnia dzisiejszego istnieją kontrowersje dotyczące mechanizmów leżących u podstaw odnotowywanego wzrostu siły skurczu mięśniowego.

Uważa się, że wzrost możliwości kurczliwych mięśnia można tłumaczyć zwiększoną fosforylacją lekkiego regulacyjnego łańcucha miozyny (myosin regulatory light chain - MRLC) na skutek intensywnych skurczów mięśniowych, powodując tym samym zwiększoną wrażliwość aktyny i włókien miozynowych na jony wapnia Ca^{2+} (Sale, 2004; Sygulla i Fountaine, 2014), zwiększonym poziomem rekrutacji jednostek motorycznych wyższego rzędu (motoneuronów alfa) w trakcie wykonywania eksplozywnych czynności ruchowych (Tillin i Bishop, 2009; Yetter i Moir, 2008), a także hipotetycznie wzrostem kąta natarcia włókien mięśniowych w odniesieniu do połączenia mięśniowo-ścięgnistego (Fukunaga i wsp., 1997; Hunter i Brown, 2010).

Potencjalnie wysoka aplikacyjność zastosowania efektu PAP w warunkach treningowych, a także rywalizacji sportowej sprawiła, że stała się to metoda powszechnie stosowana w celu zwiększenia potencjału kształtowania siły i mocy mięśniowej. W praktyce zjawisko to wykorzystuje się w treningu kompleksowym tworząc pary ćwiczeń (strength-power potentiating complexes) w ramach jednej serii np. 3 powtórzeń przysiadu ze sztangą o wysokiej intensywności (~80% jednego powtórzenia maksymalnego [1RM]) jako ćwiczenia aktywacyjnego (CA), a następnie po zastosowaniu indywidualnego czasu trwania przerwy wypoczynkowej (2-12 minut) wykonuje się ćwiczenie po-aktywacyjne o podobnym wzorcu

ruchowym np. skok pionowy (Tillin i Bishop, 2009). Równie duże zainteresowanie efekt PAP wzbudził w świecie nauki. Eksperymenty dotyczące efektu PAP skupiają się głównie na analizie efektywności różnych protokołów w celu natychmiastowej poprawy sprawności fizycznej w ćwiczeniach eksplozywnych, jednak niewiele z nich uwzględniło weryfikację siły skurczu mięśniowego poprzez stymulację elektryczną (Boullosa, 2021; Krzysztofik, Wilk i wsp., 2021). Z tego powodu zdecydowano się na wprowadzenie nowej taksonomii dla efektu PAP.

W celu uniknięcia błędnej identyfikacji tego zjawiska zaproponowano termin PAPE – po-aktywacyjny wzrost sprawności fizycznej (post activation performance enhancement) (Cuenca-Fernández i wsp., 2017). Zarówno PAP jak i PAPE wywoływane są przez CA, jednak PAPE odnosi się wyłącznie do wzrostu sprawności fizycznej w kolejno wykonywanej czynności ruchowej, z kolei PAP nawiązuje do wzrostu siły w trakcie skurczów wywołanych stymulacją elektryczną (Boullosa i wsp., 2020). W związku z tym powszechne jest jednocześnie identyfikowanie PAP i PAPE po tych samych CA (de Poli i wsp., 2020; Zimmermann i wsp., 2020). Jednakże Boullosa (2021) sugeruje, że PAPE jest właściwym terminem dla protokołów treningowych oraz w eksperymentach, w których weryfikacja zmian siły skurczu dokonywana jest aktywnością fizyczną (np. skokiem pionowym bez zamachu ramion; countermovement jump - CMJ), a nie poprzez stymulację elektryczną. Porównanie obu terminów przedstawiono na rycinie 1.



Rycina 1. Schemat przedstawiający różnice pomiędzy wzmocnieniem po-aktywacyjnym (PAP), a po-aktywacyjnym wzrostem sprawności fizycznej (PAPE) (Boullosa, 2021)

Tradycyjnie wykonywany trening oporowy polega na wykonaniu zarówno fazy ekscentrycznej i koncentrycznej ćwiczenia ze stałym obciążeniem zewnętrznym (Wagle i wsp., 2017; Walker i wsp., 2016). Wiedząc, iż układ mięśniowy jest w stanie wytworzyć aż o 50% więcej siły podczas maksymalnych skurczów ekscentrycznych w porównaniu do pracy koncentrycznej (Ruas i wsp., 2022; Westing i wsp., 1988) istnieje prawdopodobieństwo, że tradycyjny trening oporowy ze stałym obciążeniem zewnętrznym nie zapewni optymalnego bodźca w trakcie wykonywania fazy ekscentrycznej. Ze względu na ograniczenie maksymalnego obciążenia zewnętrznego podyktowane siłą skurczu koncentrycznego oraz potencjał siłowy maksymalnych skurczów koncentrycznych naukowcy poszukują skutecznych metod pozwalających zwiększyć wykorzystanie skurczów ekscentrycznych w treningu (Suchomel i wsp., 2019).

Wynikiem tych prac są metody przeciążania fazy ekscentrycznej opierające się m.in. na wykonaniu wymuszonych powtórzeń ekscentrycznych, wykorzystaniu supramaksymalnych obciążeń ekscentrycznych czy akcentowaniu fazy ekscentrycznej (*accentuated eccentric loading*). Jednak te dwa pierwsze rozwiązania uwzględniają wykonanie wyłącznie fazy ekscentrycznej ćwiczenia, co rzadko ma miejsce podczas codziennych zadań ruchowych czy w trakcie rywalizacji sportowej. Jednym z rozwiązań pozwalających na wykonanie pełnego cyklu ekscentryczno-koncentrycznego i jednocześnie zastosowanie supramaksymalnych wartości obciążenia zewnętrznego podczas fazy ekscentrycznej jest wykorzystanie przyborów zwalniających obciążenie – *weight releasers* (WR). Ten specjalistyczny przybór przypominający hak umieszczany jest na obu końcach sztangi (Ryc. 2). Dzięki WR ćwiczenie może być wykonywane w pełnym cyklu ekscentryczno-koncentrycznym z tą różnicą, że podczas fazy ekscentrycznej dodatkowe obciążenie zewnętrzne umieszczone na WR odłącza się, gdy koniec przyboru dotknie podłoża (Sheppard i wsp., 2008; J. P. Wagle i wsp., 2017, 2021).



Rycina 2. Zdjęcie przedstawiające przybory zwalniające obciążenie zewnętrzne (WR)

Badania nad zastosowaniem AEL wykazały, że zastosowanie WR podczas ćwiczeń oporowych w natychmiastowy sposób przyczynia się do generowania istotnie wyższych wartości prędkości sztangi w fazie koncentrycznej ćwiczenia (Munger i wsp., 2017; Taber i wsp., 2021). Poprawa sprawności wynikająca z zastosowania dodatkowego obciążenia spowodowana jest najprawdopodobniej zwiększoną rekrutacją jednostek motorycznych, z efektywniejszym wykorzystaniem cyklu rozciągnięcie - skurcz, a także zmianami sztywności tytyny (Munger i wsp., 2017; Sheppard i Young, 2010). Mimo to, według najlepszej wiedzy autora wykorzystanie WR w protokołach PAPE było analizowane wyłącznie w jednym badaniu (Tseng i wsp., 2021).

2. WYKORZYSTANIE EFEKTU PAPE W PRAKTYCE TRENINGOWEJ

Zjawisko PAPE jest współcześnie intensywnie badane, a ostatnie doniesienia wskazują, że może być wywoływane przy użyciu różnych CA: ćwiczeń oporowych o wysokiej intensywności (Krzysztofik, Wilk, Filip, i wsp., 2020; Wilson i wsp., 2013), maksymalnych dobrowolnych skurczów izometrycznych (Krzysztofik, Wilk, Pisz, i wsp., 2022), wibracji całego ciała (Dallas i wsp., 2023) czy ćwiczeń balistycznych wykonywanych z niską wartością obciążenia zewnętrznego (Finlay i wsp., 2022), przy czym te pierwsze są najczęściej badanymi CA (Finlay i wsp., 2022; Seitz i Haff, 2016).

Literatura tematu wskazuje, że optymalne wykorzystanie efektu PAPE wymaga odpowiedniego dostosowania m.in. takich parametrów treningowych jak intensywność i objętość, a także czas przerw wypoczynkowych między aktywacją, a kolejną wykonywaną czynnością ruchową (Seitz i Haff, 2016). Ponadto, zastosowane CA powinno w jak największym stopniu odwzorowywać następnie wykonywaną czynność ruchową (Seitz i Haff, 2016). Wiele wskazuje na to, że zalecenie to nie ogranicza się wyłącznie do angażowania tych samych grup mięśniowych w trakcie CA i kolejnego zadania ruchowego, ale również do powielenia podobnego zakresu ruchu, wektora siły i wykonania ćwiczenia w sposób unilateralny czy bilateralny (Krzysztofik, Wilk, Pisz, i wsp., 2022). Na przykład, eksperyment przeprowadzony przez Dello Iacona i wsp., (2016) wykazał, że skok pionowy po zeskoku w głąb jednonóż (3 serie po 5 powtórzeń) jako CA przyczynił się do większej poprawy wysokości CMJ w porównaniu do skoków w dal po zeskoku w głąb jednonóż (+6.5% vs. +1%, kolejno) w grupie wytrenowanych piłkarzy ręcznych. Z drugiej strony, skok w dal po zeskoku w głąb jednonóż okazał się efektywniejszy w obniżeniu czasu biegu ze zmianą kierunku w porównaniu do skoku pionowego po zeskoku w głąb jednonóż (-6.8% vs. -1.3%, kolejno).

Aspektem mającym istotne znaczenie w kontekście wykorzystania efektu PAPE jest również charakterystyka ćwiczącego tj. poziom siły mięśniowej oraz doświadczenia treningowego (Chiu i wsp., 2003). Chiu i wsp., (2003) wykazali wzrost generowanej mocy mięśniowej podczas skoków pionowych z pozycji przysiadu (squat jump) w 5 minucie po 5 seriach przysiadów ze sztangą z obciążeniem zewnętrznym wynoszącym 90% 1RM w grupie osób wytrenowanych, ale nie u trenujących rekreacyjnie. Potwierdzili to Stone i wsp., (2008), którzy dowiedli, iż elitarni zawodnicy dwuboju olimpijskiego (mężczyźni: rwanie 173.1 ± 16.8

kg, podrzut 211.9 ± 18.3 kg, kobiety: rwanie 96.7 ± 8.0 kg, podrzut 117.5 ± 6.6 kg) osiągają wymierny efekt PAPE ($5.3\% \pm 4.3\%$ wzrostu dla szczytowej prędkości w izometrycznym ciągu sztangi z wysokości kolan - isometric mid-thigh pull). Przeprowadzone badania wskazują, że osoby dobrze wytrenowane charakteryzuje wzmożona zdolność do wykorzystania efektu PAPE prawdopodobnie ze względu na zwiększoną odporność na zmęczenie (Chiu i wsp., 2003; Koch i wsp., 2003; Seitz i wsp., 2014; Wilson i wsp., 2013). Koch i wsp., (2003) wykazali istotną różnicę w efekcie PAPE pomiędzy grupą sportowców i osób trenujących rekreacyjnie na korzyść sportowców, przy czym zaznaczyli, że poziom siły mięśniowej w przysiadzie ze sztangą jest czynnikiem determinującym wielkość efektu PAPE kończyn dolnych. Doniesienia te potwierdza praca Seitza i wsp., (2014), w której autorzy porównali dwie grupy osób - *silniejsze* (poziom siły mięśniowej w przysiadzie ze sztangą $\geq 2x$ krotności masy ciała) i *słabsze* (poziom siły mięśniowej w przysiadzie ze sztangą $< 2x$ krotności masy ciała, ale nie mniej niż $1.5x$). Wyniki wskazały, iż osoby *silniejsze* odnotowały istotnie wyższy efekt PAPE (oceniany wysokością skoku i mocą generowaną podczas skoku pionowego z pozycji przysiadu) po 3 powtórzeniach przysiadu ze sztangą z obciążeniem zewnętrznym wynoszącym 90% 1RM w porównaniu do osób o niższym poziomie siły mięśniowej. Prawdopodobnym wytłumaczeniem jest fakt, że osoby wytrenowane wykazują podwyższoną fosforylację MRLC, a także charakteryzują się wyższym stosunkiem włókien szybko- do wolnokurczliwych w porównaniu do osób niewytrenowanych (Hamada i wsp., 2000; Parry i wsp., 2008; Smith i Fry, 2007; Tillin i Bishop, 2009). Literatura tematu zgodnie dowodzi, że szybko- i wolnokurczliwe włókna mięśniowe wykazują większą efektywność w wykorzystaniu efektu PAP w porównaniu do włókien wolnokurczliwych (Guellich i Schmidbleicher, 1996; Hamada i wsp., 2003; Vandenboom i wsp., 1993). W rezultacie wykorzystanie efektu PAPE wymaga odpowiedniej i precyzyjnej indywidualizacji stosowanych protokołów.

2.1. Wpływ intensywności treningowej ćwiczenia aktywacyjnego na wystąpienie efektu PAPE

W treningu oporowym intensywność ćwiczeń zwykle określana jest jako maksimum powtórzeń (RM) i może być przedstawiona jako zakres (10-12RM) lub procent maksymalnego obciążenia dla 1 powtórzenia np. (85% 1RM) (Shimano i wsp., 2006). Wartość 1RM definiowana jest jako maksymalne obciążenie zewnętrzne, które ćwiczący jest w stanie jednokrotnie podnieść przy zachowaniu prawidłowej techniki oraz przy określonym zakresie

ruchu (Grgic i wsp., 2020). W ostatnich latach podjęto wiele badań mających na celu określenie optymalnych parametrów CA sprzyjających osiągnięciu największego efektu PAPE (Dobbs i wsp., 2019; Finlay i wsp., 2022; Seitz i Haff, 2016; Wilson i wsp., 2013), dotyczyły one między innymi określenia optymalnej intensywności CA (Gołaś i wsp., 2017; Krzysztofik, Wilk, Gołaś, i wsp., 2020).

Badania wykazały, że szczytowy efekt PAPE uzyskuje się w szerokim zakresie intensywności (od ćwiczeń plajometrycznych z wykorzystaniem masy ciała do ćwiczeń oporowych z obciążeniami supramaksymalnymi), przy czym najczęściej badane są wysokie wartości obciążenia (80-90% 1RM) (Krzysztofik i wsp., 2021; Krzysztofik, Wilk, Filip, i wsp., 2020; Krzysztofik, Wilk, Gołaś, i wsp., 2020; Seitz i Haff, 2016; Ulrich i Parstorfer, 2017; Wilson i wsp., 2013). Dostępne badania nie wskazują jednogłośnie jaka intensywność jest najlepsza w celu osiągnięcia zjawiska PAPE, ale zgodnie podkreślają, że wielkość efektu jest determinowana przez charakterystykę ćwiczącego. Metaanaliza Wilsona i wsp., (2013) wykazała, iż umiarkowana intensywność CA (60-84% 1RM) przyczynia się do wywołania większego efektu PAPE w porównaniu z wysoką intensywnością (>85% 1RM). Z kolei, metaanaliza Seitz i Haffa, (2016) dowiodła, że wysoka intensywność CA (>85% 1RM) może być skuteczniejsza niż obciążenia o umiarkowanej intensywności (60-84% 1RM) w osiąganiu PAPE. Dobbs i wsp., (2019) sugerują, że powodem może być fakt, iż w porównywanych badaniach uczestniczyły zarówno osoby wytrenowane jak i niewytrenowane. Osoby wytrenowane wymagają silniejszego bodźca celem rekrutacji jednostek motorycznych wyższego rzędu w trakcie wykonywania CA (Rassier i MacIntosh, 2000), stąd te o wyższej intensywności (>80% 1RM) lepiej sprawdzą się u osób wytrenowanych (Sale, 2003; Van Cutsem i wsp., 1998). Z kolei, osoby *słabsze* i niewytrenowane powinny stosować umiarkowaną intensywność (60-84% 1RM) z uwzględnieniem dłuższych przerw wypoczynkowych (6-12 min) między CA, a kolejno wykonywaną czynnością ruchową (Gouvêa i wsp., 2013; Lesinski i wsp., 2013; Wilson i wsp., 2013), aby czerpać korzyści z protokołów PAPE. Najczęściej przytaczanym wytłumaczeniem tych wymogów jest teoria zależności wywołanego pobudzenia i zmęczenia (Chiu i wsp., 2003; Rassier i MacIntosh, 2000; Seitz i Haff, 2016). Ma to związek z równowagą pomiędzy indukowanym zmęczeniem, a pobudzeniem, które współistnieją po wykonaniu CA (Rassier i MacIntosh, 2000). Poprawa sprawności fizycznej odnotowywana jest, gdy pobudzenie dominuje nad zmęczeniem, natomiast gdy dochodzi do zjawiska odwrotnego sprawność fizyczna ulega pogorszeniu (Tillin i Bishop, 2009). Wyższa odporność na zmęczenie osób wytrenowanych od niewytrenowanych

powoduje, że wymagają one stosowania odmiennych intensywności CA do wywołania efektu PAPE (Seitz i Haff, 2016).

Ostatnie badania skupiają swoją uwagę na efektywności zastosowania supramaksymalnych wartości obciążenia zewnętrznego podczas CA (Gołaś i wsp., 2016; Krzysztofik, Wilk, Gołaś, i wsp., 2020; Krzysztofik, Wilk, Lockie, i wsp., 2022; Ong i wsp., 2016). Na przykład Ong i wsp., (2016) wykazali istotny wzrost wysokości i mocy generowanej w CMJ w 3 i 6 minucie po opuszczaniu obciążenia kończynami dolnymi na suwnicy z obciążeniem 105% (6 powtórzeń) i 125% 1RM (5 powtórzeń) jako CA w grupie rekreacyjnie trenujących mężczyzn. Podobnie jak badanie Krzysztofika, Wilka, Gołasia, i wsp., (2020) potwierdziło skuteczność stosowania obciążeń supramaksymalnych podczas CA. Autorzy odnotowali istotny wzrost generowanej mocy i prędkości sztangi podczas wyrzutu sztangi leżąc na suwnicy Smith'a w 6 minucie po wykonaniu 2 serii po 2 powtórzenia opuszczania sztangi leżąc z obciążeniem wynoszącym 110 i 130% 1RM jako CA w grupie wytrenowanych mężczyzn (poziom siły maksymalnej w wyciskaniu leżąc $\sim 1.53\text{kg/kg}$ masy ciała). Jednak należy podkreślić, że w przytoczonych badaniach podczas CA wykonywano wyłącznie fazę ekscentryczną, podczas gdy zdecydowana większość zadań ruchowych uwzględnia wykonanie zarówno fazy ekscentrycznej i koncentrycznej, w pełnym cyklu rozciągnięcie-skurcz. Ponadto, zalecenia dotyczące protokołów PAPE wskazują na istotne znaczenie podobieństwa w strukturze ruchu między CA, a kolejnym zadaniem ruchowym. W związku z tym, uzasadnionym wydaje się poszukiwanie rozwiązań treningowych, które pozwolą zastosować supramaksymalne obciążenie, ale jednocześnie nie będą ograniczały ćwiczącego do wykonania wyłącznie fazy ekscentrycznej CA. Właśnie takim rozwiązaniem jest zastosowanie przyborów zwalniających obciążenie podczas aktywacji supramaksymalnej.

2.2. Wpływ objętości treningowej ćwiczenia aktywacyjnego na wystąpienie efektu PAPE

Wyniki meta-analiz jednoznacznie wykazały, że wykonanie kilku serii CA o umiarkowanej intensywności (60-84% 1RM) wywołuje większy efekt PAPE w stosunku do wykonania pojedynczej serii, lub zastosowania wysokiej intensywności ($\geq 85\%$ 1RM) dla ogółu sportowców (Seitz i Haff, 2016; Wilson i wsp., 2013). Z kolei, osoby *silniejsze* wykazują wyższy poziom efektu PAPE po pojedynczej serii, niż po kilku seriach CA, natomiast *słabsze* lepiej reagują po kilku seriach CA (Seitz i Haff, 2016). Jedno z ostatnich badań autorstwa

Kobala i wsp., (2019) porównywało wpływ różnych intensywności (1, 3, 5RM i 60% 1RM) oraz liczby serii (1, 2 i 3) na efekt PAPE kończyn dolnych. Grupą badaną byli wysoko wytrenowani zawodnicy zdolni wykonać półprzysiad z dwukrotnością masy ciała, natomiast czas trwania przerwy pomiędzy CA, a CMJ wynosił 4 min. Wyniki tego badania nie przyniosły odpowiedzi dotyczącej optymalnej objętości treningowej pozwalającej na najwyższy efekt PAPE co oznacza, iż w przypadku osób dobrze wytrenowanych nie istnieją jednoznaczne zalecenia i wymagane jest indywidualne podejście oraz ocena reakcji na różne protokoły CA dostosowując lub modyfikując zmienne treningu w razie konieczności.

Praktyczną metodą kontroli wywołanego zmęczenia jest rejestracja utraty prędkości sztangi podczas fazy koncentrycznej w trakcie wykonywania kolejnych powtórzeń (Rodríguez-Rosell i wsp., 2020). Zmniejszenie prędkości ruchu sztangi podczas poszczególnych serii ćwiczeń zostało uznane za wskaźnik zmęczenia nerwowo-mięśniowego (Sánchez-Medina i González-Badillo, 2011). W związku z tym wykorzystanie kontroli prędkości podczas CA pozwala na indywidualne dostosowanie liczby powtórzeń, a tym samym nadzorowanie poziomu wywołanego zmęczenia (Tsoukos i wsp., 2019, 2021). Jest to szczególnie ważne biorąc pod uwagę relację zmęczenie-pobudzenie (Krzysztofik, Matykiewicz, i wsp., 2021; Tsoukos i wsp., 2019, 2021). Tsoukos i wsp., (2019) ocenili efektywność zastosowania kontroli prędkości podczas CA porównując obniżenie prędkości sztangi w fazie koncentrycznej w porównaniu do pierwszego powtórzenia o 10% i 30% podczas wyciskania leżąc z obciążeniem 40% i 60% 1RM jako CA. Średnia prędkość sztangi w trakcie później wykonywanego wyrzutu sztangi leżąc na suwnicy Smith'a z obciążeniem 30% 1RM istotnie wzrosła (o 4.5-6.8%), ale wyłącznie po zastosowaniu 60% 1RM i 10%-owego obniżenia prędkości sztangi. Należy podkreślić, że zastosowane progi obniżenia prędkości sztangi miały istotny wpływ na liczbę wykonanych powtórzeń podczas CA. Podczas zastosowania 10%-owego obniżenia prędkości sztangi badani wykonali średnio 7 powtórzeń, natomiast podczas 30%-owego progu było to 15 powtórzeń. Analizując liczbę wykonanych powtórzeń przez poszczególnych uczestników można zauważyć, że liczba ta znacząco się różniła mieszcząc się w przedziale od 4 do 10 powtórzeń pomimo zastosowania tego samego progu obniżenia prędkości sztangi (10%). Fakt ten potwierdza przydatność kontroli prędkości sztangi w trakcie CA w celu optymalizacji objętości podczas protokołów wykorzystujących efekt PAPE, ale również wskazują na potrzebę indywidualizacji.

2.3. Wpływ czasu trwania przerwy wypoczynkowej na wystąpienie efektu PAPE

Rodzaj, objętość i intensywność CA oraz cechy ćwiczącego takie jak doświadczenie czy poziom siły mięśniowej są wymieniane jako kluczowe czynniki dla określenia optymalnej przerwy wypoczynkowej w celu wywołania zjawiska PAPE (Seitz i Haff, 2016; Wilson i wsp., 2013). Dostępne przeglądy literatury wskazują, że długość przerwy pomiędzy CA, a kolejno wykonywanym zadaniem ruchowym jest głównym czynnikiem odpowiadającym za wielkość efektu PAPE (Lesinski i wsp., 2013; Seitz i Haff, 2016; Wilson i wsp., 2013). Sugeruje się, że optymalna długość przerwy wypoczynkowej powinna wynosić między 5 a 7 minut (Lesinski i wsp., 2013; Seitz i Haff, 2016; Wilson i wsp., 2013), jednak nawet przerwy trwające 12 min od zakończenia CA umożliwiają wywołanie zjawiska PAPE (Gouvêa i wsp., 2013). Z kolei, Dobbs i wsp., (2019) wykazali, że przerwy wypoczynkowe krótsze niż 3 min mogą wpłynąć negatywnie na efekt PAPE i przyczynić się do spadku sprawności fizycznej.

Doświadczenie treningowe i poziom siły mięśniowej w istotny sposób determinuje odpowiedni czas przerwy wypoczynkowej w celu uzyskania efektu PAPE. Wskazuje na to badanie przeprowadzone przez Seitz i wsp., (2014). Wyniki dowiodły, iż grupa *silniejsza* ($\geq 2x$ krotności masy ciała w przysiadzie ze sztangą) szybciej odnotowała efekt PAPE (3-12 min po CA) w porównaniu do grupy *slabszej* ($< 2x$ krotności masy ciała, ale nie mniej niż $1.5x$ w przysiadzie ze sztangą) (6-12 min po CA). Ponadto, osoby *silniejsze* odnotowały istotnie wyższy efekt PAPE w stosunku do *slabszych*, z najwyższym poziomem po 6 min od wykonania CA, natomiast grupa *slabsza* odnotowała szczytowy poziom PAPE po 9 min od CA.

Warto zauważyć, że również rodzaj ćwiczenia stosowanego jako CA może mieć wpływ na czas trwania przerwy wypoczynkowej między CA, a kolejnym zadaniem ruchowym w celu uzyskania efektu PAPE (Seitz i Haff, 2016). Metaanaliza przeprowadzona przez Seitz i Haffa, (2016) sugeruje, że ćwiczenia plajometryczne oraz balistyczne jako CA pozwalają uzyskać efekt PAPE wcześniej (~ 4 min) niż ma to miejsce po ćwiczeniach oporowych o wysokiej intensywności ($> 85\%$ 1RM; > 5 min). Z kolei, w przypadku stosowania obciążeń supramaksymalnych wydaje się, że jednakowy czas przerwy jak ten rekomendowany dla CA o wysokiej intensywności jest wystarczający (5-7 min), pomimo istotnie wyższej intensywności. Ong i wsp., (2016) odnotowali efekt PAPE w 3 i 6 min po zastosowaniu 105% i 125% 1RM, natomiast Krzysztofik, Wilk, Gołaś, i wsp., (2020) oraz Krzysztofik, Wilk, Lockie, i wsp., (2022) w 5 min po 110 i 130% 1RM. Należy podkreślić, że w każdym z wymienionych badań uczestnicy wykonywali wyłącznie fazę ekscentryczną, stąd nie ma

pewności czy taka sama przerwa wypoczynkowa będzie odpowiednia, gdy zastosowane zostanie supramaksymalne obciążenie zewnętrzne oraz zarówno faza koncentryczna.

Podsumowując, tworzenie efektywnych protokołów PAPE wymaga dostosowania poszczególnych zmiennych treningowych CA z uwzględnieniem zarówno charakterystyki następnie wykonywanej czynności ruchowej jak i ćwiczącego.

3. POTENCJALNE MECHANIZMY LEŻĄCE U PODSTAW ZJAWISKA PAPE

Z uwagi na różnice między PAP i PAPE (szczególnie dotyczące odmiennego przebiegu czasowego tych zjawisk) uważa się, że mechanizmy leżące u podstaw efektu PAP w niewielkim stopniu mogą stać za odnotowywaną poprawą sprawności fizycznej po zastosowaniu protokołów PAPE (Cormier i wsp., 2022). W związku z tym za potencjalne wytłumaczenie skuteczności efektu PAPE proponuje się wzrost temperatury mięśniowej, wzrost przepływu krwi i zawartości płynów wewnątrzkomórkowych, a także aktywności mięśniowej (Blazevich i Babault, 2019). Wzrost temperatury mięśni jest wyraźnie związany ze wzrostem tempa narastania siły oraz szybkości skurczu zarówno włókien szybko i wolnokurczliwych (Elmubarak i Ranatunga, 1984; Ranatunga, 1982; Stein i wsp., 1982). Informacje te potwierdzają, że na szybkość cyklicznej pracy mostków poprzecznych duży wpływ ma wrażliwa na temperaturę reakcja ATP-azy miozynowej (Brenner i Eisenberg, 1986; Stein i wsp., 1982). Wzrost temperatury mięśnia może powodować istotną poprawę sprawności fizycznej w eksplozywnych czynnościach ruchowych takich jak skoki pionowe czy sprinty (~4-6%) (Bergh i Ekblom, 1979). Potencjalny wzrost temperatury mięśniowej w granicach 0.3-0.9°C może przynieść wzrost siły mięśniowej o co najmniej 1-5%, a nawet 10% (Blazevich i Babault, 2019; González-Alonso i wsp., 2000). Biorąc pod uwagę przebieg czasowy i stopień odnotowywanej poprawy sprawności fizycznej po zastosowanych protokołach PAPE można założyć, że to właśnie wzrost temperatury mięśniowej jest jednym z głównych mechanizmów tego zjawiska. Jednakże, w niektórych badaniach odnotowano poprawę wyników po zastosowaniu CA o niskiej objętości, która może się wydawać niewystarczająca do wywołania istotnego wzrostu temperatury mięśniowej (Tsoukos i wsp., 2019, 2021). Tsoukos i wsp., (2021) zastosowali pojedynczą serię wyciskania sztangi leżąc z obciążeniem zewnętrznym wynoszącym 80% 1RM wykonywaną do 10%-owego spadku średniej prędkości, co pozwoliło uczestnikom wykonać 2-5 powtórzeń. To CA przyczyniło się do istotnego wzrostu średniej prędkości sztangi po jej wyrzucie z wykorzystaniem suwnicy Smith'a. Dodatkowo istnieją przesłanki, że aktywność fizyczna o bardzo niskiej objętości może prowadzić do spadku temperatury powierzchniowej skóry, a nie jej wzrostu. Na przykład Weigert i wsp., (2018) zaobserwowali nieistotny spadek temperatury powierzchniowej skóry okolic mięśnia dwugłowego ramienia po 10 powtórzeniach zginania stawu łokciowego ze sztangą

z obciążeniem zewnętrznym 70% 1RM. Autorzy badania sugerują, że zjawisko spadku temperatury powierzchniowej skóry po wykonaniu skurczów mięśniowych o umiarkowanej intensywności i niewielkiej objętości może wynikać z reaktywnego zwężenia naczyń krwionośnych, a także wskazywać na redystrybucję krwi bezpośrednio po wykonanej aktywności (Formenti i wsp., 2016).

Według najlepszej wiedzy autora, do tej pory wyłącznie w dwóch badaniach dotyczących efektu PAPE kontrolowało zmiany temperatury powierzchniowej skóry (Kalinowski i wsp., 2022; Krzysztofik i wsp., 2023). W ostatnim badaniu autorstwa Krzysztofika i wsp., (2023) dokonano porównania wpływu trzech różnych CA na wysokość wykonywanych CMJ: i) 3 serii po 3 powtórzenia przysiadów ze sztangą i obciążeniem zewnętrznym wynoszącym 85% 1RM; ii) pojedynczej serii przysiadów ze sztangą i obciążeniem zewnętrznym wynoszącym 60% 1RM do 10%-owego spadku średniej prędkości sztangi; iii) dwóch serii przysiadów ze sztangą i obciążeniem zewnętrznym wynoszącym 60% 1RM do 10%-owego spadku średniej prędkości sztangi. Wyniki wykazały istotny wzrost wysokości skoku w 2 min oraz po indywidualnym, optymalnym czasie przerwy po każdym z analizowanych CA. Jednakże, wpływ na temperaturę powierzchniową skóry okolic głowy bocznej mięśnia czworogłowego uda był odmienny między zastosowanymi CA. Po wykonaniu 3 serii po 3 powtórzenia przysiadów ze sztangą obciążoną 85% 1RM oraz dwóch serii przysiadów ze sztangą i obciążeniem zewnętrznym wynoszącym 60% 1RM do 10%-owego spadku średniej prędkości sztangi odnotowano istotny wzrost temperatury powierzchniowej skóry okolic głowy bocznej mięśnia czworogłowego uda. Z kolei, pomimo znacznego wzrostu wysokości CMJ, pojedyncza seria przysiadów (4-11 powtórzeń) przyczyniła się do istotnego spadku temperatury powierzchniowej skóry okolic głowy bocznej mięśnia czworogłowego.

Biorąc pod uwagę powyższe informacje można wnioskować, że odnotowany efekt PAPE był związany z współistnieniem innych mechanizmów niż ze wzrostem temperatury powierzchniowej skóry, a przynajmniej w przypadku zastosowania pojedynczej serii przysiadów jako CA. Wydaje się, że w tym przypadku poprawę sprawności można przypisać czynnikom neuronalnym takim jak zwiększona rekrutacja jednostek motorycznych lub zwiększona pobudliwość neuronów ruchowych, ale również nie można wykluczyć zwiększonej fosforylacji MRLC (Tsoukos i wsp., 2021). Teoretycznie wydaje się to możliwe, ponieważ istotny efekt PAPE odnotowano już w 2 min. po CA, a nasilona fosforylacja MRLC utrzymuje się do 5 min (Hamada i wsp., 2000). Pomimo, że wzrost temperatury został wskazany jako jeden z głównych mechanizmów wyjaśniających efekt PAPE (Blazevich i Babault, 2019) to odnotowywana poprawa sprawności fizycznej po CA o bardzo niskiej objętości treningowej

może być związana ze współistnieniem innych mechanizmów, a więc wpływ zmian temperatury wydaje się w tych przypadkach mało prawdopodobny.

Dzięki możliwości nieinwazyjnego stosowania oraz prostocie użycia termografia stała się popularnym sposobem monitorowania zmian temperatury powierzchniowej skóry na skutek podejmowanej aktywności fizycznej (Arfaoui i wsp., 2012), a także interwencji związanych z chłodzeniem (Korman i wsp., 2012) czy ogrzewaniem (Rutkowski i wsp., 2011). Temperatura powierzchniowa skóry może odzwierciedlać rozpraszanie ciepła wytworzonego przez pracę mięśniową podczas podejmowania wysiłku fizycznego (Akimov i wsp., 2010). Część badań wskazuje na słabe powiązania między temperaturą powierzchniową skóry, a temperaturą wewnątrzmięśniową, jednakże badania te oceniały wykorzystanie krioterapii i miejscowego schładzania powierzchni skóry (Hardaker i wsp., 2007; Jutte i wsp., 2001), a tym samym istotnie zmieniając jej potencjał emisyjności. W dodatku, według wiedzy autora na dzień dzisiejszy dostępne są wyłącznie dwa eksperymenty oceniające zmiany temperatury powierzchniowej skóry podczas stosowania protokołów PAPE (Kalinowski i wsp., 2022; Krzysztofik i wsp., 2023). W badaniu Kalinowskiego i wsp., (2022) porównywano efektywność CA wykonywanego w formie pary ćwiczeń bilateralnych (przysiad ze sztangą i skoki po zeskoku w głąb) z parą ćwiczeń unilateralnych (przysiady ze sztangą w pozycji wykroczno-zakrocznej i skoki po zeskoku w głąb jedno nogi) na wykonywany 6 min później CMJ (m.in. wysokość skoku, względną moc szczytową, prędkość szczytową) oraz czas biegu ze zmianą kierunku (modified agility T-test). Obydwa protokoły przyczyniły się do istotnego wzrostu temperatury powierzchniowej skóry w porównaniu do wartości wyjściowej, jednak wyłącznie protokół bilateralny istotnie poprawił wysokość CMJ. Analizując powyższe dane wydaje się, że efekt PAPE może w dużym stopniu być tłumaczony wzrostem temperatury mięśni, jednak przypadki, w których efekt jest odnotowywany po CA o niskiej objętości (Krzysztofik, Wilk, Lockie, i wsp., 2022; Tsoukos i wsp., 2021) sugerują, że wzrost temperatury mięśniowej nie jest jedynym z mechanizmów leżących u podstaw tego zjawiska.

Za kolejny potencjalny mechanizm leżący u podstaw efektu PAPE uważa się wzrost przepływu krwi i zawartości płynów wewnątrzkomórkowych (Blazevich i Babault, 2019), które mogą prowadzić do istotnego zwiększenia ciśnienia wewnątrzmięśniowego i w rezultacie efektywniejszego generowania siły mięśniowej (Sleboda i Roberts, 2017). Jedną z nieinwazyjnych metod wykorzystywanych do oceny właściwości biomechanicznych tkanek jest miotonometria, która w pośredni sposób może również pozwolić na ocenę zmian ciśnienia wewnątrzmięśniowego (Korhonen i wsp., 2005). Miotonometria wykorzystywana jest głównie do oceny takich parametrów jak sztywność czy tonus mięśniowy (częstotliwość

oscylacji) (Bizzini i Mannion, 2003), które mogą ulegać zmianie na skutek podejmowanej aktywności fizycznej (Hill i wsp., 2022; Klich i wsp., 2023). Pomimo, że ocena biomechanicznych właściwości tkanek może być przydatnym narzędziem do oceny protokołów PAPE to prawdopodobnie jedynie trzy eksperymenty dokonywały oceny zmian tych parametrów (Gago i wsp., 2014; Kalinowski i wsp., 2022; Pożarowszczyk i wsp., 2018). Badanie Gago i wsp., (2014) nie wykazało istotnych zmian sztywności ścięgna Achillesa pomimo odnotowania efektu PAPE. Z kolei Pożarowszczyk i wsp., (2018) odnotowali wzrost sztywności ścięgna Achillesa po CA, lecz nie oceniali zmian sprawności fizycznej, stąd kwestia ta pozostaje nierozstrzygnięta. Znacznie więcej badań dotyczyło wpływu zmęczenia wywołanego wysiłkiem fizycznym na właściwości biomechaniczne mięśni czy ścięgien (Hill i wsp., 2022; Klich, Ficek, i wsp., 2020; Klich, Pietraszewski, i wsp., 2020; Trybulski i wsp., 2022; Wang, DE Vito, i wsp., 2017; Wang, De Vito, i wsp., 2017). Prace te za wyjątkiem Hilla i wsp., (2022) są spójne i wskazują na wzrost sztywności mięśni i ścięgien w wyniku zmęczenia, co objawiało się spadkiem sprawności fizycznej. Teorię tą potwierdzają Andonian i wsp., (2016) oraz Siracusa i wsp., (2019) uważając, że ocena zmian sztywności mięśniowej może pomóc w identyfikacji wczesnego rozwoju zmęczenia mięśni, który może być związany z mechanizmem kompensacyjnym lub ochronnym organizmu przed zmęčeniem. Zwiększonej sztywności może towarzyszyć mikroobrzęk w obrębie włókien mięśniowych o czym donoszą Proske i Morgan, (2001). Jako kolejne wytłumaczenie przytacza się wywołany zmęčeniem wzrost stężenia metabolitów w mięśniach, który powoduje, że mostki poprzeczne miozyny mocniej przylegają do włókien tytyny (Curtin i Edman, 1989; Zhang i Rymer, 2001), a zarazem niższy wskaźnik odczepiania się mostków poprzecznych (Allen i wsp., 2008; Fitts, 2008; Westerblad i Allen, 1993). Mając na uwadze znaczenie relacji zmęczenie–pobudzenie na wystąpienie i wielkość efektu PAPE, pomiar biomechanicznych właściwości mięśni i/lub ścięgien może okazać się przydatną metodą pozwalającą określić wpływ zastosowanego CA na poziom wywołanego zmęczenia, a tym samym przyczynić się do optymalizacji protokołów PAPE.

4. WYKORZYSTANIE FAZY EKSCENTRYCZNEJ W KSZTAŁTOWANIU MOCY MIĘŚNIOWEJ

Tradycyjnie podejmowany trening oporowy zakłada wykonywanie ćwiczeń wykorzystując stałą intensywność w każdej z faz danego ćwiczenia tj. koncentrycznej, izometrycznej i ekscentrycznej. Jednakże, intensywność ćwiczenia jest ograniczona przez siłę skurczu koncentrycznego. Układ mięśniowy jest w stanie wytworzyć aż o 50% więcej siły mięśniowej podczas maksymalnych skurczów ekscentrycznych w porównaniu do pracy koncentrycznej (Katz, 1939; Westing i wsp., 1988). W efekcie prowadząc do unikalnych odpowiedzi neuronalnych, molekularnych i metabolicznych (Hollander i wsp., 2007; Katz, 1939; Westing i wsp., 1988). Ponadto, badania oceniające efektywność metod treningu ekscentrycznego wskazują na istotnie większy potencjał w kształtowaniu hipertrofii mięśniowej (Vikne i wsp., 2006) oraz siły i mocy mięśniowej (Elmer i wsp., 2012; English i wsp., 2014; Gross i wsp., 2010; Hortobágyi i wsp., 1996; Walker i wsp., 2016) w porównaniu z tradycyjnie podejmowanym treningiem oporowym. W związku z tym, nieustannie poszukiwane są rozwiązania, które pozwolą na optymalną stymulację zarówno fazy ekscentrycznej jak i koncentrycznej. W efekcie zaproponowano metody treningowe ukierunkowane na optymalne obciążenie fazy ekscentrycznej takie jak: inercyjna, wymuszonych powtórzeń, supramaksymalnego obciążenia koncentrycznego, wydłużenia czasu trwania napięcia mięśniowego podczas fazy ekscentrycznej czy wykorzystania WR (Suchomel i wsp., 2019).

Przeciążenie powstałe wskutek wydłużenia czasu trwania napięcia mięśniowego w fazie ekscentrycznej w efekcie prowadzi do zwiększenia całkowitego czasu napięcia mięśniowego podczas wykonywanego powtórzenia, ale nie intensywności. Teoretycznie wydłużenie czasu napięcia mięśniowego powinno skutkować zwiększoną hipertrofią mięśniową (Schoenfeld i wsp., 2015), jednakże badania w tym kierunku wskazują sprzeczne wyniki (Eduardo Assis Pereira i wsp., 2016; Lacerda i wsp., 2016; Martins-Costa i wsp., 2016; Munn i wsp., 2005). W dodatku, należy zauważyć, że wydłużenie fazy ekscentrycznej może ograniczać wykorzystanie cyklu rozciągnięcie-skurcz (Wilk, Gołaś, i wsp., 2020) oraz wymagać użycia niższego absolutnego obciążenia zewnętrznego (Wilk, Gołaś, i wsp., 2020) w efekcie zmniejszając potencjał tej metody w kształtowaniu siły i mocy maksymalnej (Suchomel i wsp., 2019).

Metoda inercyjna zakłada stosowanie w trakcie treningu urządzenia, którego działanie oparte jest na zasadzie bezwładności uzyskiwanej poprzez użycie koła zamachowego (Beato, Stiff, i wsp., 2019). Urządzenie to wykorzystuje opór wynikający z odwijania taśmy zamocowanej do koła zamachowego (a drugiego końca do ćwiczącego lub przyboru, który jest wykorzystywany podczas ćwiczenia) w trakcie wykonywania fazy koncentrycznej, po której następuje ponowne nawinięcie taśmy na koło skutkujące wymuszeniem fazy ekscentrycznej. Szybkość nawijania taśmy na koło zamachowe jest pozytywnie powiązana z szybkością jej rozwijania, zaś opór wynikający z bezwładności zależy od masy, promienia oraz przyspieszenia kąтового koła zamachowego. Metodę charakteryzuje wysoka wszechstronność zastosowania, ponadto ćwiczenia mogą być wykonywane w wielu płaszczyznach ruchu (Gonzalo-Skok i wsp., 2017), a także w różnych miejscach ze względu na niewielkie rozmiary urządzenia. Aktualna literatura wskazuje na większe przyrosty hipertrofii mięśniowej (Tesch i wsp., 2004), siły maksymalnej (Fernandez-Gonzalo i wsp., 2014; Maroto-Izquierdo i wsp., 2017; Romero-Rodriguez i wsp., 2011), generowanej mocy (Maroto-Izquierdo, García-López i de Paz, 2017; Naczki i wsp., 2016), a także skuteczność wywoływania efektu PAPE (Beato, Bigby, i wsp., 2019) wśród osób niewytrenowanych jak i zawodników różnych dyscyplin sportu w porównaniu z tradycyjnym treningiem oporowym. Na przykład Timon i wsp., (2019) wykazali istotny wzrost wysokości skoku, a także generowanej prędkości i mocy w 8 i 12 min po wykonaniu 3 serii po 6 powtórzeniach (3 min przerwy między seriami) przysiadu z użyciem inercyjnego koła zamachowego. Jednakże, koszt zakupu urządzeń inercyjnych może stanowić istotne ograniczenie dla części ćwiczących.

Kolejnym rozwiązaniem jest stosowanie supramaksymalnych wartości koncentrycznego obciążenia zewnętrznego, które przeważnie odnosi się do wykonywania wyłącznie fazy ekscentrycznej wybranego ćwiczenia lub również koncentrycznej z pomocą współćwiczącego. Metoda ta wykazuje wysoką efektywność w kształtowaniu hipertrofii (Schoenfeld i in. 2017), siły (Buskard i wsp., 2018) oraz mocy mięśniowej (Suchomel i wsp., 2018) pomimo, że nie uwzględnia wykorzystania cyklu rozciągnięcie-skurcz. Rozwiązaniem, pozwalającym zarówno na wykonanie danej czynności ruchowej w pełnym cyklu rozciągnięcie-skurcz i zastosowania istotnie wyższej wartości obciążenia zewnętrznego podczas fazy ekscentrycznej w porównaniu do fazy koncentrycznej są WR. Akcesorium to przypomina haki, które samoistnie odłączają się od sztangi po zetknięciu z podłożem, a fazę koncentryczną ćwiczący wykonuje z pozostałym na sztandze obciążeniem zewnętrznym (Ryc 3) (Lates i wsp., 2022; Merrigan, Tufano, i Jones, 2021; Merrigan, Tufano, Falzone, i wsp., 2021; J. Wagle i wsp., 2018). Zastosowanie istotnie wyższej wartości obciążenia zewnętrznego

podczas fazy ekscentrycznej w porównaniu do fazy koncentrycznej prawdopodobnie pozwala na zmagazynowanie większej ilości energii sprężystej i spotęgowanie cyklu rozciągnięcie-skurcz niż ma to miejsce podczas wykonania ćwiczenia z jednakową wartością obciążenia w obu fazach ruchu. Sugeruje to eksperyment przeprowadzony przez Tabera i wsp., (2021), w którym autorzy odnotowali istotnie wyższe wartości prędkości sztangi podczas jej wyciskania leżąc z obciążeniem zewnętrznym w zakresie 30-80% 1RM (uwzględniając 10%-owy wzrost) w fazie koncentrycznej i 100% 1RM w fazie ekscentrycznej w porównaniu do wyciskania z jednakowym obciążeniem zewnętrznym w obu fazach ćwiczenia. Podobne rezultaty odnotowano w badaniu Mungera i wsp., (2017). Autorzy porównali wpływ zastosowania 105, 110 i 120% 1RM wyłącznie w trakcie fazy ekscentrycznej na prędkość sztangi i poziom generowanej mocy podczas przysiadu ze sztangą trzymaną z przodu na barkach, z obciążeniem zewnętrznym wynoszącym 90% 1RM w trakcie fazy koncentrycznej. Takie warunki udało się uzyskać poprzez umiejscowienie 90% 1RM na sztandze oraz pozostałego obciążenia na WR. Autorzy wykazali, że zastosowanie supramaksymalnych wartości obciążenia podczas fazy ekscentrycznej przyczyniło się do uzyskania istotnie wyższych wartości szczytowej prędkości sztangi i generowanej mocy w grupie trenujących siłowo mężczyzn. Ponadto, wskazując na wzrost efektu wraz ze wzrostem zastosowanej intensywności.

Według najlepszej wiedzy autora wyłącznie jedno badanie do tej pory oceniało wykorzystanie WR w protokole PAPE (Tseng i wsp., 2021). Autorzy porównali wpływ zastosowania przysiadów ze sztangą (3 serie po 4 powtórzenia z 3 min przerwą wypoczynkową między seriami) z obciążeniem wynoszącym 105% koncentrycznego 1RM w fazie ekscentrycznej i 80% 1RM podczas wykonywania fazy koncentrycznej (25% umieszczone na WR) w porównaniu do (3 serie po 5 powtórzeń) przysiadów ze sztangą obciążoną 85% 1RM w każdej z faz na wykonywany 10 min później CMJ. Wyniki tego eksperymentu nie wykazały istotnego wpływu na wysokość, prędkość szczytową oraz tempo narastania siły podczas CMJ po żadnym ze zastosowanych CA. Wydaje się, że przyczyna takich rezultatów leży w zbyt dużej objętości zaimplementowanych CA, które prawdopodobnie przyczyniły się do wywołania nadmiernego zmęczenia. Dotychczasowe badania wykazujące skuteczność protokołów o podobnej intensywności stosowały niższą objętość CA (Krzysztofik i wsp., 2021; Seitz i Haff, 2016; Wilson i wsp., 2013). Z drugiej strony, autorzy oceniali efekt PAPE wyłącznie w 10 min po wykonaniu CA, stąd nie można wykluczyć, że potencjalna poprawa sprawności fizycznej mogła wystąpić wcześniej lub później.



Rycina 3. Poszczególne etapy wykonania przysiadu ze sztangą z przyborami zwalniającymi obciążenie zewnętrzne (WR)

5. PROBLEMATYKA, CEL PRACY, PYTANIA I HIPOTEZY BADAWCZE

5.1. Problem badawczy

Badania obejmujące wpływ PAPE na późniejsze wyniki od kilku lat są obiektem zainteresowania środowiska naukowego oraz trenerów ze względu na unikalną możliwość szybkiej (natychmiastowej) poprawy sprawności fizycznej zawodnika. Protokoły wywołujące efekt PAPE stosowane są podczas jednostek treningowych jak i również przed rywalizacją sportową (Berriel i wsp., 2022; Pereira i wsp., 2022; Suchomel i wsp., 2016). Efekt PAPE można osiągnąć poprzez zastosowanie szerokiego zakresu CA uwzględniając ćwiczenia plajometryczne czy oporowe o wysokiej intensywności (Finlay i wsp., 2022; Seitz i Haff, 2016). Jednakże, w świetle specyficznych właściwości, a także adaptacji mięśniowych do treningu ekscentrycznego coraz większe zainteresowanie budzi wykorzystanie pracy ekscentrycznej w protokołach PAPE.

Według najlepszej wiedzy autora dostępne badania oceniające wykorzystanie pracy ekscentrycznej oraz supramaksymalnych wartości obciążenia w celu wywołania efektu PAPE ograniczają się przede wszystkim do protokołów angażujących kończyny górne (Gołaś i wsp., 2016; Krzysztofik i wsp., 2020, 2022; Ulrich i Parstorfer, 2017), a w przypadku kończyn dolnych wyłącznie dwa takie badania zostały opublikowane (Ong i wsp., 2016; Tseng i wsp., 2021). Biorąc pod uwagę, że supramaksymalne wartości obciążenia zewnętrznego stosowane podczas CA przyczyniły się do skutecznego wywołania efektu PAPE kończyn górnych można przypuszczać, że będą one również efektywne w przypadku protokołów angażujących kończyny dolne. Potwierdziło to badanie Onga i wsp., (2016), w którym autorzy wykazali istotny wzrost wysokości skoku i poziomu generowanej mocy w CMJ po opuszczaniu obciążenia kończynami dolnymi na suwnicy zarówno po zastosowaniu 105% jak i 125% 1RM. Zastosowane CA okazało się skuteczne, pomimo, że grupę badanych stanowili rekreacyjnie trenujący mężczyźni, a zastosowane CA wprawdzie angażujące kończyny dolne, jednak nie jest ćwiczeniem odwzorowującym strukturę ruchu skoku pionowego w tak dużym stopniu jak przysiad ze sztangą. Może to oznaczać, że stopień wywołanego pobudzenia po zastosowaniu supramaksymalnego CA jest na tyle duży, że w pewien sposób zmniejsza wymagania dotyczące podobieństwa struktury ruchu ćwiczeń wykonywanych w protokole PAPE. Podążając tym

tokiem myślenia można sądzić, że wykorzystanie przysiadu ze sztangą z obciążeniem supramaksymalnym jako CA może okazać się efektywniejsze w natychmiastowej poprawie skoczności. Nie potwierdziło tego założenia badanie autorstwa Tsenga i wsp., (2021), w którym autorzy nie wykazali istotnego wpływu przysiadów ze sztangą z wykorzystaniem WR oraz obciążenia 105% 1RM w fazie ekscentrycznej i 80% 1RM w fazie koncentrycznej na wysokość, prędkość szczytową oraz tempo narastania siły w CMJ. Jednakże, należy podkreślić, że CMJ był wykonywany wyłącznie 10 min po zakończeniu CA, a w badaniu Onga i wsp., (2016) pozytywny efekt odnotowano w 3 i 6 min po CA, ale nie w 9 i 12 min. W związku z tym, nie jest wykluczone, że efekt PAPE mógł wystąpić wcześniej jak wykazali Ong i wsp., (2016). Ponadto, taki protokół eksperymentu uniemożliwił analizę indywidualnego optymalnego czasu przerwy wypoczynkowej. Dodatkowo, w badaniu Onga i wsp., (2016) uczestnicy wykonywali wyłącznie fazę ekscentryczną ćwiczenia, podczas gdy w eksperymencie Tsenga i wsp., (2021) w zastosowanym CA wykonywano zarówno fazę ekscentryczną jak i koncentryczną, co mogło przyczynić się do wywołania nadmiernego poziomu zmęczenia.

Niestety według najlepszej wiedzy autora żadne z dotychczasowych badań nie dokonało bezpośredniego porównania wpływu wykonywania wyłącznie ekscentrycznej fazy przysiadów ze sztangą z supramaksymalnym obciążeniem zewnętrznym na kolejno wykonywaną eksplozywną czynność ruchową. Biorąc pod uwagę różnice pomiędzy ćwiczeniami dolnych i górnych części ciała nie ma pewności, że tego typu protokoły będą równie skuteczne jak w przypadku protokołów PAPE uwzględniających kończyny górne. Badania analizujące efektywność supramaksymalnych obciążeń zewnętrznych w protokołach PAPE kończyn górnych wykorzystywały opuszczanie sztangi leżąc (Gołaś i wsp., 2016; Krzysztofik i wsp., 2022; Krzysztofik, Wilk, Gołaś, i wsp., 2020; Ulrich i Parstorfer, 2017). Jednakże, ćwiczenia dolnych części ciała takie jak przysiad ze sztangą pozwalają na zastosowanie istotnie wyższych wartości absolutnych obciążenia zewnętrznego oraz angażuje większy obszar mięśniowy, a także stawia większe wymagania hemodynamiczne i metaboliczne w porównaniu do ćwiczeń górnych części ciała jak np. wyciskania sztangi leżąc (Andrade i wsp., 2022). Skuteczność przysiadów ze sztangą w protokołach PAPE jest niezaprzeczalna (Seitz i Haff, 2016; Wilson i wsp., 2013), jednak w dostępnej literaturze brakuje eksperymentów, w których wykorzystywano supramaksymalne wartości koncentrycznego obciążenia zewnętrznego i porównywano wykonanie wyłącznie fazy ekscentrycznej i ekscentryczno-koncentrycznej. Mając na uwadze przesłanki, że efektywność pracy ekscentrycznej i supramaksymalnych obciążeń zewnętrznych podczas CA może być uzależniona od stosowanego ćwiczenia istnieje

potrzeba ustalenia czy zastosowanie takich protokołów przyczyni się do natychmiastowej poprawy skoczności.

Mechanizmy fizjologiczne odpowiedzialne za wystąpienie zjawiska PAPE są nadal przedmiotem dyskusji, lecz sugeruje się, iż są związane m.in. z podwyższoną temperaturą mięśni oraz zwiększoną zawartością płynów w tkance mięśniowej wskutek wykonanego CA (Blazevich i Babault, 2019). Koncepcja ta opiera się przede wszystkim na badaniach, w których oceniano powiązania zmian temperatury mięśniowej (Bergh i Ekblom, 1979; Binkhorst i wsp., 1977) oraz zawartości płynów wewnątrzmięśniowych (Sugi i wsp., 2015; Wang i wsp., 2015), a poziomem generowanej siły mięśniowej, natomiast nie na eksperymentach bezpośrednio analizujących protokoły PAPE. Według najlepszej wiedzy autora dostępne jest wyłącznie jedno badanie, w którym oceniano efekt PAPE i jednocześnie zmiany temperatury powierzchniowej skóry (Kalinowski i wsp., 2022). Jednak, we wspomnianym badaniu istotny wzrost temperatury powierzchniowej skóry nie był tożsamy z poprawą sprawności fizycznej. Uwzględniając wyniki badań, w których niewielka objętość CA pozwoliła odnotować istotny efekt PAPE (Krzysztofik, Wilk, Gołaś, i wsp., 2020; Tsoukos i wsp., 2019, 2021) można sądzić, że wzrost temperatury mięśniowej po CA może w pewnym stopniu odpowiadać za raportowany wzrost sprawności fizycznej, jednak wątpliwy jest dominujący udział tego mechanizmu.

Eksperyment przeprowadzony przez Kalinowskiego i wsp., (2022) wydaje się być również nielicznym (Gago i wsp., 2014; Kalinowski i wsp., 2022), w którym jednocześnie dokonano oceny zmian biomechanicznych właściwości ścięgna Achillesa i efektu PAPE. Kalinowski i wsp., (2022) wykazali istotny wzrost sztywności ścięgna Achillesa po zastosowaniu unilateralnego CA (przysiady ze sztangą w pozycji wykroczno-zakrocznej i skoki po zeskoku w głąb jednonóż), ale nie po bilateralnym CA (przysiad ze sztangą i skoki po zeskoku w głąb obunóż). Z kolei, to bilateralne CA miało istotny wpływ na wzrost wysokości w CMJ, przy nieistotnym wpływie unilateralnego CA. Z kolei, badanie Gago i wsp., (2014) nie wykazało zmian w sztywności ścięgna Achillesa, mimo odnotowania zjawiska PAPE (istotny wzrost siły skurczu i tempa narastania siły obrotowej podczas zginania podeszwowego stawu skokowego). Tymczasem badania oceniające biomechaniczne właściwości mięśni w protokołach PAPE najprawdopodobniej nie istnieją, a te oceniające wpływ aktywności fizycznej w znacznej większości wskazują na natychmiastowy i istotny wzrost sztywności mięśniowej wraz z odnotowywanym spadkiem sprawności fizycznej (Trybulski i wsp., 2022; Wang, De Vito, i wsp., 2017; Wang, De Vito, i wsp., 2017). Mechanizmy odpowiedzialne za te zjawisko nie są wystarczająco wytłumaczone - sugeruje się, że może to być mechanizm kompensacyjny lub ochronny organizmu przed zmęczeniem (Proske i Morgan, 2001).

Zwiększonej sztywności może towarzyszyć mikroobrzęk w obrębie włókien mięśniowych (Proske i Morgan, 2001). Z drugiej strony, zwiększony przepływ krwi i wzrost płynów wewnątrzkomórkowych na skutek podejmowanej aktywności fizycznej (Sleboda i wsp., 2019) to zjawiska, które potencjalnie mogą stanowić jeden z mechanizmów efektu PAPE (Blazevich i Babault, 2019). Rzeczywiście, badania Slebody i wsp., (2019) oraz Slebody i Robertsa, (2017) wykazały, że niewielki wzrost zawartości płynów wewnątrzkomórkowych miał znaczący wpływ na poziom generowanej siły (5% wzrost objętości płynów powodował ~10% wzrost generowanej siły). Z kolei, wzrost zawartości płynów wewnątrzkomórkowych prowadzi do istotnego zwiększenia ciśnienia wewnątrzmięśniowego, które można w sposób nieinwazyjny ocenić poprzez zmiany częstotliwości oscylacji za pomocą miotonometrii (Korhonen i wsp., 2005). Badanie Korhonen i wsp., (2005) wykazało prawie doskonałą, pozytywną korelację między wzrostem ciśnienia wewnątrzmięśniowego mięśnia ramiennie-promieniowego oraz mięśnia piszczelowego przedniego, a częstotliwością oscylacji tych mięśni. Badania dotyczące wpływu aktywności fizycznej na zmiany właściwości biomechanicznych mięśni i ścięgien dostarczają niejednoznacznych wyników. Z jednej strony, ocena zmian właściwości mechanicznych mięśni może pomóc we wczesnej identyfikacji narastania zmęczenia (Andonian i wsp., 2016; Siracusa i wsp., 2019; Trybulski i wsp., 2022). Z drugiej strony, biorąc pod uwagę powiązanie pomiędzy częstotliwością oscylacji, a ciśnieniem wewnątrzmięśniowym możliwe, że metoda ta pozwoli na rozpoznanie wpływu jednego z potencjalnych mechanizmów leżących u podstaw zjawiska PAPE.

Rezultaty badania mogą mieć duże znaczenie dla metodyki wykorzystania protokołów PAPE w kwestii skuteczności zastosowania supramaksymalnych wartości obciążenia zewnętrznego i wyłącznie fazy ekscentrycznej, a także ekscentryczno-koncentrycznej przysiadów ze sztangą jako CA w celu wywołania efektu PAPE. Ponadto, jednoczesna analiza zmian temperatury powierzchniowej skóry oraz właściwości biomechanicznych mięśni pozwoli zweryfikować prawdopodobny udział tych mechanizmów jako podstaw efektu PAPE.

5.2. Cel pracy, pytania i hipotezy badawcze

Celem niniejszej dysertacji było ustalenie natychmiastowego wpływu wykonania wyłącznie fazy ekscentrycznej lub ekscentryczno-koncentrycznej przysiadu ze sztangą z zastosowaniem supramaksymalnego obciążenia zewnętrznego na wysokość i moc względną

w CMJ oraz zmiany temperatury powierzchniowej skóry okolic głowy bocznej mięśnia czworogłowego uda i właściwości biomechaniczne tego mięśnia.

Realizacja celu pracy sprowadziła się do uzyskania odpowiedzi na niżej sformułowane pytania:

1. Czy zastosowanie obciążenia supramaksymalnego i fazy wyłącznie ekscentrycznej podczas przysiadów ze sztangą przyczyni się do wywołania efektu PAPE ocenianego przez CMJ?
2. Czy zastosowanie obciążenia supramaksymalnego w fazie ekscentrycznej i submaksymalnego podczas fazy koncentrycznej przysiadów ze sztangą przyczyni się do wywołania efektu PAPE ocenianego przez CMJ?
3. Czy wielkość efektu PAPE ocenianego przez CMJ będzie się różniło pomiędzy zastosowanymi protokołami aktywacyjnymi?
4. Czy zastosowane protokoły aktywacyjne przyczynią się do istotnego wzrostu temperatury powierzchniowej skóry okolic głowy bocznej mięśnia czworogłowego uda i będą powiązane z wielkością efektu PAPE?
5. Czy zastosowane protokoły aktywacyjne przyczynią się do istotnych zmian właściwości biomechanicznych głowy bocznej mięśnia czworogłowego uda i będą powiązane z wielkością efektu PAPE?

Sformułowano także następujące hipotezy badawcze:

1. Zastosowanie obciążenia supramaksymalnego oraz wyłącznie fazy ekscentrycznej jak i pełnego cyklu ekscentryczno-koncentrycznego podczas przysiadu ze sztangą wywołuje istotny efekt PAPE.
2. Wykonanie zarówno fazy ekscentrycznej jak i koncentrycznej podczas przysiadu ze sztangą z zastosowaniem obciążenia supramaksymalnego przyczyni się do odnotowania istotnie większego efektu PAPE w porównaniu do wykonania wyłącznie fazy ekscentrycznej.
3. Zastosowane protokoły aktywacyjne nie będą miały wpływu na poziom temperatury powierzchniowej skóry okolic głowy bocznej mięśnia czworogłowego uda i nie będą powiązane z wielkością efektu PAPE.

4. Zastosowane protokoły aktywacyjne będą miały istotny wpływ na właściwości biomechaniczne głowy bocznej mięśnia czworogłowego uda, ale nie będą powiązane z wielkością efektu PAPE.

6. MATERIAŁ I METODY BADAWCZE

6.1. Materiał badawczy

Do badania zakwalifikowano 17 uczestników, jednak w toku eksperymentu jeden z nich zrezygnował, a z powodu błędów pomiarowych, dane dwóch uczestników nie zostały włączone do analizy. Ostatecznie, w badaniu wzięło udział 14 zdrowych mężczyzn uprawiających trójbój siłowy. Dane uczestników badania przedstawiono w Tabeli 1. Projekt badawczy uzyskał zgodę Komisji Bioetycznej nr 03/2021. Każdy z uczestników przed rozpoczęciem badania został poinformowany o przebiegu, zagrożeniach i korzyściach wynikających z uczestnictwa w badaniu, a także o możliwości zrezygnowania z udziału w dowolnej chwili. Każdy z badanych podpisał formularz świadomej zgody. Uczestnicy nie zostali poinformowani o oczekiwanych wynikach. Przed rozpoczęciem badania uczestnicy zostali poinstruowani, aby w trakcie jego trwania utrzymywali swoje nawyki żywieniowe i nie stosowali żadnych suplementów ani środków pobudzających przed oraz podczas jego trwania. Ponadto, zostali poproszeni o niewykonywanie żadnych ćwiczeń oporowych 48 godzin przed rozpoczęciem każdej z sesji eksperymentalnych. Pomiary odbyły się w pracowni Siły i Mocy Mięśniowej oraz Pracowni Ćwiczeń Oporowych Akademii Wychowania Fizycznego im. Jerzego Kukuczki w Katowicach.

Kryteria włączenia do badania:

- poziom siły mięśniowej w przysiadzie ze sztangą > 1.75 krotności masy ciała,
- regularnie podejmowany trening oporowy, z uwzględnieniem przysiadów ze sztangą o wysokiej intensywności w ciągu co najmniej ostatnich 12 miesięcy,
- doświadczenie z zastosowaniem WR w przysiadzie ze sztangą,
- płeć męska,
- staż treningowy przekraczający 4 lata,
- wiek pomiędzy 18-30 lat

Kryterium wyłączenia z badania:

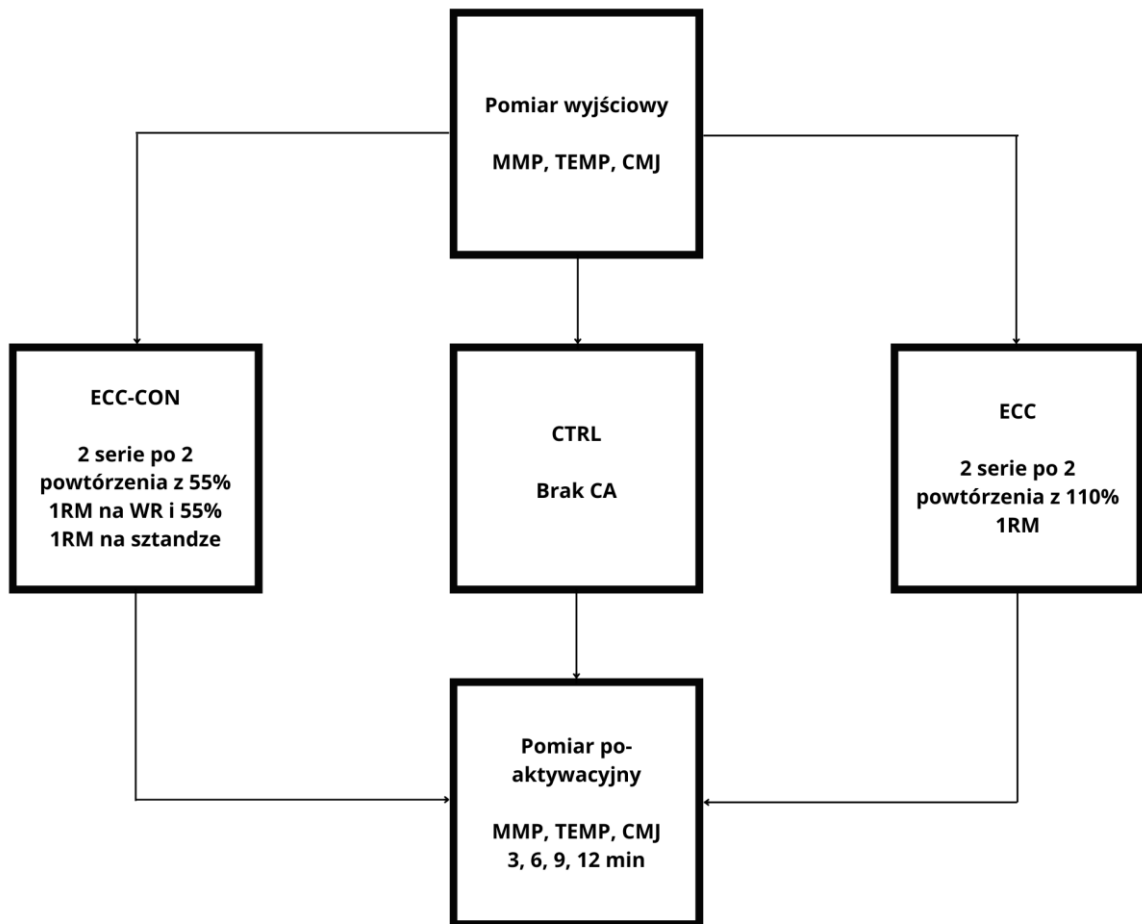
- przebyte urazu w ciągu ostatnich 12 miesięcy,
- absencja treningowa przekraczająca 4 tygodnie w ostatnim roku

Tabela 1. Charakterystyka uczestników badania

	Uczestnicy [n=14]
Wiek [lata]	22.5 ± 2.3
Wysokość ciała [cm]	177.5 ± 6.5
Masa ciała [kg]	84.2 ± 11.1
Staż treningu oporowego [lata]	5.4 ± 1.6
Poziom siły mięśniowej w przysiadzie ze sztangą [kg]	177 ± 23

6.2. Metody badawcze

W badaniu zastosowano metodę eksperymentalną, pojedynczo zaślepioną. Uczestnicy wzięli udział w sesji zapoznawczej i trzech sesjach eksperymentalnych w losowej kolejności. Randomizację przeprowadzono za pomocą generatora online (randomization.com). Sesja zapoznawcza polegała na wyznaczeniu poziomu siły maksymalnej w przysiadzie ze sztangą oraz zapoznaniu z procedurą sesji eksperymentalnych. Sesje eksperymentalne wykonywano z tygodniowym odstępem, podczas których każdy uczestnik wykonał: ECC-CON - 2 serie po 2 powtórzenia przysiadów ze sztangą z obciążeniem zewnętrznym wynoszącym 110% 1RM rozdysponowanym w 55% na sztandze i w 55% na WR; ECC - 2 serie po 2 powtórzenia wyłącznie fazy ekscentrycznej przysiadów ze sztangą z obciążeniem wynoszącym 110% 1RM; CTRL - bez wykonania CA. W celu oceny natychmiastowego wpływu zastosowanych CA na CMJ, biomechaniczne właściwości głowy bocznej mięśnia czworogłowego uda oraz temperaturę powierzchniową skóry okolic tego mięśnia wykonano pojedyncze serie 2 powtórzeń CMJ 5 minut przed i w 3, 6, 9 oraz 12 minucie po wykonanym CA. Schemat przebiegu eksperymentu został przedstawiony na rycinie 4.



Rycina 4. Schemat przebiegu sesji eksperymentalnych

1RM – jedno powtórzenia maksymalne; CA – ćwiczenie aktywacyjne; ECC-CON – przysiady ze sztangą z wykorzystaniem przyborów zwalniających obciążenie; ECC – wykonanie wyłącznie fazy ekscentrycznej przysiadów ze sztangą; CTRL – warunki kontrolne, brak ćwiczenia aktywacyjnego; TEMP – pomiar temperatury powierzchniowej skóry; MMP – pomiar właściwości biomechanicznych; CMJ – skok pionowy bez zamachu ramion.

6.2.1. Sesja zapoznawcza i test 1RM w przysiadzie ze sztangą

Sesja zapoznawcza została przeprowadzona tydzień przed rozpoczęciem pierwszej sesji eksperymentalnej i miała na celu wyznaczenie wartości 1RM w przysiadzie ze sztangą. Wszyscy uczestnicy przed przystąpieniem do eksperymentu wykonali standaryzowaną rozgrzewkę składającą się z 5 minutowej jazdy na ergometrze rowerowym z elementem angażującym górną część ciała (Keiser M3i Total Body Trainer, Keiser Corporation, Fresno, Kalifornia) przy zastosowaniu oporu pozwalającego na generowanie 100 W i kadencję 70-80 obr./min. Następnie wykonano specyficzną rozgrzewkę dolnej części ciała składającą się z 2 obwodów po 10 przysiadów z masą ciała, 10 wypchnięć bioder w leżeniu tyłem, 5 wypadów

w tył oraz 5 wypadów w bok na kończynę dolną, a także 5 submaksymalnych skoków pionowych.

Po zakończeniu rozgrzewki uczestnicy wykonali 10, 6, 4 i 3 powtórzenia przysiadów ze sztangą, rozpoczynając od obciążenia 20 kg i stopniowo przechodząc do szacunkowej wartości 80% 1RM (zadeklarowanej przez uczestników). Pierwsze obciążenie testowe wynosiło 90% szacunkowej wartości 1RM i było zwiększane między 2.5 a 10 kg przy każdej kolejnej próbie w zależności od możliwości uczestnika, aż do momentu, gdy ten nie był w stanie wykonać pełnego ćwiczenia z zachowaniem prawidłowej techniki. Wynik testu 1RM określano w maksymalnie 5 seriach po 1 powtórzeniu z 5-minutowymi przerwami pomiędzy seriami (Shimano i wsp., 2006). Wszystkie próby wykonywano z kontrolowanym czasem trwania fazy ekscentrycznej wynoszącym 3 s, natomiast w przypadku fazy koncentrycznej poinstruowano uczestników o możliwie jak najszybszym jej wykonaniu (Wilk, Gepfert, i wsp., 2020; Wilk, Gołaś, i wsp., 2020).

Podczas procedury testu 1RM obecni byli certyfikowani instruktorzy treningu oporowego. Zawodnicy rozpoczynali ćwiczenie z pozycji stojącej z pełnym wyprostem kolan i bioder, w rozkroku na szerokość barków oraz obiema stopami ułożonymi płasko na podłożu równoległe, lub z rotacją zewnętrzną wynoszącą maksymalnie 15° (Martínez-Cava i wsp., 2019). Sztanga ułożona była na grzbiecie na wysokości łopatek, natomiast rozstaw stóp i ich ułożenie były dopasowywane indywidualnie, a następnie powtarzane podczas każdej kolejnej sesji eksperymentalnej. Z pozycji wyprostowanej uczestnicy wykonywali fazę ekscentryczną przysiadów ze sztangą do momentu obniżenia biodra poniżej linii kolan, a następnie bez zatrzymania wykonywali fazę koncentryczną. Stosowanie pasa trójbojowego, pasów neoprenowych czy innych akcesoriów treningowych nie było dozwolone, natomiast wszyscy uczestnicy przystąpili do badania używając obuwia o podwyższonym podbiciu pięty - przystosowanego do podnoszenia ciężarów. Wykonanie ćwiczenia odbywało się zgodnie z zasadami Międzynarodowej Federacji Trójboju Siłowego (International Powerlifting Federation - IPF).

6.2.2. Ćwiczenia aktywacyjne

Po wykonaniu jednakowej rozgrzewki jak podczas sesji zapoznawczej uczestnicy przystąpili do przysiadów ze sztangą, a następnie CA lub marszu na bieżni (CTRL). Przed właściwym CA uczestnicy wykonali po 2 powtórzenia przysiadów ze sztangą

z obciążeniem wynoszącym 60 i 80% 1RM, a następnie CA składające się z: ECC-CON - 2 serii po 2 powtórzenia przysiadów ze sztangą z obciążeniem zewnętrznym wynoszącym 110% 1RM rozdysponowanym w 55% na sztandze i w 55% na WR; ECC - 2 serii po 2 powtórzenia wyłącznie fazy ekscentrycznej przysiadów ze sztangą z obciążeniem wynoszącym 110% 1RM; CTRL - bez wykonania CA. Przerwa wypoczynkowa między seriami wynosiła 3 minuty. Podczas ECC-CON uczestnik wykonywał fazę ekscentryczną przysiadów ze sztangą, a niezwłocznie po zwolnieniu WR przystępował do wykonania fazy koncentrycznej. Po zakończonym powtórzeniu dwóch doświadczonych instruktorów ćwiczeń oporowych ponownie zakładało WR na sztangę, a uczestnik wykonywał kolejne powtórzenie w jednakowy sposób. Podczas ECC uczestnik wykonywał wyłącznie fazę ekscentryczną przysiadów ze sztangą, po czym instruktorzy podnosili sztangę na stojaki, a uczestnik przystępował do kolejnego powtórzenia. Uczestnicy zostali poinstruowani o wykonaniu fazy ekscentrycznej ćwiczenia w czasie 3 s, natomiast fazy koncentrycznej najszybciej jak to możliwe.

6.2.3. Termografia

Pomiar temperatury powierzchniowej skóry kończyn dolnych (mięśni czworogłowych) został wykonany za pomocą kamery termowizyjnej (Flir E54, FLIR SYSTEM, Wilsonville, OR, USA) o rozdzielczości 320x240 pikseli, czułości 0.05 K i emisyjności ustawionej w zakresie 0.97-0.98 zgodnie z protokołem Glamorgan (Ammer, 2008) oraz z uwzględnieniem listy kontrolnej ukierunkowanej na standaryzację obrazowania termograficznego w badaniach dotyczących aktywności fizycznej (Moreira i wsp., 2017). Kamera usytuowana była na statywie uniemożliwiającym poruszenie obrazu w trakcie wykonywania pomiaru. Urządzenie skalibrowano za pomocą czarnego ciała. Wszystkie pomiary były wykonywane w pomieszczeniu o stałej temperaturze i wilgotności (21°C, 58%). Do dalszej analizy zachowano średnią temperaturę w regionie zainteresowania odpowiadającemu obszarowi głowy bocznej mięśnia czworogłowego uda, którą wyznaczono za pomocą specjalistycznego oprogramowania (Flir Thermal Studio, Flir System, Wilsonville, OR, USA). Obrazy termowizyjne zbierano bezpośrednio przed wykonanymi CMJ (5 min przed i 3, 6, 9 oraz 12 min po zakończeniu CA).

6.2.4. Pomiar sprawności w skoku pionowym

Próby skoków pionowych były wykonywane na platformie dynamometrycznej ForceDecks (VALD Performance, Brisbane, Australia). Rejestrowano następujące zmienne:

- wysokość skoku na podstawie czasu lotu [cm]
- względną moc maksymalną [W/kg]

W każdym punkcie czasowym uczestnicy wykonywali 2 próby CMJ. Pozycją wyjściową skoków była pozycja stojąca z wyprostowanym tułowiem, kolanami całkowicie wyprostowanymi, stopami rozstawionymi na szerokość barków i dłońmi opartymi o biodra w trakcie trwania całej próby. Uczestnicy badania zostali poinstruowani, aby skoczyć jak najwyżej i z maksymalnym zaangażowaniem. Po każdym skoku uczestnik powracał do pozycji wyjściowej, a procedura ta była powtarzana. Do dalszej analizy wykorzystano próbę, w której osiągnięto najwyższą wysokość CMJ.

6.2.5. Miotonometria

Do pomiaru właściwości biomechanicznych tkanek miękkich wykorzystano miotonometr ręczny (MyotonPRO, Myoton AS, Tallin, Estonia). Ocenie poddano głowę boczną mięśnia czworogłowego uda. Miejsce pomiarowe wyznaczono na poziomie 50% odległości w linii prostej między krętarzem większym, a stawem piszczelowo strzałkowym (Bizzini i Mannion, 2003) i oznaczono trudno zmywalnym markerem. Uczestnicy badania zostali poproszeni o oznaczanie tego miejsca markerem tak, aby w kolejnej sesji miejsce pomiaru mogło zostać dokładnie odtworzone. Akcelerometr urządzenia Myoton ustawiono na 3200 Hz, a wartość średnią uzyskaną z trzech kolejnych pomiarów (0.4 N przez 15 ms) wykorzystano do dalszych analiz. Bazując na zjawisku tłumienia drgań mechanicznych, urządzenie umożliwia pomiar m.in. takich parametrów jak:

- częstotliwość naturalnych oscylacji [Hz];
- sztywność dynamiczna [N/m];
- wskaźnik elastyczności [logarytm]

6.3. Metody analizy statystycznej

Wszystkie analizy statystyczne przeprowadzono przy użyciu programu SPSS (wersja 25.0; SPSS, Inc., Chicago, IL, USA) i wyrażono je jako średnie z odchyleniami standardowymi ($\pm$ SD). Co więcej, obliczono 95%-owe przedziały ufności (95%CI) dla wartości średnich oraz względne różnice (procentowe) między wartościami wyjściowymi, a wartościami po CA. Istotność statystyczną ustalono na poziomie $p < 0.05$. Testy Shapiro-Wilka i Mauchly'ego zastosowano w celu sprawdzenia normalności i sferyczności wariancji danych z próby.

Co więcej, na podstawie wartości wyjściowych poszczególnych zmiennych odnotowanych w sesjach eksperymentalnych obliczona została rzetelność pomiarów badanych zmiennych (dwuczynnikowe efekty mieszane, zgodność bezwzględna, współczynnik korelacji wewnątrzklasowej pojedynczego oceniającego) oraz ich względna zmienność (współczynnik zmienności). Progi interpretacji wyników współczynników korelacji wewnątrzklasowej były interpretowane jako: <0.5 „słaby”, $0.5-0.75$ „umiarkowany”, $<0.76-0.9$ „dobry” i >0.90 jako „doskonały” (Koo i Li, 2016). Natomiast dla współczynnika zmienności: $<10\%$ „bardzo dobre”, $10-20\%$ „dobre”, $<21-30\%$ „dopuszczalne”, $>30\%$ „niedopuszczalne” (Pélabon i wsp., 2020).

Najmniejsza istotna zmiana (smallest worthwhile change - SWC, obliczona przy użyciu wzoru: odchylenie standardowe $\times 0.2$) (Buchheit, 2008) została użyta do zdefiniowania reagujących i niereagujących na CA. Uczestnik został uznany za: i) reagującego, jeśli wzrost wysokości CMJ przekroczył wartość SWC, ii) niereagujący, jeśli zmiana wysokości CMJ mieściła się w wartości SWC, oraz iii) reagujący negatywnie, jeśli wysokość CMJ spadła powyżej SWC. Co więcej, przeprowadzono test chi-kwadrat w celu określenia, czy istnieją istotne różnice między uczestnikami reagującymi, niereagującymi i reagującymi negatywnie na zastosowane CA.

Dwuczynnikowa analiza wariancji ANOVA (3 [warunki] $\times 5$ [czas]) została zastosowana do ustalenia wpływu CA na właściwości biomechaniczne głowy bocznej mięśnia czworogłowego uda i temperaturę powierzchniową skóry okolic tego mięśnia oraz wysokość i moc względną podczas CMJ. Dodatkowa dwuczynnikowa analiza wariancji ANOVA (3 [warunki] $\times 2$ [czas]) została zastosowana do ustalenia wpływu CA na wyżej wymienione zmienne, uwzględniając wyłącznie indywidualną szczytową odpowiedź PAPE (PEAK). W przypadku stwierdzenia istotnego efektu głównego lub interakcji wykorzystano testy post-hoc z korektą Bonferroniego do analizy porównań parami. Wielkość średnich różnic wyrażono za pomocą standaryzowanych wielkości efektów. Przedziały wartości wielkości efektów g

Hedgesa interpretowano jako ≤ 0.20 „mały”, 0.21-0.79 „średni”, natomiast > 0.80 jako „duży” (Hedges i Olkin, 1985).

Do analizy zależności między siłą maksymalną w przysiadzie ze sztangą, wyjściowymi wartościami wysokości i mocy względnej podczas CMJ oraz procentowymi różnicami między wartością wyjściową, a PEAK w zarejestrowanych wartościach właściwości biomechanicznych, a szczytową procentową wartością odpowiedzi PAPE podczas poszczególnych sesji eksperymentalnych wykorzystano współczynnik korelacji liniowej Pearsona. Przedziały wartości korelacji interpretowano jako: „znikome” (0.0-0.09), „małe” (0.10-0.29), „umiarkowane” (0.30-0.49), „duże” (0.50-0.69), „bardzo duże” (0.70-0.89), „prawie doskonałe” (0.90-0.99) i „doskonałe” (1.0) (Schober i wsp., 2018).

7. WYNIKI

Wielkość próby określono za pomocą programu G*Power w wersji 3.1.9.2 (Dusseldorf, Niemcy), przyjmując następujące parametry testu statystycznego: „ANOVA dla powtarzanych pomiarów, w schemacie wewnątrz czynnikowym” (jedna grupa uczestników, trzy czynniki eksperymentalne i pięć pomiarów), moc statystyczna przyjęta na poziomie 0.8, poziom istotności 0.05, a wielkość efektu 0.29-0.51 na podstawie wcześniejszych badań, w których badano natychmiastowe zmiany właściwości biomechanicznych mięśni po wysiłku fizycznym (Wang, De Vito, i wsp., 2017) i wpływ PAPE na wyniki w CMJ (Seitz i Haff, 2016). Analiza wykazała, że do tego badania wymagana była minimalna wielkość próby wynosząca 6-14 uczestników.

7.1. Rzetelność pomiarów

W Tabeli 2 przedstawiono poziomy rzetelności poszczególnych pomiarów wykonanych na potrzeby niniejszego eksperymentu.

Tabela 2. Wartości współczynnika korelacji wewnątrzklasowej oraz współczynnika zmienności dla analizowanych parametrów

	ICC (95%CI)	CV
JH	0.93 (0.83 do 0.97)	5%
RPP	0.89 (0.73 do 0.96)	5%
TEMP	0.88 (0.71 do 0.96)	1.5%
FREQ	0.89 (0.74 do 0.96)	4%
STIFF	0.95 (0.89 do 0.98)	4%
DEC	0.96 (0.90 do 0.98)	6%

ICC – współczynnik korelacji wewnątrzklasowej; CV – współczynnik zmienności; JH – wysokość skoku; RPP – względna moc maksymalna; TEMP – temperatura powierzchniowa skóry; FREQ – częstotliwość oscylacji; STIFF – sztywność; DEC - elastyczność

7.2. Efektywność ćwiczeń aktywacyjnych w badanej grupie

Wartość SWC dla wysokości CMJ wynosiła dla ECC-CON: 1.04 cm, a dla ECC i CTRL: 0.83 cm.

Test chi-kwadrat wykazał, że różnice między uczestnikami reagującymi, niereagującymi i reagującymi negatywnie na zastosowane CA były nieistotne statystycznie ($p=0.957$) (Tabela 3).

Tabela 3. Rozkład uczestników reagujących, niereagujących oraz reagujących negatywnie na zastosowane CA

CA	Reagujący	Niereagujący	Reagujący negatywnie
ECC-CON	6	7	1
ECC	5	8	1
CTRL	4	9	1

CA – ćwiczenie aktywacyjne; ECC-CON – przysiady ze sztangą z wykorzystaniem przyborów zwalniających obciążenie; ECC – wykonanie wyłącznie fazy ekscentrycznej przysiadów ze sztangą; CTRL – warunki kontrolne, brak ćwiczenia aktywacyjnego

7.3. Wysokość i poziom względnej mocy mięśniowej podczas skoku pionowego

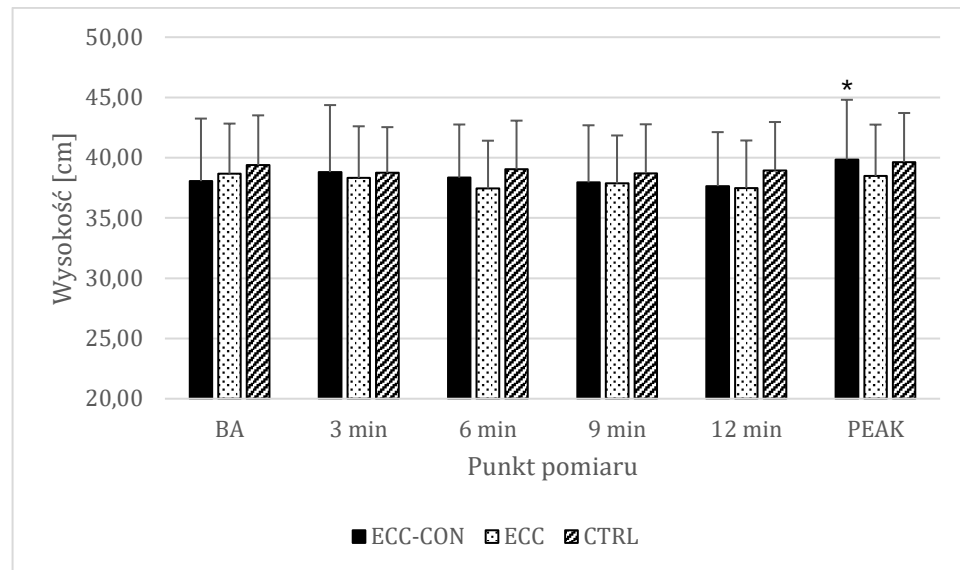
Dwuczynnikowa analiza wariancji ANOVA nie wykazała istotnej interakcji ($p=0.175$, $F=1.475$), efektu głównego warunków ($p=0.298$, $F=1.268$), a także efektu głównego czasu ($p=0.067$, $F=2.340$) na wysokość CMJ (Wykres 1).

Dwuczynnikowa analiza wariancji ANOVA nie wykazała istotnej interakcji ($p=0.963$, $F=0.303$), efektu głównego warunków ($p=0.831$, $F=0.187$), a także efektu głównego czasu ($p=0.846$, $F=0.345$) na względną mocą szczytową podczas CMJ (Wykres 2).

7.4. Wysokość i poziom względnej mocy mięśniowej podczas skoku pionowego po indywidualnej optymalnej przerwie wypoczynkowej

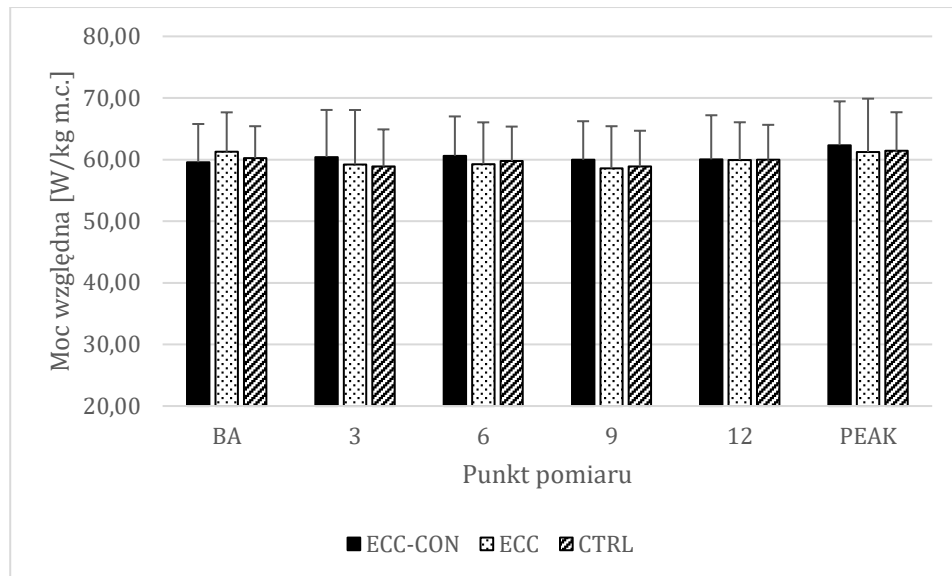
Dwuczynnikowa analiza wariancji ANOVA wykazała istotną interakcję ($p=0.021$, $F=4.486$) oraz istotny efekt główny czasu ($p=0.003$, $F=13.898$), ale nieistotny efekt główny warunków ($p=0.385$, $F=0.992$) na wysokość CMJ. Przeprowadzona analiza post-hoc wykazała

istotnie wyższą wysokość CMJ w optymalnym czasie przerwy wypoczynkowej w porównaniu do wartości wyjściowej (38.1 ± 5.2 vs. 39.8 ± 5.0 cm; $p=0.003$; $ES=0.32$; $\Delta=4.9 \pm 5.0\%$) podczas ECC-CON (Wykres 1).



Wykres 1. Wysokość skoku pionowego w poszczególnych punktach pomiarowych podczas każdej sesji eksperymentalnej

Dwuczynnikowa analiza wariancji ANOVA nie wykazała istotnej interakcji ($p=0.632$, $F=0.467$), efektu głównego warunków ($p=0.812$, $F=0.209$), a także efektu głównego czasu ($p=0.073$, $F=3.811$) na względną mocą szczytową podczas CMJ (Wykres 2).



Wykres 2. Generowana moc względna podczas skoku pionowego w poszczególnych punktach pomiarowych podczas każdej sesji eksperymentalnej

7.5. Biomechaniczne właściwości mięśni

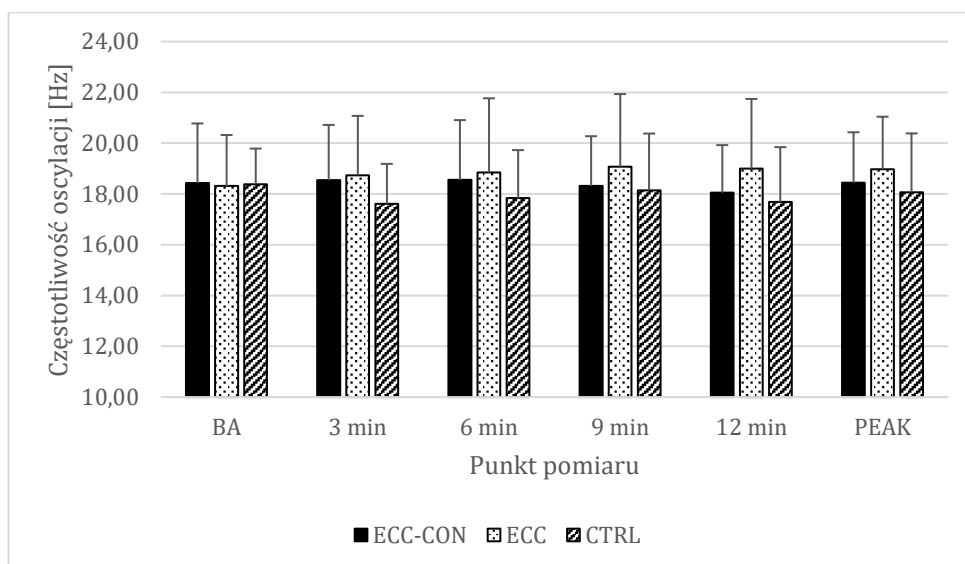
Dwuczynnikowa analiza wariancji ANOVA nie wykazała istotnej interakcji ($p=0.254$, $F=1.296$), efektu głównego warunków ($p=0.239$, $F=1.511$), a także efektu głównego czasu ($p=0.663$, $F=0.601$) na częstotliwość oscylacji głowy bocznej mięśnia czworogłowego uda (Wykres 3).

Dwuczynnikowa analiza wariancji ANOVA nie wykazała istotnej interakcji ($p=0.868$, $F=0.480$), efektu głównego warunków ($p=0.371$, $F=1.031$), a także efektu głównego czasu ($p=0.898$, $F=0.267$) na sztywność głowy bocznej mięśnia czworogłowego uda (Wykres 4).

Dwuczynnikowa analiza wariancji ANOVA nie wykazała istotnej interakcji ($p=0.868$, $F=0.480$), efektu głównego warunków ($p=0.371$, $F=1.031$), a także efektu głównego czasu ($p=0.898$, $F=0.267$) na elastyczność głowy bocznej mięśnia czworogłowego uda (Wykres 5).

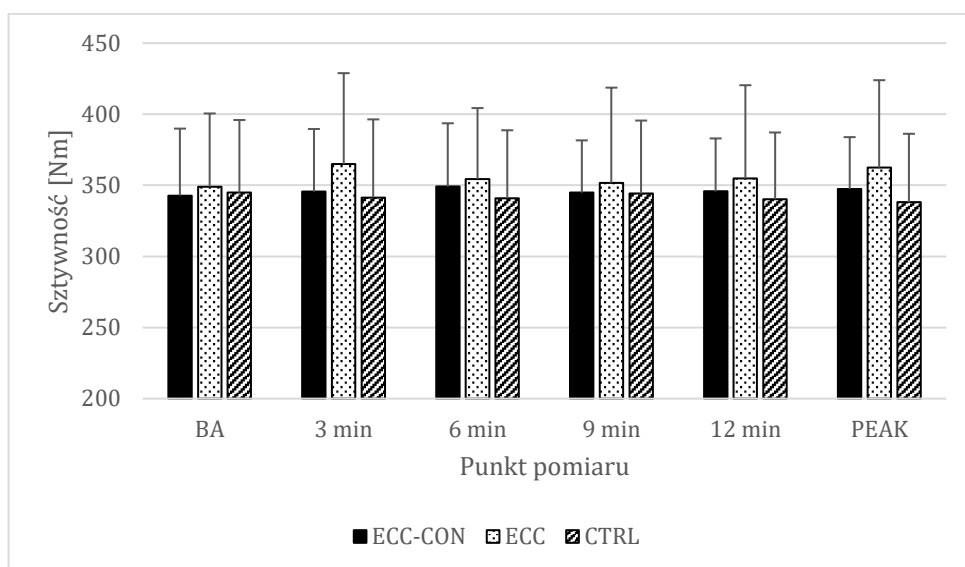
7.5.1. Biomechaniczne właściwości głowy bocznej mięśnia czworogłowego uda po indywidualnej optymalnej przerwie wypoczynkowej

Dwuczynnikowa analiza wariancji ANOVA nie wykazała istotnej interakcji ($p=0.333$, $F=1.147$), efektu głównego warunków ($p=0.521$, $F=0.669$), a także efektu głównego czasu ($p=0.561$, $F=0.356$) na częstotliwość oscylacji głowy bocznej mięśnia czworogłowego uda (Wykres 3).



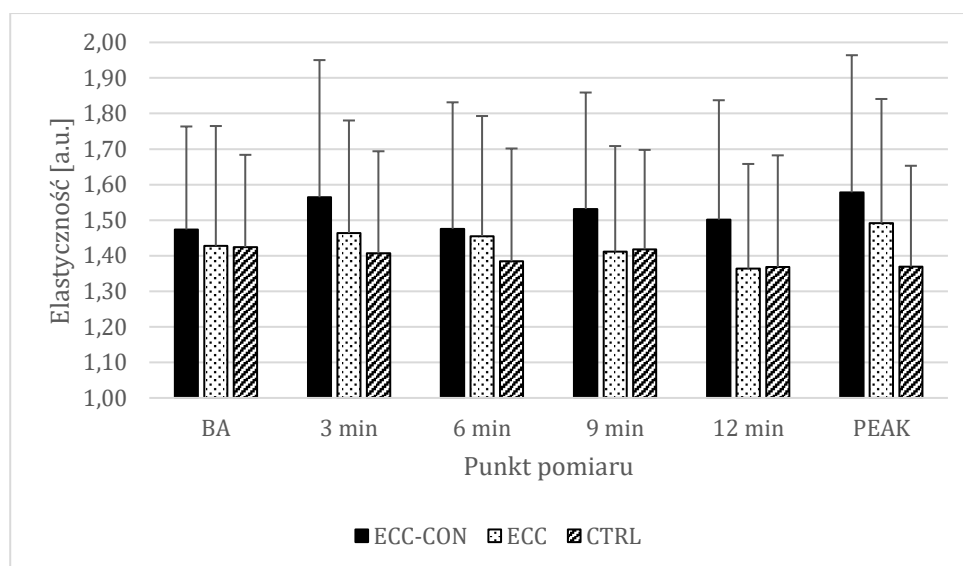
Wykres 3. Częstotliwość oscylacji głowy bocznej mięśnia czworogłowego uda w poszczególnych punktach pomiarowych podczas każdej sesji eksperymentalnej

Dwuczynnikowa analiza wariancji ANOVA nie wykazała istotnej interakcji ($p=0.419$, $F=0.899$), efektu głównego warunków ($p=0.116$, $F=2.348$), a także efektu głównego czasu ($p=0.449$, $F=0.609$) na sztywność głowy bocznej mięśnia czworogłowego uda (Wykres 4).



Wykres 4. Sztywność głowy bocznej mięśnia czworogłowego uda w poszczególnych punktach pomiarowych podczas każdej sesji eksperymentalnej

Dwuczynnikowa analiza wariancji ANOVA nie wykazała istotnej interakcji ($p=0.153$, $F=2.021$), efektu głównego warunków ($p=0.051$, $F=3.354$), a także efektu głównego czasu ($p=0.235$, $F=1.550$) na elastyczność głowy bocznej mięśnia czworogłowego uda (Wykres 5).



Wykres 5. Elastyczność głowy bocznej mięśnia czworogłowego uda w poszczególnych punktach pomiarowych podczas każdej sesji eksperymentalnej

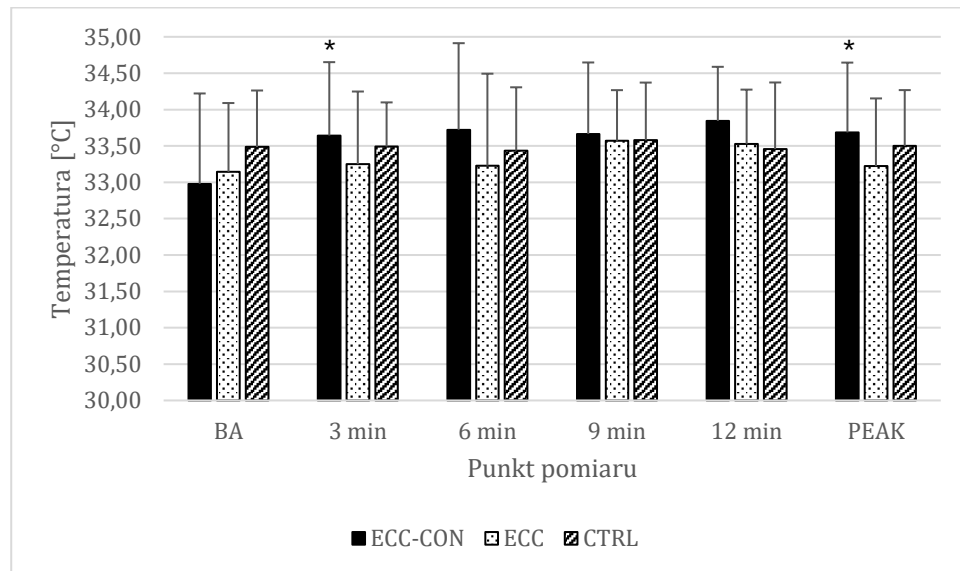
7.6. Temperatura powierzchniowa skóry

Dwuczynnikowa analiza wariancji ANOVA wykazała istotną interakcję ($p<0.001$, $F=3.922$) i efekt główny czasu ($p=0.007$, $F=4.523$), ale nie efekt główny warunków ($p=0.312$, $F=1.222$) na temperaturę powierzchniową skóry okolic głowy bocznej mięśnia czworogłowego uda. Przeprowadzona analiza post-hoc wykazała istotny wzrost temperatury powierzchniowej skóry okolic głowy bocznej mięśnia czworogłowego uda w 3 min po CA w porównaniu do wartości wyjściowej (32.98 ± 1.24 vs $33.64 \pm 1.01^\circ\text{C}$; $p=0.001$; $ES=0.57$; $\Delta=2.1 \pm 1.5\%$) podczas ECC-CON (Wykres 6).

7.6.1. Temperatura powierzchniowa skóry po indywidualnej optymalnej przerwie wypoczynkowej

Dwuczynnikowa analiza wariancji ANOVA wykazała istotną interakcję ($p=0.023$, $F=5.304$) i efekt główny czasu ($p=0.004$, $F=12.270$), ale nie efekt główny warunków ($p=0.104$,

F=2.474) na temperaturę powierzchniową skóry okolic głowy bocznej mięśnia czworogłowego uda. Przeprowadzona analiza post-hoc wykazała istotny wzrost temperatury powierzchniowej skóry okolic głowy bocznej mięśnia czworogłowego uda po optymalnym czasie przerwy wypoczynkowej w porównaniu do wartości wyjściowej (32.98 ± 1.24 vs $33.69 \pm 0.96^{\circ}\text{C}$; $p=0.006$; ES=0.62; $\Delta=2.2 \pm 2.6\%$) podczas ECC-CON (Wykres 6).



Wykres 6. Temperatura powierzchniowa skóry okolic głowy bocznej mięśnia czworogłowego uda w poszczególnych punktach pomiarowych podczas każdej sesji eksperymentalnej

7.7. Powiązania między analizowanymi parametrami

Test korelacji Pearsona nie wykazał żadnych istotnych korelacji między wielkością efektu PAPE (ocenianą procentową zmianą wysokości CMJ po optymalnej przerwie wypoczynkowej), a procentową zmianą poszczególnych zmiennych między wartością wyjściową, a szczytowym efektem PAPE (Tabela 4).

Tabela 4. Współczynniki korelacji dla wybranych zmiennych CMJ i biomechanicznych właściwości głowy bocznej mięśnia czworogłowego uda, a szczytową procentową wartością odpowiedzi PAPE

	ECC-CON	ECC	CTRL
1RM	0.01	0.273	0.309
JH	-0.17	-0.12	-0.24
RPP	-0.28	0.23	0.11
FREQ	-0.27	-0.05	-0.13
STIFF	-0.38	-0.13	0.35
DEC	0.52	-0.13	-0.11

ECC-CON – przysiady ze sztangą z wykorzystaniem przyborów zwalniających obciążenie; ECC – wykonanie wyłącznie fazy ekscentrycznej przysiadów ze sztangą; CTRL – warunki kontrolne, brak ćwiczenia aktywacyjnego; 1RM – wartość jednego powtórzenia maksymalnego; JH – wysokość skoku; RPP – względna moc maksymalna; TEMP – temperatura powierzchniowa skóry; FREQ – częstotliwość oscylacji; STIFF – sztywność; DEC – elastyczność.

8. DYSKUSJA

Głównym celem przeprowadzonego eksperymentu było ustalenie natychmiastowego wpływu wykonania wyłącznie fazy ekscentrycznej lub ekscentryczno-koncentrycznej przysiadu ze sztangą z zastosowaniem supramaksymalnego obciążenia zewnętrznego na wysokość i maksymalną moc względną w CMJ oraz zmiany temperatury powierzchniowej skóry okolic głowy bocznej mięśnia czworogłowego uda i właściwości biomechaniczne tego mięśnia.

Kluczowym odkryciem niniejszego badania jest fakt, że wyłącznie protokół ECC-CON przyczynił się do istotnej poprawy wysokości CMJ, jednak miało to miejsce analizując jedynie indywidualny optymalny czas przerwy wypoczynkowej w grupie wytrenowanych siłowo mężczyzn. Ponadto, towarzyszył temu istotny wzrost temperatury powierzchniowej skóry okolic głowy bocznej mięśnia czworogłowego uda. Z kolei, żaden z zastosowanych protokołów nie miał istotnego wpływu na właściwości biomechaniczne głowy bocznej mięśnia czworogłowego uda.

Według najlepszej wiedzy autora jest to pierwsze badanie, w którym oceniano wpływ wykonania wyłącznie fazy ekscentrycznej przysiadów ze sztangą i supramaksymalnego obciążenia zewnętrznego na efekt PAPE weryfikowany poprzez CMJ. Rezultaty tego badania nie potwierdziły stawianej hipotezy wykazując brak istotnego efektu zastosowanego CA na CMJ. Wynik ten jest również sprzeczny z doniesieniami literatury analizującymi wykorzystanie wyłącznie fazy ekscentrycznej i supramaksymalnego obciążenia zewnętrznego na efekt PAPE kończyn górnych (Krzysztofik, Wilk, Gołaś, i wsp., 2020; Krzysztofik, Wilk, Lockie, i wsp., 2022). W przeprowadzonym badaniu zastosowano takie same parametry CA jak w badaniu Krzysztofika, Wilka, Gołasia, i wsp., (2020). Autorzy odnotowali istotną poprawę generowanej mocy szczytowej i prędkości sztangi podczas jej wyrzutu na suwnicy Smith'a w 6 min po 2 seriach 2 powtórzeń opuszczania sztangi leżąc z obciążeniem zewnętrznym wynoszącym 110% 1RM. Wydaje się, że przyczyn odmiennych wyników można się doszukiwać w różnicach między ćwiczeniami górnej i dolnej części ciała. Wprawdzie ćwiczenia dolnej części ciała pozwalają na zastosowanie wyższego absolutnego obciążenia zewnętrznego oraz stawiają większe wymagania fizjologiczne przed ćwiczącym (Andrade i wsp., 2022), to jednak dolne części ciała stanowią istotnie większy obszar mięśniowy w porównaniu do górnej części ciała (Janssen i wsp., 2000). W związku z tym, prawdopodobne jest, że wywołanie znaczącego

efektu PAPE w treningu kończyn dolnych może wymagać wykonania CA o wyższej objętości lub intensywności w porównaniu do kończyn górnych. Może to potwierdzać uzyskany wzrost wysokości CMJ po zastosowaniu ECC-CON, ale nie po ECC.

Przeprowadzony eksperyment jest drugim, który oceniał efektywność wykorzystania WR w protokołach PAPE (Tseng i wsp., 2021). Badania Tsenga i wsp., (2021) w przeciwieństwie do niniejszej pracy nie wykazały istotnego wpływu zastosowania przysiadów ze sztangą (3 serii po 4 powtórzenia z 3 min przerwą wypoczynkową między seriami) z obciążeniem wynoszącym 105% koncentrycznego 1RM w fazie ekscentrycznej i 80% 1RM podczas fazy koncentrycznej (25% umieszczone na WR) na wykonywany 10 min później CMJ. Należy jednak zauważyć, że procedury badawcze różniły się w znaczący sposób. Przede wszystkim, w tym badaniu zastosowano 3-krotnie niższą objętość CA tj. 2 serie po 2 powtórzenia z 3 min przerwą wypoczynkową między seriami. Ponadto, wartość i dystrybucja obciążenia zewnętrznego na sztandze i WR była znacząco odmienna. W niniejszym badaniu faza ekscentryczna przysiadu ze sztangą była wykonywana z 110% 1RM, podczas gdy faza koncentryczna z 55% 1RM. Może to sugerować, że skuteczność stosowania supramaksymalnych wartości obciążenia zewnętrznego w protokołach PAPE kończyn dolnych jest w większym stopniu uzależniona od intensywności niż objętości i w przypadku kończyn dolnych konieczne jest stosowanie wyższych wartości obciążenia zewnętrznego w porównaniu do kończyn górnych. Należy również zauważyć, że w badaniu Tsenga i wsp., (2021) efekt PAPE oceniano wyłącznie w jednym punkcie czasowym po zastosowanym CA, podczas gdy w przeprowadzonym eksperymencie pomiary były dokonywane w 3, 6, 9 i 12 min po wykonanym CA. Dokonując analizy całej grupy w poszczególnych punktach czasowych badanie to również nie wykazało istotnego wpływu zastosowanego CA na CMJ. Jednakże, gdy ocenę poddano optymalny czas przerwy wypoczynkowej uwidoczniał się istotny wpływ ECC-CON na wysokość CMJ. Wskazuje to na zgłoszoną we wcześniejszych badaniach (Chiu i wsp., 2003; Gołaś i wsp., 2016; Krzysztofik, Wilk, i wsp., 2021) potrzebę wysokiej indywidualizacji stosowanych protokołów PAPE, a zwłaszcza czasu przerwy wypoczynkowej po zastosowanym CA. W dodatku, w przeprowadzonym badaniu uśredniony optymalny czas przerwy wypoczynkowej wyniósł 5.8 min, przez co nie można wykluczyć, że CA zastosowane w badaniu Tsenga i wsp., (2021) mogłoby przyczynić się do odnotowania efektu PAPE, gdyby pomiar sprawności fizycznej został przeprowadzony również w innych punktach czasowych, a nie wyłącznie 10 min po CA. Kolejną różnicą, o której należy wspomnieć jest odmienny poziom siły mięśniowej uczestników tego badania i Tsenga i wsp., (2021). Średni, względny poziom siły mięśniowej w przysiadzie ze sztangą w grupie badanych eksperymentu Tsenga

i wsp., (2021) wynosił 1.90 kg/kg masy ciała, podczas gdy w tym badaniu uczestnicy prezentowali 2.10 kg/kg masy ciała. Literatura tematu jednoznacznie wskazuje, że poziom siły mięśniowej ćwiczącego ma kluczowe znaczenie na wystąpienie i stopień efektu PAPE (Chiu i wsp., 2003; Seitz i Haff, 2016), dlatego wydaje się, że wyższy poziom siły mięśniowej prezentowany przez uczestników tego badania miał wpływ na wystąpienie efektu PAPE po ECC-CON.

Jednym z nowatorskich odkryć tej dysertacji jest fakt, że wraz z istotnym wzrostem wysokości CMJ po ECC-CON odnotowano istotny wzrost temperatury powierzchniowej skóry okolic głowy bocznej mięśnia czworogłowego uda. Powszechnie wiadomo, że wzrost temperatury mięśni wiąże się ze zwiększeniem sprawności fizycznej, a nawet niewielki wzrost rzędu 0,3–0,9 °C może przyczynić się do poprawy właściwości nerwowo-mięśniowych (Blazevich i Babault, 2019). Ponadto, najnowsze doniesienia wskazują na wzrost temperatury grup mięśni zaangażowanych podczas CA jako jeden z głównych mechanizmów leżących u podstaw efektu PAPE (Blazevich i Babault, 2019), jednak istnieje niewiele badań bezpośrednio poświęconych temu zjawisku i wykorzystujących kontrolę temperatury (Kalinowski i wsp., 2022; Krzysztofik i wsp., 2023). Jednym z niewielu eksperymentów jest badanie Kalinowskiego i wsp., (2022), które oceniało efektywność CA w formie pary ćwiczeń bilateralnych (przysiad ze sztangą i skok po zeskoku w głąb), CA w formie pary ćwiczeń unilateralnych (przysiad ze sztangą w pozycji wykroczno-zakrocznej i skok po zeskoku w głąb jednonóż) na wykonanie CMJ oraz biegu ze zmianami kierunku – modified t-agility test. Dodatkowo, analizowano zmiany temperatury powierzchniowej skóry w okolicach mięśnia czworogłowego uda u grupy siatkarzy. Autorzy wykazali istotny wzrost temperatury powierzchni skóry w okolicach mięśnia czworogłowego uda 6 minut po obu kompleksach aktywacyjnych, jednak istotna poprawa wysokości CMJ odnotowana została jedynie po kompleksie bilateralnym. Natomiast w badaniu Krzysztofika i wsp., (2023) oceniano natychmiastowy wpływ trzech różnych CA na zmiany wysokości CMJ i temperatury powierzchniowej skóry w okolicach mięśnia czworogłowego uda u siatkarzy. Procedura zakładała porównanie wpływu jednej serii przysiadów z obciążeniem 60% 1RM wykonanych do momentu spadku średniej prędkości sztangi o 10%, dwóch takich serii oraz trzech serii po 3 powtórzenia przysiadów z obciążeniem 85% 1RM jako CA. Wszystkie badane CA przyczyniły się do poprawy wysokości CMJ w drugiej minucie po ich wykonaniu oraz po indywidualnym czasie przerwy wypoczynkowej. Jednakże, wpływ poszczególnych CA różnił się między sobą. Dwie serie przysiadów wykonanych do momentu spadku prędkości sztangi o 10% oraz 3 serie po 3 powtórzenia z obciążeniem 85% 1RM przyczyniły się do istotnego

wzrostu temperatury powierzchniowej skóry w okolicach mięśnia czworogłowego uda, natomiast pojedyncza seria (średnio 7 powtórzeń) przyczyniła się do istotnego spadku temperatury. W rezultacie niniejszej dysertacji wykazano istotny wzrost wysokości CMJ wyłącznie po ECC-CON, któremu towarzyszył jednocześnie znaczący wzrost temperatury powierzchniowej skóry w okolicach głowy bocznej mięśnia czworogłowego uda. Co prawda, zastosowana objętość CA była bardzo niska (w sumie 4 powtórzenia), stąd biorąc pod uwagę wyniki dotychczasowych badań oceniających wpływ wysiłku oporowego na zmiany temperatury powierzchniowej skóry (Krzysztofik i wsp., 2023; Weigert i wsp., 2018), odnotowany wzrost wydaje się zaskakujący. W badaniu Krzysztofik i wsp., (2023) odnotowano spadek temperatury powierzchniowej skóry okolic mięśnia czworogłowego uda i wzrost wysokości CMJ po jednej serii przysiadów z obciążeniem 60% 1RM do spadku prędkości sztangy o 10%. Uczestnicy wspomnianego badania wykonywali średnio 7 ± 2 powtórzenia. Faktem różniącym procedury wspomnianych badań jest ilość wykonanych podczas CA serii (1 vs. 2). Badania poświęcone zmianom temperatury powierzchniowej skóry wykazały jej spadek w początkowej fazie wysiłku. Na przykład Weigert i wsp., (2018) odnotowali spadek temperatury powierzchniowej skóry okolic mięśnia dwugłowego ramienia po pierwszej serii 10 powtórzeń uginania stawu łokciowego z obciążeniem wynoszącym 70% 1RM, jednak po drugiej temperatura istotnie wzrosła powyżej wartości wyjściowej. Literatura tematu wskazuje, że zjawisko to może wynikać z reaktywnego zwężenia naczyń krwionośnych natychmiast po krótkim okresie intensywnej aktywności. Uwzględniając sprzeczne wyniki niniejszej dysertacji i poprzednich badań, wydaje się, że wzrostowi temperatury powierzchniowej skóry w okolicach mięśni zaangażowanych podczas CA może faktycznie towarzyszyć wzrost sprawności fizycznej. Niemniej jednak, może to nie być główny mechanizm stojący za efektem PAPE, dlatego konieczne są dalsze badania, które porównają różne protokoły aktywacyjne przy jednoczesnej kontroli zmian temperatury mięśni.

Kolejnym aspektem, który w badaniach dotyczących efektu PAPE nie był szeroko analizowany jest wpływ zastosowanego CA na właściwości biomechaniczne tkanek (Biel i wsp., 2023; Krzysztofik i wsp., 2023; Kalinowski i wsp., 2022; Pożarowszczyk i wsp., 2018). W badaniach Kalinowskiego i wsp., (2022) oraz Pożarowszczyk i wsp., (2018) autorzy skupili się na ocenie zmian sztywności ścięgna Achillesa, natomiast Biel i wsp., (2023) oraz Krzysztofik i wsp., (2023) analizowali zmiany właściwości biomechanicznych głowy bocznej mięśnia czworogłowego uda po zastosowanym CA. Niewielka liczba badań wydaje się zaskakująca z uwagi na fakt, że za potencjalny mechanizm efektu PAPE uznaje się zmiany dotyczące tkanki mięśniowej jak chociażby objętości płynów wewnątrzkomórkowych mięśni

(Blazevich i Babault, 2019). Zmiany ciśnienia wewnątrzmięśniowego wynikające z modyfikacji płynów wewnątrzmięśniowych mogą wpływać na właściwości mechaniczne mięśni, co można ilościowo określić za pomocą miotonometrii (Korhonen i in., 2005). Sztywność i częstotliwość oscylacji tkanki wskazują na poziom jej napięcia, przy czym wyższy poziom sugeruje większe napięcie (Alaca i Kablan, 2021). Ciśnienie wewnątrzmięśniowe może istotnie wpływać na funkcję mięśni bezpośrednio oddziałując na architekturę włókien mięśniowych i, w efekcie na poziom generowanej siły (Sejersted i Hargens, 1995). W związku z tym, zdaniem Konrada i Paternostera, (2022) ocena tej zmiennej może przyczynić się do przewidywania zmian w efektywności mięśni w generowaniu siły (Wang i wsp., 2017; Klich i in., 2020). Na przykład Klich i wsp., (2020) odnotowali natychmiastowy wzrost sztywności głowy bocznej mięśnia czworogłowego uda po jeździe na rowerze na dystansie 200 m i 4000 m. Dodatkowo, Trybulski i wsp., (2022) zaobserwowali tendencję do zwiększania sztywności mięśni głowy długiej mięśnia trójgłowego ramienia przy jednoczesnym spadku prędkości sztangi podczas jej wyciskania leżąc na ławce. Zaobserwowany spadek sprawności fizycznej może być związany z wyższym ciśnieniem wewnątrzmięśniowym, które może ograniczać usuwanie produktów ubocznych metabolizmu. Z kolei Krzysztofik i wsp., (2023) wykazali spadek sztywności głowy bocznej mięśnia czworogłowego uda i wzrost wysokości CMJ po serii przysiadów z obciążeniem 60% 1RM i do momentu spadku średniej prędkości sztangi o 10%. W eksperymencie przeprowadzonym na potrzeby niniejszej dysertacji nie zaobserwowano istotnych zmian w sztywności, elastyczności czy częstotliwości oscylacji głowy bocznej mięśnia czworogłowego uda, mimo odnotowanej istotnej poprawy wysokości CMJ po zastosowaniu protokołu ECC-CON. Biorąc pod uwagę doniesienia poprzednich badań, wskazujące, że wzrost sztywności i częstotliwości oscylacji mięśni może towarzyszyć spadkowi sprawności fizycznej, można sądzić, że protokół ECC-CON indukował pobudzenie, ale niewielki poziom zmęczenia, co skutkowało wzrostem wysokości CMJ. Z drugiej strony, również pozostałe protokoły, tj. ECC i CTRL nie miały istotnego wpływu na poziom badanych parametrów właściwości biomechanicznych oraz zmiennych CMJ. Ponadto, nie wykazano również istotnych powiązań ze szczytową odpowiedzią PAPE, a właściwościami biomechanicznymi głowy bocznej mięśnia czworogłowego uda. Wraz z niejednoznacznymi wynikami poprzednich eksperymentów, rezultaty te sugerują potrzebę dalszych badań nad wykorzystaniem miotonometrii w protokołach PAPE.

W przeciwieństwie do doniesień literatury na temat efektu PAPE (Seitz i wsp., 2016; Chiu i wsp., 2003), to badanie nie wykazało istotnych pozytywnych zależności między poziomem siły i mocy mięśniowej, a wielkością odpowiedzi PAPE. Niemniej jednak wnioski

te opierają się na wynikach prac, w których zastosowano protokoły o submaksymalnej intensywności. Według najlepszej wiedzy autora, to pierwsze badanie, które zastosowało supramaksymalne wartości obciążenia zewnętrznego i przeprowadziło weryfikację zależności między wielkością efektu PAPE, a wskaźnikami siły i mocy mięśniowej. Hipotetycznie, może to wskazywać, że za efektem PAPE wywołanym CA o supramaksymalnej intensywności mogą kryć się odmienne mechanizmy takie jak inhibicja receptorów Golgiego (Hilfiker i wsp., 2007). Z drugiej strony, w niniejszym badaniu nie porównano wpływu wykonania supramaksymalnie obciążonego CA z CA o parametrach aktualnie rekomendowanych dla osób o wysokim poziomie siły mięśniowej, tj. ~90% 1RM dla 2-3 powtórzeń (Seitz i wsp., 2014). Nie ma pewności, czy istotne korelacje między wielkością efektu PAPE, a wskaźnikami siły i mocy mięśniowej zostałyby odnotowane w takich warunkach. Warto zaznaczyć, że zaobserwowano nieistotną negatywną, umiarkowaną korelację między poziomem sztywności, a wielkością efektu PAPE. Ten wynik wydaje się być zgodny z literaturą i doniesieniami o jednoczesnym wzroście sprawności fizycznej oraz spadku sztywności mięśniowej (Krzysztofik i wsp., 2023). Z kolei, nieistotny duży pozytywny związek między elastycznością mięśni, a efektem PAPE może sugerować efektywniejsze tłumienie oscylacji na skutek działania siły zewnętrznej. Wyższa elastyczność mięśni może wskazywać na zdolność mięśnia do szybszego powrotu do swojego pierwotnego kształtu, a w rezultacie efektywniejsze generowanie energii mechanicznej (Roberts, 2016). Niemniej jednak, odnotowane powiązania nie osiągnęły poziomu istotności statystycznej, stąd konieczne jest przeprowadzenie kolejnych badań uwzględniających grupy badanych o różnym poziomie siły mięśniowej oraz protokoły o obciążeniu submaksymalnym oraz supramaksymalnym.

Aspektem godnym uwagi jest to, że w analizowanej grupie nie zaobserwowano istotnych różnic w liczbie uczestników reagujących, niereagujących oraz reagujących negatywnie na zastosowane CA. Niemniej jednak, w przypadku protokołu ECC-CON jedynie 6 uczestników (43% badanej grupy) można było uznać za reagujących, a 7 (50% badanej grupy) za niereagujących na zastosowany protokół. Otrzymane wyniki stanowią kolejne potwierdzenie, że w przypadku osób wysoko wytrenowanych stworzenie jednoznacznych wytycznych do indukowania efektu PAPE jest trudnym zadaniem i konieczne jest indywidualne podejście oraz ocena reakcji na różne protokoły PAPE, dostosowując zmienne treningowe do możliwości ćwiczącego. Pomimo starannej selekcji uczestników pod kątem dyscypliny sportowej, siły mięśniowej i doświadczenia treningowego, prawdopodobnie istnieją inne czynniki, które mogą znacząco wpływać na analizowane efekty CA. Nie można wykluczyć wpływu zróżnicowania w dystrybucji włókien mięśniowych, a także czynników

motywacyjnych i percepcyjnych, co zostało podkreślone w badaniach Blazevicha i Babaulta (2019). Mimo, że uczestnicy badania byli doświadczeni w treningach o supramaksymalnej intensywności to również czynniki psychologiczne mogły mieć wpływ na ich wyniki podczas wykonywania wolicjonalnych czynności ruchowych takich jak skoki pionowe. Często przedstawianym w literaturze wyjaśnieniem braku znaczącego efektu PAPE lub potencjalnie negatywnego wpływu CA wydaje się być niewłaściwa równowaga między wywołanym pobudzeniem, a poziomem zmęczenia. Niemniej jednak, przeprowadzone pomiary właściwości biomechanicznych mięśnia czworogłowego uda nie wykazały wzrostu ciśnienia wewnątrzmięśniowego, co mogłoby wskazywać na wywołane zmęczenie lokalne. Wydaje się, że jednym z potencjalnych rozwiązań, które mogłoby pomóc wyeliminować wpływ czynników psychologicznych i wolicjonalnych jest stymulacja skurczu mięśniowego impulsem elektrycznym i ocena właściwości kurczliwych mięśni za pomocą tensiomiografii przed i po zastosowaniu CA.

Pomimo, że niniejsze badanie dostarczyło istotnych wniosków na temat zastosowania obciążeń supramaksymalnych podczas CA oraz cenne spojrzenie na kontrolę zmian właściwości biomechanicznych, a także temperatury powierzchniowej skóry okolic mięśni zaangażowanych podczas CA, istnieją pewne ograniczenia, które powinny zostać wzięte pod uwagę podczas interpretacji wyników. Przede wszystkim należy podkreślić, że w badaniu wzięli udział wyłącznie mężczyźni o wysokim poziomie siły mięśniowej i zastosowano wyłącznie protokoły akcentujące fazę ekscentryczną, a także supramaksymalne wartości obciążenia zewnętrznego, stąd nie wiadomo jaka jest ich efektywność w porównaniu do protokołów submaksymalnych. Biorąc pod uwagę dużą zmienność międzyosobniczą w odpowiedziach PAPE (Boullosa i wsp., 2020), a także możliwe różnice w wielkości efektu PAPE pomiędzy różnymi CA (Seitz i Haff, 2016), należy zachować ostrożność podczas stosowania tych protokołów w innych populacjach. Ponadto, pomimo że badane protokoły CA różniły się dystrybucją obciążenia na sztandze zastosowano jednakową wartość obciążenia w fazie ekscentrycznej (110%1RM). Dlatego też, kolejne badania powinny ocenić zastosowanie odmiennych intensywności oraz objętości. Dodatkowo, warto zauważyć, że nie dokonano obserwacji procesu regeneracji po wykonanych sesjach eksperymentalnych, chociaż występowanie takich konsekwencji jak opóźniona bolesność mięśniowa czy wzrost markerów uszkodzeń mięśniowych i zmniejszenie zakresu ruchu są znane po wykonaniu ćwiczeń akcentujących fazę ekscentryczną i zastosowaniu obciążeń supramaksymalnych. Należy również zaznaczyć, że badanie oceniało jedynie natychmiastowe reakcje, które nie muszą odzwierciedlać długoterminowych adaptacji.

Wyniki przeprowadzonego badania wskazują, że 2 serie po 2 powtórzenia przysiadów ze sztangą i obciążeniem zewnętrznym o wartości 110% 1RM (rozdysponowane w 55% na sztandze i w 55% na WR) w fazie ekscentrycznej i 55% 1RM w fazie koncentrycznej może być skutecznie wykorzystywane w protokołach PAPE do natychmiastowej i istotnej poprawy wysokości CMJ w grupie wytrenowanych siłowo mężczyzn o wysokim poziomie siły mięśniowej kończyn dolnych. Ponieważ protokół ECC-CON uwzględniał zastosowanie supramaksymalnej intensywności oraz niskiej objętości, hipotetycznie może on być stosowany w fazie intensyfikacji podczas programowania treningu kompleksowego. Dodatkowo, biorąc pod uwagę dużą zmienność w odnotowanym efekcie PAPE, wyniki badania sugerują, że kluczowa jest indywidualna ocena skuteczności takiego protokołu wraz z oceną optymalnego odstępu odpoczynku po CA w celu ustalenia, czy ćwiczący reagują pozytywnie i mogą uzyskać znaczący efekt PAPE. Ponadto, rezultaty tego badania mogą świadczyć, że wzrost temperatury powierzchniowej skóry może być tożsamy z wystąpieniem efektu PAPE, jednak wydaje się, że nie ma to miejsca w przypadku właściwości biomechanicznych mięśni.

9. WNIOSKI

Na podstawie eksperymentu przeprowadzonego na potrzeby niniejszej dysertacji, a także w oparciu o aktualny stan literatury tematu sformułowano następujące wnioski:

1. Zastosowanie 2 serii po 2 powtórzenia przysiadów ze sztangą i obciążeniem zewnętrznym o wartości 110% 1RM w fazie ekscentrycznej i 55% 1RM w fazie koncentrycznej (rozdysponowane w 55% na sztandze i w 55% na WR) powoduje istotny, natychmiastowy wzrost wysokości CMJ w grupie wytrenowanych siłowo mężczyzn po optymalnej przerwie wypoczynkowej.
2. Zastosowanie wyłącznie fazy ekscentrycznej i obciążenia zewnętrznego o wartości 110% 1RM podczas 2 serii po 2 powtórzenia przysiadów ze sztangą nie miało istotnego wpływu na CMJ wykonany w ciągu 12 min po ich zakończeniu w grupie wytrenowanych siłowo mężczyzn.
3. Zastosowane CA nie miały istotnego wpływu na biomechaniczne właściwości głowy bocznej mięśnia czworogłowego uda.

Streszczenie

Wstęp: Wykorzystanie specyficznych właściwości fazy ekscentrycznej podczas protokołów aktywacyjnych może przyczynić się do intensyfikacji zjawiska po-aktywacyjnego wzrostu sprawności fizycznej (PAPE) wśród wytrenowanych siłowo mężczyzn. Mimo narastającej popularności zjawiska PAPE dotychczas nie dokonano oceny efektywności przysiadów ze sztangą z zastosowaniem supramaksymalnego obciążenia na efekt PAPE kończyn dolnych.

Cel badań: Celem pracy było ustalenie natychmiastowego wpływu wykonania wyłącznie fazy ekscentrycznej lub ekscentryczno-koncentrycznej przysiadu ze sztangą z zastosowaniem supramaksymalnego obciążenia zewnętrznego na wysokość i moc względną w skoku pionowym bez zamachu ramion (CMJ), zmiany temperatury powierzchniowej skóry okolic głowy bocznej mięśnia czworogłowego uda oraz jego właściwości biomechaniczne.

Metody: W badaniu uczestniczyło 14 zdrowych mężczyzn uprawiających trójbój siłowy (wiek: 22.5 ± 2.3 lat, masa ciała: 84.2 ± 11.1 kg, wysokość ciała: 177.5 ± 6.5 cm, staż treningu oporowego: 5.4 ± 1.6 lat, poziom siły mięśniowej w przysiadzie ze sztangą: 177 ± 22.8 kg). Eksperyment składał się z sesji zapoznawczej i trzech sesji eksperymentalnych. W trakcie sesji zapoznawczej wyznaczono wartość jednego powtórzenia maksymalnego (1RM) w przysiadzie ze sztangą, a następnie zostali oni zaznajomieni z procedurą sesji eksperymentalnych. Sesje eksperymentalne wykonywano w losowej kolejności z tygodniowym odstępem, podczas których każdy uczestnik wykonał następujące protokoły aktywacyjne: ECC-CON - 2 serie po 2 powtórzenia przysiadów ze sztangą z obciążeniem wynoszącym 110% 1RM rozdysponowanym w 55% na sztandze, 55% na przyborach zwalniających obciążenie zewnętrzne; ECC - 2 serie po 2 powtórzenia wyłącznie fazy ekscentrycznej przysiadów ze sztangą z obciążeniem wynoszącym 110% 1RM; CTRL - bez wykonania ćwiczenia aktywacyjnego. W celu oceny natychmiastowego wpływu zastosowanych protokołów aktywacyjnych na CMJ, biomechaniczne właściwości głowy bocznej mięśnia czworogłowego uda oraz temperaturę powierzchniową skóry okolic tego mięśnia wykonano pojedyncze serie 2 powtórzeń CMJ 5 minut przed i w 3, 6, 9 oraz 12 minucie po wykonanym protokole aktywacyjnym.

Wyniki: Analiza wyników wykazała, że zastosowanie protokołu ECC-CON skutkowało: istotnym wzrostem wysokości CMJ w optymalnym czasie przerwy

wypoczynkowej w porównaniu do wartości wyjściowej (38.1 ± 5.2 vs. 39.8 ± 5.0 cm; $p=0.003$; $ES=0.32$; $\Delta=4.9 \pm 5.0\%$), istotnym wzrostem temperatury powierzchniowej okolic mięśnia czworogłowego uda w 3 min (32.98 ± 1.24 vs 33.64 ± 1.01 °C; $p=0.001$; $ES=0.57$; $\Delta=2.1 \pm 1.5\%$), jak również w optymalnym czasie przerwy wypoczynkowej po CA w porównaniu do wartości wyjściowej (32.98 ± 1.24 vs 33.69 ± 0.96 °C; $p=0.006$; $ES=0.62$; $\Delta=2.2 \pm 2.6\%$). Analiza wyników nie wykazała istotnych zmian biomechanicznych właściwości głowy bocznej mięśnia czworogłowego uda. W przypadku zastosowania protokołu ECC oraz CTRL nie zaobserwowano żadnych istotnych zmian w analizowanych zmiennych w stosunku do wartości wyjściowej.

Wnioski: Rezultaty przeprowadzonego badania sugerują, że zastosowanie protokołu ECC-CON - 2 serii po 2 powtórzenia przysiadów ze sztangą i obciążeniem zewnętrznym o wartości 110% 1RM w fazie ekscentrycznej i 55% 1RM w fazie koncentrycznej (rozdysponowane w 55% na sztandze i w 55% na WR) pozwoliło na odniesienie istotnego, natychmiastowego wzrostu wysokości CMJ w grupie wytrenowanych siłowo mężczyzn. Zastosowanie protokołu ECC (wyłącznie fazy ekscentrycznej przysiadów ze sztangą) nie miało istotnego wpływu na wysokość CMJ w przebadanej grupie. Ponadto wykonane protokoły aktywacyjne nie miały wpływu na biomechaniczne właściwości głowy bocznej mięśnia czworogłowego uda. Natomiast wraz ze wzrostem wysokości CMJ wzrosła temperatura powierzchniowa okolic głowy bocznej mięśnia czworogłowego, co może tłumaczyć istotny wzrost wysokości CMJ po zastosowaniu protokołu ECC-CON.

Implikacje praktyczne: Wykorzystany w niniejszym badaniu protokół ECC-CON może być skutecznie stosowany w treningu kompleksowym kończyn dolnych wśród wytrenowanych siłowo mężczyzn. Z kolei, wykonanie wyłącznie supramaksymalnie obciążonej fazy ekscentrycznej przysiadów ze sztangą może być nie wystarczające do wywołania istotnego efektu PAPE kończyn dolnych. Dodatkowo analiza wyników podkreśla wysokie znaczenie indywidualizacji czasu przerwy wypoczynkowej w celu osiągnięcia istotnej poprawy sprawności fizycznej.

Słowa kluczowe: po-aktywacyjny wzrost sprawności fizycznej, przysiad ze sztangą, AEL, przeciążenie fazy ekscentrycznej, CMJ

Summary

Introduction: The specific properties of the eccentric phase during activation protocols may contribute to the intensification of the post-activation performance enhancement effect (PAPE) among strength-trained males. Despite increasing popularity of the PAPE phenomenon, the effect of supramaximal loaded back squats on the PAPE effect has not been investigated so far.

Aim of the study: Aim of the research was to determine the acute effect of performing the eccentric-only or eccentric-concentric phase of the back squat using a supramaximal external load on the height and relative peak power in a vertical jump without arm swing (CMJ), change in skin surface temperature of the lateral head area of the quadriceps femoris and its biomechanical properties.

Methods: The study involved 14 healthy males practicing powerlifting (age: 22.5 ± 2.3 years old, body mass: 84.2 ± 11.1 kg, body height: 177.5 ± 6.5 cm, resistance training experience: 5.4 ± 1.6 years old, muscle strength level in the back squat: 177 ± 22.8 kg). The experiment was composed of a familiarization session and three experimental sessions. During the familiarization session, the one-repetition maximum (1RM) in the back squat was determined, and then participants were familiarized with the procedure of the experimental sessions. Experimental sessions were performed in random order with a one-week interval, during which each participant performed the following activation protocols: ECC-CON - 2 sets of 2 repetitions of back squats with 110% 1RM distributed 55% on the barbell and 55% on the weight releasers (WR); ECC - 2 sets of 2 repetitions of eccentric-only back squats with 110% 1RM; CTRL - without performing an activation exercise. In order to assess the acute effect of applied activation protocols on CMJ, biomechanical properties of the lateral head of the quadriceps femoris and skin surface temperature of this muscle area single sets of 2 CMJ repetitions were performed 5 minutes before and at 3rd, 6th, 9th and 12th minute after performed activation protocol.

Results: Analysis showed that the ECC-CON protocol resulted in: a significant increase in CMJ height in the optimal rest time interval compared to the baseline value (38.1 ± 5.2 vs. 39.8 ± 5.0 cm; $p=0.003$; $ES=0.32$; $\Delta=4.9 \pm 5.0\%$), a significant increase in the skin surface temperature of the lateral head area of the quadriceps femoris at 3rd minute (32.98 ± 1.24 vs $33.64 \pm 1.01^\circ\text{C}$; $p=0.001$; $ES=0.57$; $\Delta=2.1 \pm 1.5\%$), and also in the optimal rest time interval after

activation protocol compared to the baseline value (32.98 ± 1.24 vs. $33.69 \pm 0.96^{\circ}\text{C}$; $p=0.006$; $\text{ES}=0.62$; $\Delta=2.2 \pm 2.6\%$). Analysis of results did not show any significant changes in biomechanical properties of the lateral head of the quadriceps femoris. In the case of the ECC and CTRL protocol, no significant changes in analyzed variables in comparison to baseline values were observed.

Conclusions: The results of this study suggest that the application of ECC-CON protocol - 2 sets of 2 repetitions of back squats with an external load of 110% 1RM in the eccentric phase and 55% 1RM in the concentric phase (distributed 55% on the barbell and 55% on WR) elicit a significant, acute increase in CMJ height among strength-trained males. On the other hand, the ECC protocol (only the eccentric phase of back squats) did not have a significant impact on CMJ height in the studied group. Moreover, applied activation protocols did not have an effect on the biomechanical properties of the lateral head of the quadriceps femoris. However, along with the increase in CMJ height temperature of the lateral head area of the quadriceps femoris increased, which may explain a significant increase in CMJ height after the application of the ECC-CON protocol.

Practical implications: The ECC-CON protocol used in this study can be effectively used in the complex training of lower limbs among strength-trained males. On the other hand, performing only the supramaximally loaded eccentric phase of back squats may not be sufficient to induce a significant PAPE effect in the lower limbs. In addition, the analysis of the results emphasizes the high importance of individualizing the rest interval time in order to achieve significant athletic performance improvements.

Bibliografia

1. Akimov, E. B., Andreev, R. S., Kalenov, I. N., Kirdin, A. A., Son'kin, V. D., & Tonevitskiĭ, A. G. (2010). [Human temperature portrait and its relations with aerobic working capacity and the level of blood lactate]. *Fiziologiya Cheloveka*, 36(4), 89–101.
2. Alaca, N., & Kablan, N. (2021). Acute Effects of Cold Pack for Different Periods on the Biomechanical Properties of the Rectus Femoris Muscle. *Alternative Therapies in Health and Medicine*, 27(5), 92–99.
3. Allen, D. G., Lamb, G. D., & Westerblad, H. (2008). Skeletal muscle fatigue: Cellular mechanisms. *Physiological Reviews*, 88(1), 287–332. <https://doi.org/10.1152/physrev.00015.2007>
4. Ammer, K. (2008). *The Glamorgan Protocol for recording and evaluation of thermal images of the human body*. Institute for Physical Medicine and Rehabilitation, Hanuschkrankenhaus.
5. Andonian, P., Viallon, M., Le Goff, C., de Bourguignon, C., Tourel, C., Morel, J., Giardini, G., Gergel  , L., Millet, G. P., & Croisille, P. (2016). Shear-Wave Elastography Assessments of Quadriceps Stiffness Changes prior to, during and after Prolonged Exercise: A Longitudinal Study during an Extreme Mountain Ultra-Marathon. *PloS One*, 11(8), e0161855. <https://doi.org/10.1371/journal.pone.0161855>
6. Andrade, J., Esteves, D., Ferraz, R., Marques, D. L., Branquinho, L., Marinho, D. A., Marques, M. C., & Neiva, H. P. (2022). Acute Effects of Heavy Strength Training on Mechanical, Hemodynamic, Metabolic, and Psychophysiological Parameters in Young Adult Males. *Sports (Basel, Switzerland)*, 10(12), 195. <https://doi.org/10.3390/sports10120195>
7. Arfaoui, A., Polidori, G., Taiar, R., & Pop, C. (2012). Infrared Thermography in Sports Activity. W. R. V. Prakash (Red.), *Infrared Thermography*. InTech. <https://doi.org/10.5772/30268>
8. Beato, M., Bigby, A. E. J., De Keijzer, K. L., Nakamura, F. Y., Coratella, G., & McErlain-Naylor, S. A. (2019). Post-activation potentiation effect of eccentric overload and traditional weightlifting exercise on jumping and sprinting performance in male athletes. *PLOS ONE*, 14(9), e0222466. <https://doi.org/10.1371/journal.pone.0222466>
9. Beato, M., Stiff, A., & Coratella, G. (2019). Effects of Postactivation Potentiation After an Eccentric Overload Bout on Countermovement Jump and Lower-Limb Muscle

- Strength. *Journal of Strength and Conditioning Research, Publish Ahead of Print*.
<https://doi.org/10.1519/JSC.00000000000003005>
10. Bergh, U., & Ekblom, B. (1979). Influence of muscle temperature on maximal muscle strength and power output in human skeletal muscles. *Acta Physiologica Scandinavica*, 107(1), 33–37. <https://doi.org/10.1111/j.1748-1716.1979.tb06439.x>
 11. Biel, P., Zubik, M., Filip-Stachnik, A., Ewertowska, P., & Krzysztofik, M. (2023). Acute effects of unilateral and bilateral conditioning activity on countermovement jump, linear speed, and muscle stiffness: A randomized crossover study. *PloS One*, 18(10), e0292999. <https://doi.org/10.1371/journal.pone.0292999>
 12. Binkhorst, R. A., Hoofd, L., & Vissers, A. C. (1977). Temperature and force-velocity relationship of human muscles. *Journal of Applied Physiology: Respiratory, Environmental and Exercise Physiology*, 42(4), 471–475. <https://doi.org/10.1152/jappl.1977.42.4.471>
 13. Bizzini, M., & Mannion, A. F. (2003). Reliability of a new, hand-held device for assessing skeletal muscle stiffness. *Clinical Biomechanics*, 18(5), 459–461. [https://doi.org/10.1016/S0268-0033\(03\)00042-1](https://doi.org/10.1016/S0268-0033(03)00042-1)
 14. Blazeovich, A. J., & Babault, N. (2019). Post-activation Potentiation Versus Post-activation Performance Enhancement in Humans: Historical Perspective, Underlying Mechanisms, and Current Issues. *Frontiers in Physiology*, 10, 1359. <https://doi.org/10.3389/fphys.2019.01359>
 15. Bompa, T., & Haff, G. G. (1994). *Theory and methodology of training.: T. 3rd edition*. Kendall Hunt Publishing Company.
 16. Boullosa, D. (2021). Post-activation performance enhancement strategies in sport: A brief review for practitioners. *Human Movement*, 22(3), 101–109. <https://doi.org/10.5114/hm.2021.103280>
 17. Boullosa, D., Beato, M., Dello Iacono, A., Cuenca-Fernández, F., Doma, K., Schumann, M., Zagatto, A. M., Loturco, I., & Behm, D. G. (2020). A New Taxonomy for Postactivation Potentiation in Sport. *International Journal of Sports Physiology and Performance*, 15(8), 1197–1200. <https://doi.org/10.1123/ijsp.2020-0350>
 18. Brenner, B., & Eisenberg, E. (1986). Rate of force generation in muscle: Correlation with actomyosin ATPase activity in solution. *Proceedings of the National Academy of Sciences of the United States of America*, 83(10), 3542–3546. <https://doi.org/10.1073/pnas.83.10.3542>
 19. Buchheit, M. (2008). The 30-15 intermittent fitness test: Accuracy for individualizing

- interval training of young intermittent sport players. *Journal of Strength and Conditioning Research*, 22(2), 365–374. <https://doi.org/10.1519/JSC.0b013e3181635b2e>
20. Buskard, A. N. L., Gregg, H. R., & Ahn, S. (2018). Supramaximal Eccentrics Versus Traditional Loading in Improving Lower-Body 1RM: A Meta-Analysis. *Research Quarterly for Exercise and Sport*, 89(3), 340–346. <https://doi.org/10.1080/02701367.2018.1472365>
 21. Chiu, L. Z. F., Fry, A. C., Weiss, L. W., Schilling, B. K., Brown, L. E., & Smith, S. L. (2003). Postactivation potentiation response in athletic and recreationally trained individuals. *Journal of Strength and Conditioning Research*, 17(4), 671–677. [https://doi.org/10.1519/1533-4287\(2003\)017<0671:ppriaa>2.0.co;2](https://doi.org/10.1519/1533-4287(2003)017<0671:ppriaa>2.0.co;2)
 22. Cormier, P., Freitas, T. T., Loturco, I., Turner, A., Virgile, A., Haff, G. G., Blazeovich, A. J., Agar-Newman, D., Henneberry, M., Baker, D. G., McGuigan, M., Alcaraz, P. E., & Bishop, C. (2022). Within Session Exercise Sequencing During Programming for Complex Training: Historical Perspectives, Terminology, and Training Considerations. *Sports Medicine*, 52(10), 2371–2389. <https://doi.org/10.1007/s40279-022-01715-x>
 23. Cuenca-Fernández, F., Smith, I. C., Jordan, M. J., MacIntosh, B. R., López-Contreras, G., Arellano, R., & Herzog, W. (2017). Nonlocalized postactivation performance enhancement (PAPE) effects in trained athletes: A pilot study. *Applied Physiology, Nutrition, and Metabolism*, 42(10), 1122–1125. <https://doi.org/10.1139/apnm-2017-0217>
 24. Curtin, N. A., & Edman, K. A. (1989). Effects of fatigue and reduced intracellular pH on segment dynamics in ‘isometric’ relaxation of frog muscle fibres. *The Journal of Physiology*, 413(1), 159–174. <https://doi.org/10.1113/jphysiol.1989.sp017647>
 25. Dallas, G., Colson, S., Pappas, P., Dallas, C., & Paradisis, G. (2023). Whole body vibration and drop jumps induces post-activation performance enhancement. *Human Movement*. <https://doi.org/10.5114/hm.2023.117211>
 26. de Poli, R. A. B., Boullosa, D. A., Malta, E. S., Behm, D., Lopes, V. H. F., Barbieri, F. A., & Zagatto, A. M. (2020). Cycling Performance Enhancement After Drop Jumps May Be Attributed to Postactivation Potentiation and Increased Anaerobic Capacity. *Journal of Strength and Conditioning Research*, 34(9), 2465–2475. <https://doi.org/10.1519/JSC.0000000000003399>
 27. Dello Iacono, A., Martone, D., & Padulo, J. (2016). Acute Effects of Drop-Jump Protocols on Explosive Performances of Elite Handball Players. *Journal of Strength and*

- Conditioning Research*, 30(11), 3122–3133.
<https://doi.org/10.1519/JSC.0000000000001393>
28. Dobbs, W. C., Toluoso, D. V., Fedewa, M. V., & Esco, M. R. (2019). Effect of Postactivation Potentiation on Explosive Vertical Jump: A Systematic Review and Meta-Analysis. *Journal of Strength and Conditioning Research*, 33(7), 2009–2018. <https://doi.org/10.1519/JSC.0000000000002750>
 29. Eduardo Assis Pereira, P., Lopes Motoyama, Y., Jesus Esteves, G., Carlos Quinelato, W., Botter, L., Hiroyuki Tanaka, K., & Azevedo, P. (2016). Resistance training with slow speed of movement is better for hypertrophy and muscle strength gains than fast speed of movement. *International Journal of Applied Exercise Physiology*, 5(2), 37–43. <https://doi.org/10.30472/ijaep.v5i2.51>
 30. Elmer, S., Hahn, S., McAllister, P., Leong, C., & Martin, J. (2012). Improvements in multi-joint leg function following chronic eccentric exercise: Functional changes following exercise. *Scandinavian Journal of Medicine & Science in Sports*, 22(5), 653–661. <https://doi.org/10.1111/j.1600-0838.2011.01291.x>
 31. Elmubarak, M. H., & Ranatunga, K. W. (1984). Temperature sensitivity of tension development in a fast-twitch muscle of the rat. *Muscle & Nerve*, 7(4), 298–303. <https://doi.org/10.1002/mus.880070408>
 32. English, K. L., Loehr, J. A., Lee, S. M. C., & Smith, S. M. (2014). Early-phase musculoskeletal adaptations to different levels of eccentric resistance after 8 weeks of lower body training. *European Journal of Applied Physiology*, 114(11), 2263–2280. <https://doi.org/10.1007/s00421-014-2951-5>
 33. Fernandez-Gonzalo, R., Lundberg, T. R., Alvarez-Alvarez, L., & de Paz, J. A. (2014). Muscle damage responses and adaptations to eccentric-overload resistance exercise in men and women. *European Journal of Applied Physiology*, 114(5), 1075–1084. <https://doi.org/10.1007/s00421-014-2836-7>
 34. Finlay, M. J., Bridge, C. A., Greig, M., & Page, R. M. (2022). Upper-Body Post-activation Performance Enhancement for Athletic Performance: A Systematic Review with Meta-analysis and Recommendations for Future Research. *Sports Medicine*, 52(4), 847–871. <https://doi.org/10.1007/s40279-021-01598-4>
 35. Fitts, R. H. (2008). The cross-bridge cycle and skeletal muscle fatigue. *Journal of Applied Physiology (Bethesda, Md.: 1985)*, 104(2), 551–558. <https://doi.org/10.1152/jappphysiol.01200.2007>
 36. Formenti, D., Ludwig, N., Trecroci, A., Gargano, M., Michielon, G., Caumo, A., &

- Alberti, G. (2016). Dynamics of thermographic skin temperature response during squat exercise at two different speeds. *Journal of Thermal Biology*, 59, 58–63. <https://doi.org/10.1016/j.jtherbio.2016.04.013>
37. Fukunaga, T., Ichinose, Y., Ito, M., Kawakami, Y., & Fukashiro, S. (1997). Determination of fascicle length and pennation in a contracting human muscle in vivo. *Journal of Applied Physiology*, 82(1), 354–358. <https://doi.org/10.1152/jappl.1997.82.1.354>
 38. Gago, P., Arndt, A., Tarassova, O., & Ekblom, M. M. (2014). Post activation potentiation can be induced without impairing tendon stiffness. *European Journal of Applied Physiology*, 114(11), 2299–2308. <https://doi.org/10.1007/s00421-014-2945-3>
 39. Gołaś, A., Maszczyk, A., Pietraszewski, P., Stastny, P., Tufano, J. J., & Zajac, A. (2017). Effects of Pre-exhaustion on the Patterns of Muscular Activity in the Flat Bench Press. *Journal of Strength and Conditioning Research*, 31(7), 1919–1924. <https://doi.org/10.1519/JSC.0000000000001755>
 40. Gołaś, A., Maszczyk, A., Zajac, A., Mikołajec, K., & Stastny, P. (2016). Optimizing post activation potentiation for explosive activities in competitive sports. *Journal of Human Kinetics*, 52(1), 95–106. <https://doi.org/10.1515/hukin-2015-0197>
 41. González-Alonso, J., Quistorff, B., Krstrup, P., Bangsbo, J., & Saltin, B. (2000). Heat production in human skeletal muscle at the onset of intense dynamic exercise. *The Journal of Physiology*, 524(2), 603–615. <https://doi.org/10.1111/j.1469-7793.2000.00603.x>
 42. -Skok, O., Tous-Fajardo, J., Valero-Campo, C., Berzosa, C., Bataller, A. V., Arjol-Serrano, J. L., Moras, G., & Mendez-Villanueva, A. (2017). Eccentric-Overload Training in Team-Sport Functional Performance: Constant Bilateral Vertical Versus Variable Unilateral Multidirectional Movements. *International Journal of Sports Physiology and Performance*, 12(7), 951–958. <https://doi.org/10.1123/ijsp.2016-0251>
 43. Gouvêa, A. L., Fernandes, I. A., César, E. P., Silva, W. A. B., & Gomes, P. S. C. (2013). The effects of rest intervals on jumping performance: A meta-analysis on post-activation potentiation studies. *Journal of Sports Sciences*, 31(5), 459–467. <https://doi.org/10.1080/02640414.2012.738924>
 44. , J., Lazinec, B., Schoenfeld, B. J., & Pedisic, Z. (2020). Test-Retest Reliability of the One-Repetition Maximum (1RM) Strength Assessment: A Systematic Review. *Sports Medicine - Open*, 6(1), 31. <https://doi.org/10.1186/s40798-020-00260-z>
 45. Gross, M., Lüthy, F., Kroell, J., Müller, E., Hoppeler, H., & Vogt, M. (2010). Effects of

- eccentric cycle ergometry in alpine skiers. *International Journal of Sports Medicine*, 31(8), 572–576. <https://doi.org/10.1055/s-0030-1254082>
46. , A., & Schmidbleicher, D. (1996). MVC-induced short-term potentiation of explosive force. *IAAF*, 4(11), 67–81.
 47. Hamada, T., Sale, D. G., MacDougall, J. D., & Tarnopolsky, M. A. (2000). Postactivation potentiation, fiber type, and twitch contraction time in human knee extensor muscles. *Journal of Applied Physiology (Bethesda, Md.: 1985)*, 88(6), 2131–2137. <https://doi.org/10.1152/jappl.2000.88.6.2131>
 48. Hamada, T., Sale, D. G., MacDougall, J. D., & Tarnopolsky, M. A. (2003). Interaction of fibre type, potentiation and fatigue in human knee extensor muscles. *Acta Physiologica Scandinavica*, 178(2), 165–173. <https://doi.org/10.1046/j.1365-201X.2003.01121.x>
 49. Hardaker, N., Moss, AD., Richards, J., Jarvis, S., McEwan, I., & Selfe, J. (2007). The relationship between skin surface temperature measured via Non-contact Thermal Imaging and intra-muscular temperature of the Rectus Femoris muscle. *University of Central Lancashire, Preston, PR1 2HE, UK*.
 50. , L. V., & Olkin, I. (1985). *Statistical models for meta-analysis*. Academic Press.
 51. Hessel, A. L., Lindstedt, S. L., & Nishikawa, K. C. (2017). Physiological Mechanisms of Eccentric Contraction and Its Applications: A Role for the Giant Titin Protein. *Frontiers in Physiology*, 8. <https://doi.org/10.3389/fphys.2017.00070>
 52. Hilfiker, R., Hübner, K., Lorenz, T., & Marti, B. (2007). Effects of Drop Jumps Added to the Warm-Up of Elite Sport Athletes With a High Capacity for Explosive Force Development. *The Journal of Strength and Conditioning Research*, 21(2), 550. <https://doi.org/10.1519/R-20215.1>
 53. , M., Rosicka, K., & Wdowski, M. (2022). Effect of sex and fatigue on quiet standing and dynamic balance and lower extremity muscle stiffness. *European Journal of Applied Physiology*, 122(1), 233–244. <https://doi.org/10.1007/s00421-021-04831-0>
 54. Hollander, D. B., Kraemer, R. R., Kilpatrick, M. W., Ramadan, Z. G., Reeves, G. V., Francois, M., Hebert, E. P., & Tryniecki, J. L. (2007). Maximal eccentric and concentric strength discrepancies between young men and women for dynamic resistance exercise. *Journal of Strength and Conditioning Research*, 21(1), 34–40. <https://doi.org/10.1519/R-18725.1>
 55. Hortobágyi, T., Barrier, J., Beard, D., Braspeninx, J., Koens, P., Devita, P., Dempsey, L., & Lambert, J. (1996). Greater initial adaptations to submaximal muscle lengthening

- than maximal shortening. *Journal of Applied Physiology*, 81(4), 1677–1682. <https://doi.org/10.1152/jappl.1996.81.4.1677>
56. Hunter, S. K., & Brown, D. A. (2010). *Muscle: The primary stabilizer and mover of the skeletal system*. Kinesiology of the musculoskeletal system,.
 57. Jutte, L. S., Merrick, M. A., Ingersoll, C. D., & Edwards, J. E. (2001). The relationship between intramuscular temperature, skin temperature, and adipose thickness during cryotherapy and rewarming. *Archives of Physical Medicine and Rehabilitation*, 82(6), 845–850. <https://doi.org/10.1053/apmr.2001.23195>
 58. Kalinowski, R., Pisz, A., Kolinger, D., Wilk, M., Stastny, P., & Krzysztofik, M. (2022). Acute effects of combined isometric and plyometric conditioning activities on sports performance and tendon stiffness in female volleyball players. *Frontiers in Physiology*, 13, 1025839. <https://doi.org/10.3389/fphys.2022.1025839>
 59. Katz, B. (1939). The relation between force and speed in muscular contraction. *The Journal of Physiology*, 96(1), 45–64. <https://doi.org/10.1113/jphysiol.1939.sp003756>
 60. Klich, S., Ficek, K., Krymski, I., Klimek, A., Kawczyński, A., Madeleine, P., & Fernández-de-las-Peñas, C. (2020). Quadriceps and Patellar Tendon Thickness and Stiffness in Elite Track Cyclists: An Ultrasonographic and Myotonometric Evaluation. *Frontiers in Physiology*, 11, 607208. <https://doi.org/10.3389/fphys.2020.607208>
 61. Klich, S., Michalik, K., Rajca, J., Ficek, K., Fernández-de-las-Peñas, C., Kawczynski, A., & Madeleine, P. (2023). Fatigue-Induced Alterations of the Patellar Tendon in Elite Sprint Track Cyclists. *International Journal of Sports Medicine*, a-2018-2781. <https://doi.org/10.1055/a-2018-2781>
 62. Klich, S., Pietraszewski, B., Zago, M., Galli, M., Lovecchio, N., & Kawczyński, A. (2020). Ultrasonographic and Myotonometric Evaluation of the Shoulder Girdle After an Isokinetic Muscle Fatigue Protocol. *Journal of Sport Rehabilitation*, 29(8), 1047–1052. <https://doi.org/10.1123/jsr.2019-0117>
 63. Kobal, R., Pereira, L. A., Kitamura, K., Paulo, A. C., Ramos, H. A., Carmo, E. C., Roschel, H., Tricoli, V., Bishop, C., & Loturco, I. (2019). Post-activation potentiation: Is there an optimal training volume and intensity to induce improvements in vertical jump ability in highly-trained subjects. *Journal of Human Kinetics*, 69(1), 239–247. <https://doi.org/10.2478/hukin-2019-0016>
 64. Koch, A., O'Bryant, H. S., & Stone, M. E. (2003). *Effect of Warm-Up on the Standing Broad Jump in Trained and Untrained Men and Women*. 4(17).
 65. Konrad, A., & Paternoster, F. K. (2022). No Association between Jump Parameters and

- Tissue Stiffness in the Quadriceps and Triceps Surae Muscles in Recreationally Active Young Adult Males. *Applied Sciences*, 12(3), 1596. <https://doi.org/10.3390/app12031596>
66. Koo, T. K., & Li, M. Y. (2016). A Guideline of Selecting and Reporting Intraclass Correlation Coefficients for Reliability Research. *Journal of Chiropractic Medicine*, 15(2), 155–163. <https://doi.org/10.1016/j.jcm.2016.02.012>
 67. Korhonen, R. K., Vain, A., Vanninen, E., Viir, R., & Jurvelin, J. S. (2005). Can mechanical myotonometry or electromyography be used for the prediction of intramuscular pressure? *Physiological Measurement*, 26(6), 951–963. <https://doi.org/10.1088/0967-3334/26/6/006>
 68. Korman, P., Straburzyńska-Lupa, A., Romanowski, W., & Trafarski, A. (2012). Temperature changes in rheumatoid hand treated with nitrogen vapors and cold air. *Rheumatology International*, 32(10), 2987–2992. <https://doi.org/10.1007/s00296-011-2078-5>
 69. Krzysztofik, M., Matykiewicz, P., Celebanska, D., Jarosz, J., Gawel, E., & Zwierzchowska, A. (2021). The Acute Post-Activation Performance Enhancement of the Bench Press Throw in Disabled Sitting Volleyball Athletes. *International Journal of Environmental Research and Public Health*, 18(7), 3818. <https://doi.org/10.3390/ijerph18073818>
 70. Krzysztofik, M., Wilk, M., Filip, A., Zmijewski, P., Zajac, A., & Tufano, J. J. (2020). Can Post-Activation Performance Enhancement (PAPE) Improve Resistance Training Volume during the Bench Press Exercise? *International Journal of Environmental Research and Public Health*, 17(7), 2554. <https://doi.org/10.3390/ijerph17072554>
 71. Krzysztofik, M., Wilk, M., Golas, A., Lockie, R. G., Maszczyk, A., & Zajac, A. (2020). Does Eccentric-only and Concentric-only Activation Increase Power Output? *Medicine and Science in Sports and Exercise*, 52(2), 484–489. <https://doi.org/10.1249/MSS.0000000000002131>
 72. Krzysztofik, M., Wilk, M., Lockie, R. G., Golas, A., Zajac, A., & Bogdanis, G. C. (2022). Postactivation Performance Enhancement of Concentric Bench Press Throw After Eccentric-Only Conditioning Exercise. *Journal of Strength and Conditioning Research*, 36(8), 2077–2081. <https://doi.org/10.1519/JSC.0000000000003802>
 73. Krzysztofik, M., Wilk, M., Pisz, A., Kolinger, D., Tsoukos, A., Aschenbrenner, P., Stastny, P., & Bogdanis, G. C. (2022). Effects of Unilateral Conditioning Activity on Acute Performance Enhancement: A Systematic Review. *Journal of Sports Science and*

- Medicine*, 625–639. <https://doi.org/10.52082/jssm.2022.625>
74. Krzysztofik, M., Wilk, M., Pisz, A., Kolinger, D., Tsoukos, A., Zając, A., Stastny, P., & Bogdanis, G. C. (2023). Acute Effects of Varied Back Squat Activation Protocols on Muscle-Tendon Stiffness and Jumping Performance. *Journal of Strength and Conditioning Research, Publish Ahead of Print*. <https://doi.org/10.1519/JSC.0000000000004453>
 75. Krzysztofik, M., Wilk, M., Stastny, P., & Golas, A. (2021). Post-activation Performance Enhancement in the Bench Press Throw: A Systematic Review and Meta-Analysis. *Frontiers in Physiology*, 11, 598628. <https://doi.org/10.3389/fphys.2020.598628>
 76. Lacerda, L. T., Martins-Costa, H. C., Diniz, R. C. R., Lima, F. V., Andrade, A. G. P., Tourino, F. D., Bemben, M. G., & Chagas, M. H. (2016). Variations in Repetition Duration and Repetition Numbers Influence Muscular Activation and Blood Lactate Response in Protocols Equalized by Time Under Tension. *Journal of Strength and Conditioning Research*, 30(1), 251–258. <https://doi.org/10.1519/JSC.0000000000001044>
 77. Lates, A. D., Greer, B. K., Wagle, J. P., & Taber, C. B. (2022). Accentuated Eccentric Loading and Cluster Set Configurations in the Bench Press. *Journal of Strength and Conditioning Research*, 36(6), 1485–1489. <https://doi.org/10.1519/JSC.0000000000003664>
 78. Lesinski, M., Muehlbauer, T., Büsch, D., & Granacher, U. (2013). Acute effects of postactivation potentiation on strength and speed performance in athletes. *Sportverletzung Sportschaden: Organ Der Gesellschaft Fur Orthopadisch-Traumatologische Sportmedizin*, 27(3), 147–155. <https://doi.org/10.1055/s-0033-1335414>
 79. MacIntosh, B. R., Robillard, M.-E., & Tomaras, E. K. (2012). Should postactivation potentiation be the goal of your warm-up? *Applied Physiology, Nutrition, and Metabolism*, 37(3), 546–550. <https://doi.org/10.1139/h2012-016>
 80. Maroto-Izquierdo, S., García-López, D., & de Paz, J. A. (2017). Functional and Muscle-Size Effects of Flywheel Resistance Training with Eccentric-Overload in Professional Handball Players. *Journal of Human Kinetics*, 60, 133–143. <https://doi.org/10.1515/hukin-2017-0096>
 81. Martínez-Cava, A., Morán-Navarro, R., Sánchez-Medina, L., González-Badillo, J. J., & Pallarés, J. G. (2019). Velocity- and power-load relationships in the half, parallel and full back squat. *Journal of Sports Sciences*, 37(10), 1088–1096.

<https://doi.org/10.1080/02640414.2018.1544187>

82. Martins-Costa, H. C., Diniz, R. C. R., Lima, F. V., Machado, S. C., Almeida, R. S. V. de, Andrade, A. G. P. de, & Chagas, M. H. (2016). Longer repetition duration increases muscle activation and blood lactate response in matched resistance training protocols. *Motriz: Revista de Educação Física*, 22(1), 35–41. <https://doi.org/10.1590/S1980-65742016000100005>
83. Merrigan, J. J., Tufano, J. J., Falzone, M., & Jones, M. T. (2021). Effectiveness of Accentuated Eccentric Loading: Contingent on Concentric Load. *International Journal of Sports Physiology and Performance*, 16(1), 66–72. <https://doi.org/10.1123/ijsp.2019-0769>
84. Merrigan, J. J., Tufano, J. J., & Jones, M. T. (2021). Potentiating Effects of Accentuated Eccentric Loading Are Dependent Upon Relative Strength. *Journal of Strength and Conditioning Research*, 35(5), 1208–1216. <https://doi.org/10.1519/JSC.0000000000004010>
85. Moreira, D. G., Costello, J. T., Brito, C. J., Adamczyk, J. G., Ammer, K., Bach, A. J. E., Costa, C. M. A., Eglin, C., Fernandes, A. A., Fernández-Cuevas, I., Ferreira, J. J. A., Formenti, D., Fournet, D., Havenith, G., Howell, K., Jung, A., Kenny, G. P., Kolosovas-Machuca, E. S., Maley, M. J., ... Sillero-Quintana, M. (2017). Thermographic imaging in sports and exercise medicine: A Delphi study and consensus statement on the measurement of human skin temperature. *Journal of Thermal Biology*, 69, 155–162. <https://doi.org/10.1016/j.jtherbio.2017.07.006>
86. Munger, C. N., Archer, D. C., Leyva, W. D., Wong, M. A., Coburn, J. W., Costa, P. B., & Brown, L. E. (2017). Acute Effects of Eccentric Overload on Concentric Front Squat Performance. *Journal of Strength and Conditioning Research*, 31(5), 1192–1197. <https://doi.org/10.1519/JSC.0000000000001825>
87. Munn, J., Herbert, R. D., Hancock, M. J., & Gandevia, S. C. (2005). Resistance training for strength: Effect of number of sets and contraction speed. *Medicine and Science in Sports and Exercise*, 37(9), 1622–1626. <https://doi.org/10.1249/01.mss.0000177583.41245.f8>
88. Ong, J. H., Lim, J., Chong, E., & Tan, F. (2016). The Effects of Eccentric Conditioning Stimuli on Subsequent Counter-Movement Jump Performance. *Journal of Strength and Conditioning Research*, 30(3), 747–754. <https://doi.org/10.1519/JSC.0000000000001154>
89. P. Berriel, G., S. Cardoso, A., R. Costa, R., G. Rosa, R., B. Oliveira, H., Fernando M.

- Kruel, L., & A. Peyré-Tartaruga, L. (2022). Effects of Postactivation Performance Enhancement on the Vertical Jump in High-Level Volleyball Athletes. *Journal of Human Kinetics*, 82(1), 145–153. <https://doi.org/10.2478/hukin-2022-0041>
90. Parry, S., Hancock, S., Shiells, M., Passfield, L., Davies, B., & Baker, J. S. (2008). Physiological effects of two different postactivation potentiation training loads on power profiles generated during high intensity cycle ergometer exercise. *Research in Sports Medicine (Print)*, 16(1), 56–67. <https://doi.org/10.1080/15438620701878998>
 91. Pélabon, C., Hilde, C. H., Einum, S., & Gamelon, M. (2020). On the use of the coefficient of variation to quantify and compare trait variation. *Evolution Letters*, 4(3), 180–188. <https://doi.org/10.1002/evl3.171>
 92. Pereira, L. A., Boullosa, D., Moura, T. B. M. A., Mercer, V. P., Fernandes, V., Bishop, C., & Loturco, I. (2022). Post-Activation Performance Enhancement in Sprinters: Effects of Hard Versus Sand Surfaces. *Journal of Human Kinetics*, 82(1), 173–180. <https://doi.org/10.2478/hukin-2022-0062>
 93. Pożarowski, B., Gołaś, A., Chen, A., Zając, A., & Kawczyński, A. (2018). The Impact of Post Activation Potentiation on Achilles Tendon Stiffness, Elasticity and Thickness among Basketball Players. *Sports (Basel, Switzerland)*, 6(4), E117. <https://doi.org/10.3390/sports6040117>
 94. Proske, U., & Morgan, D. L. (2001). Muscle damage from eccentric exercise: Mechanism, mechanical signs, adaptation and clinical applications. *The Journal of Physiology*, 537(Pt 2), 333–345. <https://doi.org/10.1111/j.1469-7793.2001.00333.x>
 95. Ramsey, R. W., & Street, S. F. (1941). *The relation of the absolutely refractory period, relatively refractory period and tension in isolated muscle fibers of the frog*. 133(419).
 96. Ranatunga, K. W. (1982). Temperature-dependence of shortening velocity and rate of isometric tension development in rat skeletal muscle. *The Journal of Physiology*, 329, 465–483. <https://doi.org/10.1113/jphysiol.1982.sp014314>
 97. Rassier, D. E., & MacIntosh, B. R. (2000). Coexistence of potentiation and fatigue in skeletal muscle. *Brazilian Journal of Medical and Biological Research*, 33(5), 499–508. <https://doi.org/10.1590/S0100-879X2000000500003>
 98. Roberts, T. J. (2016). Contribution of elastic tissues to the mechanics and energetics of muscle function during movement. *Journal of Experimental Biology*, 219(2), 266–275. <https://doi.org/10.1242/jeb.124446>
 99. Rodríguez-Rosell, D., Yáñez-García, J. M., Mora-Custodio, R., Pareja-Blanco, F., Ravelo-García, A. G., Ribas-Serna, J., & González-Badillo, J. J. (2020). Velocity-based

- resistance training: Impact of velocity loss in the set on neuromuscular performance and hormonal response. *Applied Physiology, Nutrition, and Metabolism = Physiologie Appliquee, Nutrition Et Metabolisme*, 45(8), 817–828. <https://doi.org/10.1139/apnm-2019-0829>
100. Romero-Rodriguez, D., Gual, G., & Tesch, P. A. (2011). Efficacy of an inertial resistance training paradigm in the treatment of patellar tendinopathy in athletes: A case-series study. *Physical Therapy in Sport: Official Journal of the Association of Chartered Physiotherapists in Sports Medicine*, 12(1), 43–48. <https://doi.org/10.1016/j.ptsp.2010.10.003>
 101. Ruas, C. V., Latella, C., Taylor, J. L., Haff, G. G., & Nosaka, K. (2022). Comparison between Eccentric-Only and Coupled Concentric–Eccentric Contractions for Neuromuscular Fatigue and Muscle Damage. *Medicine & Science in Sports & Exercise*, 54(10), 1635–1646. <https://doi.org/10.1249/MSS.0000000000002959>
 102. Rutkowski, R., Straburzyńska-Lupa, A., Korman, P., Romanowski, W., & Gizińska, M. (2011). Thermal effectiveness of different IR radiators employed in rheumatoid hand therapy as assessed by thermovisual examination. *Photochemistry and Photobiology*, 87(6), 1442–1446. <https://doi.org/10.1111/j.1751-1097.2011.00975.x>
 103. Sale, D. (2004). Postactivation potentiation: Role in performance. *British Journal of Sports Medicine*, 38(4), 386–387. <https://doi.org/10.1136/bjsm.2002.003392>
 104. Sale, D. G. (2003). Neural Adaptation to Strength Training. W P. V. Komi (Red.), *Strength and Power in Sport* (s. 281–314). Blackwell Science Ltd. <https://doi.org/10.1002/9780470757215.ch15>
 105. Sánchez-Medina, L., & González-Badillo, J. J. (2011). Velocity loss as an indicator of neuromuscular fatigue during resistance training. *Medicine and Science in Sports and Exercise*, 43(9), 1725–1734. <https://doi.org/10.1249/MSS.0b013e318213f880>
 106. Schober, P., Boer, C., & Schwarte, L. A. (2018). Correlation Coefficients: Appropriate Use and Interpretation. *Anesthesia & Analgesia*, 126(5), 1763–1768. <https://doi.org/10.1213/ANE.0000000000002864>
 107. Schoenfeld, B. J., Ogborn, D. I., & Krieger, J. W. (2015). Effect of repetition duration during resistance training on muscle hypertrophy: A systematic review and meta-analysis. *Sports Medicine (Auckland, N.Z.)*, 45(4), 577–585. <https://doi.org/10.1007/s40279-015-0304-0>
 108. Seitz, L. B., de Villarreal, E. S., & Haff, G. G. (2014). The temporal profile of

- postactivation potentiation is related to strength level. *Journal of Strength and Conditioning Research*, 28(3), 706–715. <https://doi.org/10.1519/JSC.0b013e3182a73ea3>
109. Seitz, L. B., & Haff, G. G. (2016). Factors Modulating Post-Activation Potentiation of Jump, Sprint, Throw, and Upper-Body Ballistic Performances: A Systematic Review with Meta-Analysis. *Sports Medicine*, 46(2), 231–240. <https://doi.org/10.1007/s40279-015-0415-7>
 110. Sejersted, O. M., & Hargens, A. R. (1995). Intramuscular pressures for monitoring different tasks and muscle conditions. *Advances in Experimental Medicine and Biology*, 384, 339–350. https://doi.org/10.1007/978-1-4899-1016-5_27
 111. Sheppard, J., Hobson, S., Barker, M., Taylor, K., Chapman, D., McGuigan, M., & Newton, R. (2008). The Effect of Training with Accentuated Eccentric Load Counter-Movement Jumps on Strength and Power Characteristics of High-Performance Volleyball Players. *International Journal of Sports Science & Coaching*, 3(3), 355–363. <https://doi.org/10.1260/174795408786238498>
 112. Sheppard, J. M., & Young, K. (2010). Using additional eccentric loads to increase concentric performance in the bench throw. *Journal of Strength and Conditioning Research*, 24(10), 2853–2856. <https://doi.org/10.1519/JSC.0b013e3181e2731b>
 113. Shimano, T., Kraemer, W. J., Spiering, B. A., Volek, J. S., Hatfield, D. L., Silvestre, R., Vingren, J. L., Fragala, M. S., Maresh, C. M., Fleck, S. J., Newton, R. U., Spreuwenberg, L. P. B., & Häkkinen, K. (2006). Relationship between the number of repetitions and selected percentages of one repetition maximum in free weight exercises in trained and untrained men. *Journal of Strength and Conditioning Research*, 20(4), 819–823. <https://doi.org/10.1519/R-18195.1>
 114. Siracusa, J., Charlot, K., Malgoyre, A., Conort, S., Tardo-Dino, P.-E., Bourrilhon, C., & Garcia-Vicencio, S. (2019). Resting Muscle Shear Modulus Measured With Ultrasound Shear-Wave Elastography as an Alternative Tool to Assess Muscle Fatigue in Humans. *Frontiers in Physiology*, 10, 626. <https://doi.org/10.3389/fphys.2019.00626>
 115. Sleboda, D. A., & Roberts, T. J. (2017). Incompressible fluid plays a mechanical role in the development of passive muscle tension. *Biology Letters*, 13(1), 20160630. <https://doi.org/10.1098/rsbl.2016.0630>
 116. Sleboda, D. A., Wold, E. S., & Roberts, T. J. (2019). Passive muscle tension

- increases in proportion to intramuscular fluid volume. *The Journal of Experimental Biology*, 222(Pt 21), jeb209668. <https://doi.org/10.1242/jeb.209668>
117. Smith, J. C., & Fry, A. C. (2007). Effects of a ten-second maximum voluntary contraction on regulatory myosin light-chain phosphorylation and dynamic performance measures. *Journal of Strength and Conditioning Research*, 21(1), 73–76. <https://doi.org/10.1519/00124278-200702000-00014>
 118. Stein, R. B., Gordon, T., & Shriver, J. (1982). Temperature dependence of mammalian muscle contractions and ATPase activities. *Biophysical Journal*, 40(2), 97–107. [https://doi.org/10.1016/S0006-3495\(82\)84464-0](https://doi.org/10.1016/S0006-3495(82)84464-0)
 119. Stone, M. H., Sands, W. A., Pierce, K. C., Ramsey, M. W., & Haff, G. G. (2008). Power and power potentiation among strength-power athletes: Preliminary study. *International Journal of Sports Physiology and Performance*, 3(1), 55–67. <https://doi.org/10.1123/ijsp.3.1.55>
 120. Suchomel, T. J., Lamont, H. S., & Moir, G. L. (2016). Understanding Vertical Jump Potentiation: A Deterministic Model. *Sports Medicine (Auckland, N.Z.)*, 46(6), 809–828. <https://doi.org/10.1007/s40279-015-0466-9>
 121. Suchomel, T. J., Nimphius, S., Bellon, C. R., & Stone, M. H. (2018). The Importance of Muscular Strength: Training Considerations. *Sports Medicine*, 48(4), 765–785. <https://doi.org/10.1007/s40279-018-0862-z>
 122. Suchomel, T. J., Wagle, J. P., Douglas, J., Taber, C. B., Harden, M., Haff, G. G., & Stone, M. H. (2019). Implementing Eccentric Resistance Training—Part 1: A Brief Review of Existing Methods. *Journal of Functional Morphology and Kinesiology*, 4(2), 38. <https://doi.org/10.3390/jfmk4020038>
 123. Sugi, H., Chaen, S., Akimoto, T., Minoda, H., Miyakawa, T., Miyauchi, Y., Tanokura, M., & Sugiura, S. (2015). Electron microscopic recording of myosin head power stroke in hydrated myosin filaments. *Scientific Reports*, 5(1), 15700. <https://doi.org/10.1038/srep15700>
 124. Sygulla, K. S., & Fountaine, C. J. (2014). Acute Post-Activation Potentiation Effects in NCAA Division II Female Athletes. *International Journal of Exercise Science*, 7(3), 212–219.
 125. Taber, C. B., Morris, J. R., Wagle, J. P., & Merrigan, J. J. (2021). Accentuated Eccentric Loading in the Bench Press: Considerations for Eccentric and Concentric Loading. *Sports*, 9(5), 54. <https://doi.org/10.3390/sports9050054>
 126. , P. A., Ekberg, A., Lindquist, D. M., & Trieschmann, J. T. (2004). Muscle

- hypertrophy following 5-week resistance training using a non-gravity-dependent exercise system. *Acta Physiologica Scandinavica*, 180(1), 89–98. <https://doi.org/10.1046/j.0001-6772.2003.01225.x>
127. Tillin, N. A., & Bishop, D. (2009). Factors modulating post-activation potentiation and its effect on performance of subsequent explosive activities. *Sports Medicine (Auckland, N.Z.)*, 39(2), 147–166. <https://doi.org/10.2165/00007256-200939020-00004>
 128. Timon, R., Allemano, S., Camacho-Cardenosa, M., Camacho-Cardenosa, A., Martinez-Guardado, I., & Olcina, G. (2019). Post-Activation Potentiation on Squat Jump Following Two Different Protocols: Traditional Vs. Inertial Flywheel. *Journal of Human Kinetics*, 69, 271–281. <https://doi.org/10.2478/hukin-2019-0017>
 129. Trybulski, R., Wojdała, G., Alexe, D. I., Komarek, Z., Aschenbrenner, P., Wilk, M., Zajac, A., & Krzysztofik, M. (2022). Acute Effects of Different Intensities during Bench Press Exercise on the Mechanical Properties of Triceps Brachii Long Head. *Applied Sciences*, 12(6), 3197. <https://doi.org/10.3390/app12063197>
 130. Tseng, K.-W., Chen, J.-R., Chow, J.-J., Tseng, W.-C., Condello, G., Tai, H.-L., & Fu, S.-K. (2021). Post-activation Performance Enhancement after a Bout of Accentuated Eccentric Loading in Collegiate Male Volleyball Players. *International Journal of Environmental Research and Public Health*, 18(24), 13110. <https://doi.org/10.3390/ijerph182413110>
 131. Tsoukos, A., Brown, L. E., Terzis, G., Veligekas, P., & Bogdanis, G. C. (2021). Potentiation of Bench Press Throw Performance Using a Heavy Load and Velocity-Based Repetition Control. *Journal of Strength and Conditioning Research*, 35(2S), S72–S79. <https://doi.org/10.1519/JSC.00000000000003633>
 132. Tsoukos, A., Brown, L. E., Veligekas, P., Terzis, G., & Bogdanis, G. C. (2019). Postactivation Potentiation of Bench Press Throw Performance Using Velocity-Based Conditioning Protocols with Low and Moderate Loads. *Journal of Human Kinetics*, 68(1), 81–98. <https://doi.org/10.2478/hukin-2019-0058>
 133. Ulrich, G., & Parstorfer, M. (2017). Effects of Plyometric Versus Concentric and Eccentric Conditioning Contractions on Upper-Body Postactivation Potentiation. *International Journal of Sports Physiology and Performance*, 12(6), 736–741. <https://doi.org/10.1123/ijsp.2016-0278>
 134. Van Cutsem, M., Duchateau, J., & Hainaut, K. (1998). Changes in single motor unit behaviour contribute to the increase in contraction speed after dynamic training in

- humans. *The Journal of Physiology*, 513(1), 295–305. <https://doi.org/10.1111/j.1469-7793.1998.295by.x>
135. Vandenboom, R., Grange, R. W., & Houston, M. E. (1993). Threshold for force potentiation associated with skeletal myosin phosphorylation. *The American Journal of Physiology*, 265(6 Pt 1), C1456-1462. <https://doi.org/10.1152/ajpcell.1993.265.6.C1456>
 136. Vikne, H., Refsnes, P. E., Ekmark, M., Medbø, J. I., Gundersen, V., & Gundersen, K. (2006). Muscular performance after concentric and eccentric exercise in trained men. *Medicine and Science in Sports and Exercise*, 38(10), 1770–1781. <https://doi.org/10.1249/01.mss.0000229568.17284.ab>
 137. Wagle, J. P., Cunanan, A. J., Carroll, K. M., Sams, M. L., Wetmore, A., Bingham, G. E., Taber, C. B., DeWeese, B. H., Sato, K., Stuart, C. A., & Stone, M. H. (2021). Accentuated Eccentric Loading and Cluster Set Configurations in the Back Squat: A Kinetic and Kinematic Analysis. *Journal of Strength and Conditioning Research*, 35(2), 420–427. <https://doi.org/10.1519/JSC.0000000000002677>
 138. Wagle, J. P., Taber, C. B., Cunanan, A. J., Bingham, G. E., Carroll, K. M., DeWeese, B. H., Sato, K., & Stone, M. H. (2017). Accentuated Eccentric Loading for Training and Performance: A Review. *Sports Medicine*, 47(12), 2473–2495. <https://doi.org/10.1007/s40279-017-0755-6>
 139. Wagle, J., Taber, C., Carroll, K., Cunanan, A., Sams, M., Wetmore, A., Bingham, G., DeWeese, B., Sato, K., Stuart, C., & Stone, M. (2018). Repetition-to-Repetition Differences Using Cluster and Accentuated Eccentric Loading in the Back Squat. *Sports*, 6(3), 59. <https://doi.org/10.3390/sports6030059>
 140. Walker, S., Blazeovich, A. J., Haff, G. G., Tufano, J. J., Newton, R. U., & Häkkinen, K. (2016). Greater Strength Gains after Training with Accentuated Eccentric than Traditional Isoinertial Loads in Already Strength-Trained Men. *Frontiers in Physiology*, 7. <https://doi.org/10.3389/fphys.2016.00149>
 141. Wang, D., DE Vito, G., Ditroilo, M., & Delahunt, E. (2017). Different Effect of Local and General Fatigue on Knee Joint Stiffness. *Medicine and Science in Sports and Exercise*, 49(1), 173–182. <https://doi.org/10.1249/MSS.0000000000001086>
 142. Wang, D., De Vito, G., Ditroilo, M., & Delahunt, E. (2017). Effect of sex and fatigue on muscle stiffness and musculoarticular stiffness of the knee joint in a young active population. *Journal of Sports Sciences*, 35(16), 1582–1591. <https://doi.org/10.1080/02640414.2016.1225973>

143. Wang, D., De Vito, G., Ditroilo, M., Fong, D. T. P., & Delahunt, E. (2015). A comparison of muscle stiffness and musculoarticular stiffness of the knee joint in young athletic males and females. *Journal of Electromyography and Kinesiology*, 25(3), 495–500. <https://doi.org/10.1016/j.jelekin.2015.03.003>
144. Weigert, M., Nitzsche, N., Kunert, F., Lösch, C., Baumgärtel, L., & Schulz, H. (2018). Acute Exercise-Associated Skin Surface Temperature Changes after Resistance Training with Different Exercise Intensities. *International Journal of Kinesiology and Sports Science*, 6(1), 12. <https://doi.org/10.7575/aiac.ijkss.v.6n.1p.12>
145. Westerblad, H., & Allen, D. G. (1993). The contribution of $[Ca^{2+}]_i$ to the slowing of relaxation in fatigued single fibres from mouse skeletal muscle. *The Journal of Physiology*, 468, 729–740. <https://doi.org/10.1113/jphysiol.1993.sp019797>
146. Westing, S. H., Seger, J. Y., Karlson, E., & Ekblom, B. (1988). Eccentric and concentric torque-velocity characteristics of the quadriceps femoris in man. *European Journal of Applied Physiology and Occupational Physiology*, 58(1–2), 100–104. <https://doi.org/10.1007/BF00636611>
147. Wilk, M., Gepfert, M., Krzysztofik, M., Mostowik, A., Filip, A., Hajduk, G., & Zajac, A. (2020). Impact of Duration of Eccentric Movement in the One-Repetition Maximum Test Result in the Bench Press among Women. *Journal of Sports Science & Medicine*, 19(2), 317–322.
148. Wilk, M., Golas, A., Zmijewski, P., Krzysztofik, M., Filip, A., Coso, J. D., & Tufano, J. J. (2020). The Effects of the Movement Tempo on the One-Repetition Maximum Bench Press Results. *Journal of Human Kinetics*, 72, 151–159. <https://doi.org/10.2478/hukin-2020-0001>
149. Wilson, J. M., Duncan, N. M., Marin, P. J., Brown, L. E., Loenneke, J. P., Wilson, S. M. C., Jo, E., Lowery, R. P., & Ugrinowitsch, C. (2013). Meta-analysis of postactivation potentiation and power: Effects of conditioning activity, volume, gender, rest periods, and training status. *Journal of Strength and Conditioning Research*, 27(3), 854–859. <https://doi.org/10.1519/JSC.0b013e31825c2bdb>
150. Yetter, M., & Moir, G. L. (2008). The Acute Effects of Heavy Back and Front Squats on Speed during Forty-Meter Sprint Trials. *Journal of Strength and Conditioning Research*, 22(1), 159–165. <https://doi.org/10.1519/JSC.0b013e31815f958d>
151. Zhang, L. Q., & Rymer, W. Z. (2001). Reflex and intrinsic changes induced by fatigue of human elbow extensor muscles. *Journal of Neurophysiology*, 86(3), 1086–1094. <https://doi.org/10.1152/jn.2001.86.3.1086>

152. Zimmermann, H. B., MacIntosh, B. R., & Dal Pupo, J. (2020). Does postactivation potentiation (PAP) increase voluntary performance? *Applied Physiology, Nutrition, and Metabolism*, 45(4), 349–356. <https://doi.org/10.1139/apnm-2019-0406>

Spis tabel

Tabela 1	Charakterystyka uczestników badania	30
Tabela 2	Wartości współczynnika korelacji wewnątrzklasowej oraz współczynnika zmienności dla analizowanych parametrów	37
Tabela 3	Rozkład uczestników reagujących, niereagujących oraz reagujących negatywnie na zastosowane CA	38
Tabela 4	Współczynniki korelacji dla wybranych zmiennych CMJ i biomechanicznych właściwości głowy bocznej mięśnia czworogłowego uda, a szczytową procentową wartością odpowiedzi PAPE	44

Spis rycin

Rycina 1	Schemat przedstawiający różnice pomiędzy wzmocnieniem po-aktywacyjnym (PAP), a po-aktywacyjnym wzrostem sprawności fizycznej (PAPE) (Boullosa, 2021)	5
Rycina 2	Zdjęcie przedstawiające przybory zwalniające obciążenie zewnętrzne (WR)	7
Rycina 3	Poszczególne etapy wykonania przysiadu ze sztangą z przyborami zwalniającymi obciążenie zewnętrzne	22

Spis wykresów

Wykres 1	Wysokość skoku pionowego w poszczególnych punktach pomiarowych podczas każdej sesji eksperymentalnej	39
Wykres 2	Generowana moc względna podczas skoku pionowego w poszczególnych punktach pomiarowych podczas każdej sesji eksperymentalnej	40

Wykres 3	Częstotliwość oscylacji głowy bocznej mięśnia czworogłowego uda w poszczególnych punktach pomiarowych podczas każdej sesji eksperymentalnej	41
Wykres 4	Sztywność głowy bocznej mięśnia czworogłowego uda w poszczególnych punktach pomiarowych podczas każdej sesji eksperymentalnej	41
Wykres 5	Elastyczność głowy bocznej mięśnia czworogłowego uda w poszczególnych punktach pomiarowych podczas każdej sesji eksperymentalnej	42
Wykres 6	Temperatura powierzchniowa skóry okolic głowy bocznej mięśnia czworogłowego uda w poszczególnych punktach pomiarowych podczas każdej sesji eksperymentalnej	43