

AKADEMIA WYCHOWANIA FIZYCZNEGO
IM. JERZEGO KUKUCZKI W KATOWICACH

Artur Terbalyan

**OCENA ZJAWISKA POSTAKTYWACYJNEJ POPRAWY
SPRAWNOŚCI FIZYCZNEJ W KONTEKŚCIE WYBRANYCH
WSKAŹNIKÓW GENEROWANIA MOCY MIĘŚNIOWEJ
KOŃCZYN DOLNYCH**

Rozprawa na stopień doktora nauk o kulturze fizycznej w postaci zbioru opublikowanych i
powiązanych tematycznie artykułów naukowych

Promotor:
dr hab. inż. Robert Roczniok, prof. AWF Katowice

KATOWICE 2025

Spis treści

1. STRESZCZENIE [PL]	3
2. SUMMARY [EN].....	5
WYKAZ PUBLIKACJI BĘDĄCYCH PODSTAWĄ ROZPRAWY DOKTORSKIEJ	7
WYKAZ SKRÓTÓW	8
3. WSTĘP	9
3.1. ROLA GENEROWANIA MOCY MIĘŚNIOWEJ W KONTEKŚCIE SPORTOWYM.....	9
3.2. ZJAWISKO PAPE A POZIOM MOCY MIĘŚNIOWEJ.....	10
3.3. POWIĄZANIE WYBRANYCH PUBLIKACJI.....	14
4. PRZEDMIOT ROZPRAWY	16
4.1. PROBLEM BADAWCZY	16
4.2. CEL BADAŃ, PYTANIA ORAZ HIPOTEZY BADAWCZE	18
4.3. OSIĄGNIĘCIA NAUKOWE	19
5. MATERIAŁ I METODY BADAWCZE	21
5.1. BADANIE 1	21
5.2. BADANIE 2	23
5.3. BADANIE 3	26
6. WYNIKI.....	29
6.1. BADANIE 1	29
6.2. BADANIE 2	34
6.3. BADANIE 3	37
7. DYSKUSJA.....	39
8. WNIOSKI	46
9. BIBLIOGRAFIA	48
10. PRACE WCHODZĄCE W SKŁAD OSIĄGNIĘCIA NAUKOWEGO.....	58
10.1. PRACA 1.....	58
10.2. PRACA 2.....	82
10.3. PRACA 3.....	93

1. Streszczenie [PL]

Celem niniejszej dysertacji było kompleksowe zbadanie zjawiska postaktywacyjnej poprawy sprawności fizycznej (ang. Post-Activation Performance Enhancement, PAPE) w odniesieniu do wybranych parametrów generowania mocy mięśniowej kończyn dolnych w różnych kontekstach sportowych. Przeprowadzono cykl trzech badań, w których uwzględniono zarówno metodykę eksperymentalną, jak i przeglądową istniejącej literatury naukowej wraz z metaanalizą. W pierwszym etapie zrealizowano systematyczny przegląd i metaanalizę, obejmującą 19 badań z udziałem 286 zawodników uprawiających sporty walki w celu oceny ogólnego efektu PAPE, przeprowadzony zgodnie z wytycznymi PRISMA (Preferred Reporting Items for Systematic Reviews and Meta-Analyses). Jako główną hipotezę zakładano, że protokoły aktywacyjne w sportach walki istotnie poprawiają zdolności eksplozywne (np. wysokość skoku, moc ciosu), przy czym efekt jest większy w dyscyplinach szybkościowo-siłowych i zależy od specyfiki protokołu. Wyniki wykazały umiarkowany, lecz istotny pozytywny wpływ protokołów aktywacyjnych na zdolności eksplozywne sportowców, chociaż skuteczność interwencji była silnie zależna od specyfiki zastosowanego protokołu oraz dyscypliny sportowej. Wyniki sugerują potrzebę standaryzacji protokołów PAPE dla optymalizacji ich skuteczności w sportach walki.

W kolejnym badaniu eksperymentalnym przeanalizowano wpływ unilateralnego izometrycznego ćwiczenia typu „overcoming” (pl. *polegające na rozwijaniu maksymalnej siły przeciwko nieruchomemu oporowi*) na parametry generowania mocy mięśniowej związane ze skokiem pionowym po zeskoku w głąb jednonóż u siatkarzy o różnym poziomie zaawansowania. Badanie było eksperymentem z randomizacją, zaprojektowanym w układzie podwójnie ślepej próby typu crossover. Zrekrutowano 20 zdrowych siatkarzy płci męskiej – 10 zawodników poziomu elitarnego oraz 10 zawodników amatorskich. Główna hipoteza zakładała, że izometryczne ćwiczenie aktywacyjne spowoduje istotną poprawę parametrów skoku dla kończyny poddanej aktywacji w porównaniu do stanu bez bodźca, przy czym efekt ten będzie lokalny, to jest nie wystąpi znacząca poprawa (a potencjalnie nawet pogorszenie) w kończynie nieobjętej ćwiczeniem. Uzyskano wyraźny efekt lokalny – u zawodników elitarnych zaobserwowano znaczący wzrost wysokości skoku oraz poprawę wskaźnika siły reaktywnej w kończynie poddanej aktywacji, natomiast w grupie amatorów efekt był mniejszy lub nieistotny.

Trzecie badanie miało charakter porównawczy i dotyczyło oceny efektywności izometrycznej rozgrzewki opartej na protokole PAPE w odniesieniu do tradycyjnej

rozgrzewki aerobowej na bieżni u zawodników sportów zespołowych. Celem badania było kompleksowe zbadanie zjawiska PAPE w odniesieniu do wybranych parametrów generowania mocy mięśniowej kończyn dolnych w różnych kontekstach sportowych. W eksperymencie porównano wpływ izometrycznej rozgrzewki opartej na protokole PAPE (ćwiczenia o wysokiej intensywności, 5-sekundowe maksymalne napięcie) z tradycyjną rozgrzewką aerobową (lekki bieg) na wysokość skoku u 24 zawodników sportów zespołowych. Przewidywano, że izometryczna rozgrzewka o wysokiej intensywności oparta na PAPE bardziej poprawi wysokość skoku w porównaniu z tradycyjną rozgrzewką aerobową u zawodników sportów zespołowych. Wyniki tego eksperymentu nie wykazały istotnych różnic w poprawie wyskoku, co sugeruje, że klasyczna rozgrzewka często może być wystarczająca do uzyskania pożądanego stanu pobudzenia. Wyniki całego cyklu badań wykazują, iż PAPE, choć obiecujący, zależy od wielu czynników – w tym rodzaju zastosowanego ćwiczenia, intensywności bodźca, czasu odpoczynku oraz poziomu wytrenowania zawodników. Otrzymane rezultaty mają istotne implikacje praktyczne dla trenerów, którzy mogą dostosować protokoły przygotowania do wysiłku do specyfiki danej dyscypliny sportowej. Jednocześnie praca uwidacznia ograniczenia obecnych metod badawczych oraz potrzebę dalszych badań nad standaryzacją protokołów aktywacyjnych i poszukiwaniu mechanizmów w celu maksymalizacji korzyści z efektu PAPE.

Słowa kluczowe: *wzmocnienie postaktywacyjne, sporty walki, sporty zespołowe, metaanaliza, skok jednonóż, rozgrzewka izometryczna, moc mięśniowa.*

2. Summary [EN]

ASSESSING THE PHENOMENON OF POSTACTIVATION PERFORMANCE ENHANCEMENT IN THE CONTEXT OF SELECTED INDICATORS OF LOWER LIMB MUSCLE POWER PRODUCTION

The aim of this dissertation was to comprehensively investigate the phenomenon of Post-Activation Performance Enhancement (PAPE) in relation to selected muscle power parameters of the lower limbs in various sports contexts. A series of three studies was conducted, incorporating both experimental methodology and a systematic analysis of existing scientific literature with meta-analysis. The first study involved a systematic review and meta-analysis of 19 studies involving 286 combat sports athletes to evaluate the overall effect of PAPE. The research method consisted of a systematic literature review with meta-analysis conducted in accordance with PRISMA guidelines. The primary hypothesis posited that PAPE protocols in combat sports significantly enhance explosive capabilities (e.g., jump height, punch power), with greater effects in speed-strength disciplines and dependent on protocol specifics. The results demonstrated a moderate but significant positive effect of activation protocols on athletes' explosive capabilities, with intervention effectiveness strongly dependent on the protocol's specifics and the sport discipline. These findings suggest the need for standardization of PAPE protocols to optimize their effectiveness in combat sports.

The second experimental study analyzed the impact of a unilateral isometric “overcoming” exercise (involving maximal force development against an immovable resistance) on power production parameters related to single-leg drop jump in volleyball players of varying skill levels. The study was a randomized, double-blind crossover experiment. Twenty healthy male volleyball players were recruited—10 elite and 10 amateur. The main hypothesis assumed that the isometric activation exercise would significantly improve jump parameters in the activated limb compared to a no-stimulus condition, with the effect being localized, i.e., no significant improvement (and potentially deterioration) in the contralateral non-activated limb. A clear localized effect was observed—elite players exhibited significant increases in jump height and reactive strength index in the activated limb, while the effect in amateurs was minimal or insignificant.

The third comparative study evaluated the effectiveness of an isometric warm-up based on the PAPE protocol compared to a traditional aerobic warm-up on a treadmill

in team sports athletes. The experiment compared the impact of an isometric warm-up based on PAPE (high-intensity exercises with 5-second maximal tension) with a traditional aerobic warm-up (jogging) on jump height in 24 team sports athletes. It was hypothesized that the high-intensity isometric warm-up based on PAPE would enhance jump height more than the traditional aerobic warm-up in team sports athletes. The results showed no significant differences in jump height improvement, suggesting that a traditional warm-up may often be sufficient for optimizing pre-exercise arousal in team sports.

The results of the entire research cycle indicate that the PAPE effect, while promising, depends on multiple factors, including the type of exercise, stimulus intensity, rest duration, and athletes' training level. These findings have significant practical implications for coaches, who can tailor pre-exercise protocols to the specifics of a given sport. Concurrently, the study highlights limitations in current research methods and the need for further studies on standardizing activation protocols and exploring mechanisms to maximize PAPE benefits.

Keywords: *post-activation enhancement, combat sports, team sports, meta-analysis, single-leg jump, isometric warm-up, neuromuscular performance.*

Wykaz publikacji będących podstawą rozprawy doktorskiej

Lp.	Tytuł artykułu	Autorzy	Czasopismo, Rok, Vol./nr., DOI	IF	Punktacja MNiSW
1.	Effects of overcoming isometric unilateral conditioning activity on subsequent single-leg drop jump in elite and amateur volleyball players: a randomized crossover trial	Artur Terbalyan, Kazimierz Mikołajec, Michał Krzysztofik, Robert Urbański, Jakub Jarosz, Petr Stastny, Michał Spieszny	BMC Sports Science, Medicine and Rehabilitation, 2025, 28, 17, DOI: 10.1186/s13102-025-01083-9	2.1	100
2.	Effect of Post-Activation Performance Enhancement in Combat Sports: A Systematic Review and Meta-Analysis—Part I: General Performance Indicators	Artur Terbalyan, Karol Skotniczny, Michał Krzysztofik, Jakub Chycki, Vadim Kasparov, Robert Roczniok	Journal of Functional Morphology and Kinesiology, 2025, 10, 88, DOI: 10.3390/jfmk10010088	2.6	20
3.	No Evidence of PAPE-Induced Jumping Performance Enhancement Following Isometric and Treadmill Warm-Ups in Team Sport Athletes	Artur Terbalyan, Anna Ścisłowska-Czarnecka, Adam Maszczyk, Robert Roczniok	Baltic Journal of Health and Physical Activity, 2025, 17, 2, DOI: 10.29359/BJHPA.17.2.07	0.8	70
Łącznie				5.5	190

Wykaz skrótów

RFD – ang. *rate of force development* – szybkość rozwijania siły

PAP – ang. *postactivation potentiation* – wzmocnienie postaktywacyjne

PAPE – ang. *postactivation performance enhancement* – postaktywacyjna poprawa sprawności fizycznej

CA – ang. *conditioning activity* – ćwiczenie aktywacyjne

CMJ – ang. *countermovement jump* – skok dosiężny z miejsca z zamachem

RSI – ang. *reactive strength index* – wskaźnik siły reaktywnej

SLDJ – ang. *single-leg drop jump* – skok pionowy po zeskoku w głąb jednej nogi

CT – ang. *contact time* – czas kontaktu z podłożem

ES – ang. *effect size* – siła efektu

I² – ang. *heterogeneity index* – współczynnik heterogeniczności wyników

CI – ang. *confidence interval* – przedział ufności

p – prawdopodobieństwo testowe

AMA – grupa zawodników amatorów

ELI – grupa zawodników elitarnych

g – ang. *Hedges' g effect size* – wielkość efektu Hedgesa

M – mężczyzna

K – kobieta

ANOVA – ang. *analysis of variance* – analiza wariancji

F – wartość testu Fishera

TMG – tensiomiografia

USG – ultrasonografia

EMG – elektromiografia

MMA – ang. *mixed martial arts* – mieszane sztuki walki

3. Wstęp

3.1. Rola generowania mocy mięśniowej w kontekście sportowym

Zdolność do generowania wysokiego poziomu mocy mięśniowej stanowi fundamentalny czynnik warunkujący sukcesy sportowe w licznych dyscyplinach (Hewett i wsp. 2005). W literaturze podkreśla się, że kluczowe zdolności motoryczne – takie jak siła mięśniowa maksymalna oraz moc eksplozywna – istotnie korelują z poprawą charakterystyk ruchu w wymiarze siłowo-czasowym (np. wyższą szybkością rozwijania siły, ang. *Rate of Force Development*, RFD) i z wynikami w testach sprawności fizycznej (skokach, sprintach, zdolności do szybkiej zmiany kierunku biegu) (Suchomel i wsp., 2016). Jednocześnie wysoki poziom siły mięśniowej wiąże się ze zmniejszeniem ryzyka urazów, co dodatkowo potwierdza znaczenie treningu siły i mocy u sportowców (Lauersen i wsp., 2014). Z perspektywy neuromechaniki ruchu, skoordynowana integracja działania układu nerwowego i mięśniowego umożliwia optymalne generowanie siły z odpowiednią dynamiką, co jest niezbędne do wykonywania złożonych zadań motorycznych w sporcie (Folland i Williams, 2007).

Znaczenie wysokiej sprawności układu nerwowo-mięśniowego uwidacznia się szczególnie w sportach zespołowych, gdzie zawodnicy wielokrotnie wykonują krótkotrwałe, intensywne akcje (Young i wsp., 2002). W sportach zespołowych sukces wymaga powtarzanych sprintów, skoków oraz gwałtownych zmian kierunku – wszystkie te działania zależą od zdolności mięśni do ekspresji wysokiego poziomu siły w krótkim czasie oraz od skutecznej rekrutacji jednostek motorycznych przez układ nerwowy (Cormie i wsp., 2010). Badania wykazują, że zawodnicy przejawiający wyższy poziom siły mięśniowej i o wyższym poziomie wytrenowania osiągają lepsze rezultaty w testach skoczności i szybkości, co przekłada się na przewagę w warunkach rywalizacji sportowej (Comfort i wsp., 2014). Przykładowo, meta-analiza 47 badań (Seitz i Haff, 2016) wykazała istotne zależności między poziomem siły a zdolnością do poprawy takich wymiarów sprawności jak wysokość skoku czy czas sprintu – efekt ten był wyraźniej zaznaczony u sportowców o większym poziomie siły względnej oraz większym doświadczeniu w treningu siłowym.

Podobnie jak w sportach zespołowych, w sportach walki rola siły maksymalnej, mocy i szybkości jest znacząca. Efektywność układu nerwowo-mięśniowego w generowaniu mocy decyduje tam o przewadze bezpośredniej nad przeciwnikiem – zdolność do oddania

silnego ciosu lub gwałtownego rzutu może przesądzić o wyniku pojedynku (Hernandez-Martinez i wsp., 2024; Dunn i wsp., 2022). Wysoki poziom siły eksplozywnej jest zatem cechą wyróżniającą najlepszych zawodników sportów walki. Potwierdzają to analizy porównawcze zawodników na różnym poziomie zaawansowania – np. w mieszanych sztukach walki wykazano, że zawodnicy wyższego poziomu sportowego dysponują lepszymi wynikami w testach sprawności mięśniowej; większy poziom siły maksymalnej w przysiadzie, wyższy wskaźnik siły reaktywnej (RSI, ang. *Reactive Strenght Index*) oraz większy poziom mocy i prędkości rozwijanej w skokach z obciążeniem stanowiły czynniki różnicujące zawodników z odmiennych rang zawodowych (Bueno i wsp., 2022). Wynika stąd, iż pomiary sprawności nerwowo-mięśniowej – w tym poziomu siły i mocy mięśniowej – wydają się być ważnym wyznacznikiem poziomu sportowego i mogą służyć jako element diagnostyki w przygotowaniu motorycznym zawodników sportów walki.

Zarówno w sportach zespołowych, jak i w sportach walki, trening ukierunkowany na poprawę RFD, mocy oraz szybkości (np. trening siłowy, plyometryczny, trening szybkościowy) jest nieodłącznym elementem przygotowania, mającym na celu poprawę sprawności mięśniowej i tym samym wyników sportowych.

3.2. Zjawisko PAPE a poziom mocy mięśniowej

W kontekście krótkotrwałej poprawy zdolności wysiłkowych po uprzednim wysiłku, od wielu lat badane jest zjawisko wzmocnienia postaktywacyjnego (PAP, ang. *Post-Activation Potentiation*). PAP definiuje się jako przejściowe zwiększenie zdolności mięśni do wytwarzania siły na skutek wcześniejszej aktywacji – na poziomie pojedynczego mięśnia zjawisko to tłumaczy się głównie zmianami na poziomie molekularnym, jakim jest fosforylacja lekkich łańcuchów miozyny we włóknach mięśniowych typu II, prowadząca do zwiększenia wrażliwości aparatu kurczliwego na jony wapnia (Hodgson i wsp., 2005; Blazevich i Babault, 2019). Efektem PAP jest nasilona aktywność mięśnia przy submaksymalnym pobudzeniu, co wykazano w badaniach poprzez pomiary skurczów wymuszonych po wykonaniu skurczów poprzedzających (Gossen i Sale, 2000). Charakterystyczną cechą „klasycznego” ujęcia PAP jest jednak jego krótkotrwałość – szczytowy efekt wzmocnienia zanika w ciągu kilkunastu sekund od zakończenia aktywacji mięśnia - czas półtrwania szacuje się na ok. 30 sekund (Vandervoort i wsp., 1983).

W praktyce przygotowania motorycznego obserwuje się z kolei inny, pokrewny fenomen polegający na poprawie sprawności fizycznej po upływie kilku minut od zakończenia

intensywnego wysiłku zwanego ćwiczeniem aktywacyjnym (CA, ang. *Conditioning Activity*). Przykładowo, zawodnicy wykonujący przed próbą skoku lub sprintu serię ciężkich przysiadów lub skurczów izometrycznych często odnotowują poprawę wyników dopiero po 3–10 minutach odpoczynku od tego wysiłku wstępnego (Wilson i wsp., 2013). Takie opóźnione w czasie wzmocnienie efektu wysiłkowego nie pokrywa się z czasowym profilem „klasycznego” PAP, sugerując udział dodatkowych mechanizmów poza samą fosforylacją miozyny (Zimmerman i wsp., 2020). W związku z tym w literaturze wprowadzono termin Post-Activation Performance Enhancement (PAPE), czyli postaktywacyjnej poprawy sprawności fizycznej, w celu odróżnienia tego zjawiska od tradycyjnie rozumianego PAP (Cuenca-Fernández i wsp., 2017). PAPE odnosi się do obserwowanego wzrostu wyników w teście sprawności fizycznej (np. wysokości skoku, prędkości biegu, RFD) następującego kilka minut po wykonaniu CA, przy czym wzrost ten utrzymuje się przez dłuższy czas, niż klasyczny PAP, mimo częściowego ustąpienia bezpośrednich efektów fizjologicznych (Boullosa i wsp., 2020). Co istotne, w literaturze zaobserwowano, że w momencie, gdy efekt PAP jest najsilniejszy (tuż po zakończeniu wysiłku), zazwyczaj nie zauważa się jeszcze poprawy w wykonaniu zadań motorycznych. Natomiast, po upływie kilku minut, gdy PAP zanika, pojawia się wyraźna poprawa wydajności. Wskazuje to na to, że klasyczny PAP i „funkcjonalny” PAPE mogą być zjawiskami w dużej mierze odmiennymi (Boullosa i wsp., 2020).

Niektórzy autorzy sugerują wręcz, że w warunkach wysiłku *in vivo* komponent PAP w niewielkim stopniu przyczynia się do późniejszej poprawy wyników sportowych, która z większym prawdopodobieństwem wynika z innych adaptacji zachodzących po CA (Zimmerman i wsp., 2020; Blazevich i Babault, 2019). Z drugiej strony, kompleksowa rozgrzewka przed wysiłkiem już sama w sobie wyzwała wiele korzystnych zmian fizjologicznych, przez co znaczenie PAP/PAPE może być ograniczone, jeśli CA dublują efekty standardowej rozgrzewki (Liu i wsp., 2024; Macintosh i wsp., 2012). W związku z tym, we współczesnej literaturze podkreśla się konieczność precyzyjnego rozróżniania pojęć PAP od PAPE oraz badań nad warunkami optymalizującymi to drugie zjawisko w kontekście sportowym (Prieske i wsp., 2020).

Badania wykazują, że wielkość PAPE zależy od wielu zmiennych związanych z CA. Kluczowym czynnikiem jest czas przerwy między CA a testem sprawności fizycznej – zbyt krótki odpoczynek (np. poniżej ~1–2 minut) skutkuje dominacją zmęczenia i może nawet pogorszyć wynik (Seitz i Haff, 2016; Kobal i wsp., 2019). W praktyce poprawa wyników pojawia się dopiero po upływie kilku minut, gdy zmęczenie częściowo ustąpi, a wzmożoną aktywację można wykorzystać. Wykazano, że optymalna przerwa wynosi zwykle od około 4 do

8-10 minut w zależności od rodzaju wysiłku. Przykładowo, po ciężkim ćwiczeniu przysiadu największy przyrost wysokości skoku zaobserwowano przy 4–7 minutach odpoczynku (odstęp < 1 min były wyraźnie niekorzystne; Chen i wsp., 2023). Równie istotna jest intensywność CA – aby wywołać pobudzenie układu nerwowo-mięśniowego, bodziec musi być dostatecznie silny. Przeglądy literatury podkreślają, że dopiero wysoka intensywność (zalecane obciążenia $\geq 80\%$ 1RM lub wysiłek maksymalny) skutecznie wywołuje PAPE, podczas gdy ćwiczenia o małej bądź umiarkowanej intensywności często nie przynoszą istotnej poprawy wyniku (Chen i wsp., 2023). Innymi słowy, ciężkie ćwiczenia siłowe powodują większą aktywację, ale wymagają także dłuższej przerwy na regenerację, natomiast przy lżejszych bodźcach brak jest dostatecznej stymulacji układu ruchu (Rassier i Macintosh, 2000). Co więcej, odnotowano istotne zróżnicowanie osobnicze – u osób bardziej wytrenowanych dodatni efekt pojawia się częściej i szybciej, niż u mniej wytrenowanych (wyższa tolerancja zmęczenia oraz rekrutacja jednostek motorycznych; Ouergui i wsp., 2023). Z tego względu czas przerwy i intensywność CA zawsze należy indywidualizować, tak aby równowaga między aktywacją a zmęczeniem była korzystna w momencie wykonania testu sprawności fizycznej (Wilson i wsp., 2013; Seitz i Haff, 2016; Vettet, 2007).

Rodzaj zastosowanego CA oraz jego specyfika również w istotny sposób modulują wielkość PAPE. W literaturze testowano różne formy CA – od krótkotrwałych maksymalnych skurczów izometrycznych, przez klasyczne ćwiczenia siłowe z wysokim obciążeniem, po eksplozywne ruchy balistyczne (skoki plyometryczne, rzuty) czy nawet elementy techniczne specyficzne dla danej dyscypliny (Wilson i wsp., 2013). Ciężkie dynamiczne ćwiczenia siłowe (np. przysiady ze sztangą z obciążeniem $\geq 85\%$ 1RM) są skuteczne w indukowaniu PAPE, lecz generują również większe zmęczenie – stąd potrzebny jest dłuższy odpoczynek, często rzędu 8–10 minut, aby korzyści mogły się ujawnić (Ouergui i wsp., 2023). Dla kontrastu, ćwiczenia izometryczne generują względnie mniejsze zmęczenie mięśniowe, dzięki czemu PAPE może pojawić się szybciej (Vargas-Molina i wsp., 2021). Zgodnie z zasadą specyficzności, im bardziej CA przypomina docelową aktywność pod względem wzorca ruchu, zaangażowanych grup mięśni i charakteru wysiłku, tym większa szansa na osiągnięcie statystycznie istotnego PAPE (Kalinowski i wsp., 2022). Krzysztofik i wsp. (2022) potwierdzili, że CA i następujące po nim zadanie powinny cechować się możliwie zbliżonym zakresem ruchu, aby maksymalizować efekt po aktywacji. W praktyce oznacza to, że dobór ćwiczenia wstępnego warto oprzeć o analizę specyfiki konkurencji – np. skoki lub sprinty aktywacyjne dla dyscyplin wymagających skoku lub przyspieszenia, jednocześnie elementy techniczne (rzuty, kopnięcia z obciążeniem, starty z oporem) jako aktywacja przed zadaniami

o analogicznym charakterze. Takie dopasowanie CA nie tylko zwiększa efektywność aktywacji, ale także poprawia transfer uzyskanej poprawy na realne działania startowe zawodnika (Ouergui i wsp., 2023).

Mechanizmy leżące u podstaw zjawiska PAPE mają charakter wieloczynnikowy i obejmują zarówno czynniki o podłożu miogenicznym, jak i neurogenicznym. Oprócz wspomnianej fosforylacji łańcuchów miozynowych, istotną rolę odgrywają zmiany związane z efektem rozgrzewki mięśniowej. Wzrost temperatury wewnątrzmięśniowej po intensywnym wysiłku poprawia ekonomię skurczu – ciepło zwiększa szybkość reakcji enzymatycznych i przewodnictwo nerwowe, zwiększa również rozciągliwość mięśni i ścięgien (Sargeant, 1987). Wyższa temperatura i towarzyszący jej wzrost ukrwienia powodują także zmiany w uwodnieniu włókien mięśniowych, co może dodatkowo wpływać na ich sztywność i elastyczność (Steggerda, 1927). Niektórzy autorzy sugerują, że doraźne „napompowanie” (ang. *pump*) mięśni po wysiłku, inaczej - zwiększenie objętości komórek mięśniowych wskutek napływu krwi, skutkuje korzystnym wzrostem sztywności układu mięsień-ścięgno (Wang i wsp., 2015; Edman i Hwang, 1977). Stąd PAPE przyczynia się do efektywniejszego przeniesienia siły na układ kostny, co może poprawić wyniki skoków czy szybkość ruchów balistycznych. Ponadto rozciągnięcie i skrócenie mięśni w trakcie CA może przejściowo zmodyfikować ich architekturę (np. długość pęczków mięśniowych, kąt przebiegu włókien), dostosowując mięsień do generowania siły w korzystniejszym zakresie ruchu – choć bezpośrednie pomiary nie zawsze potwierdzają istotne zmiany architektoniczne bezpośrednio po wysiłku (Bourgeois w wsp., 2022).

Kluczowy wkład w zjawisko PAPE mają również przejściowe adaptacje o charakterze nerwowo-mięśniowym. Intensywna aktywacja mięśniowa w ramach CA prowadzi do zwiększonej pobudliwości układu nerwowego – następuje poprawa rekrutacji jednostek motorycznych, zwłaszcza tych wysokoprogowych (odpowiadających za generowanie największych sił), oraz wzrost częstotliwości wyładowań (ang. *firing rate*) (Heckman i Enoka, 2012; Brown i Loeb, 1998). Innymi słowy, układ nerwowy adaptuje się na krótki okres po wysiłku do zaangażowania większej części potencjału mięśni, co skutkuje wzrostem generowanej siły i mocy w następującym wysiłku. Zwiększeniu może ulec także odruchowa pobudliwość motoneuronów, obserwowana jako wyższa amplituda odruchu H (Enoka i wsp., 1980). Wskazuje to na obniżenie progów pobudzenia i łatwiejszą aktywację dodatkowych włókien podczas kolejnej próby wysiłkowej. W rezultacie tych zmian nerwowo-mięśniowych sportowiec może uzyskać większą siłę lub szybkość skurczu w decydującym momencie

wykonania ruchu, co przekłada się na wyższą wysokość skoku, dłuższy rzut czy szybszy sprint w porównaniu do stanu bez poprzedzającej aktywacji.

Mimo wielu obiecujących wyników, w literaturze podkreśla się potrzebę dalszych badań nad standaryzacją protokołów PAPE i precyzyjnym określeniem warunków, w których zjawisko to przynosi największe korzyści (Prieske i wsp., 2020). Lepsze zrozumienie czynników modulujących PAPE ma nie tylko znaczenie teoretyczne, ale również praktyczne – może przełożyć się na udoskonalenie metod rozgrzewki i treningu, maksymalizując potencjał wysiłkowy sportowców w kluczowych momentach rywalizacji.

3.3. Powiązanie wybranych publikacji

Przedstawione trzy prace naukowe tworzą logicznie powiązany cykl publikacji na potrzebę rozprawy doktorskiej, koncentrujący się na problematyce PAPE i jego roli w treningu zdolności wysiłkowych sportowców. Kolejne badania wynikały bezpośrednio z ustaleń poprzednich, rozwijając poruszone problemy i wypełniając zidentyfikowane luki w literaturze. Metaanaliza (Terbalyan i wsp., 2025a) dostarczyła przekrojowej oceny dotychczasowej wiedzy – potwierdziła istnienie zjawiska PAPE (choć niewielkiego) w sportach walki, wykazano dominację pomiaru skoku dosiężnego z miejsca z zamachem (CMJ, ang. *Counter Movement Jump*) jako miary wydajności oraz ujawniła znaczną niejednorodność protokołów badawczych i zależność wyników od ich specyfiki. Zasygnalizowano także konieczność uporządkowania metodologii i dalszych badań nad czynnikami wpływającymi na zróżnicowanie efektów. Eksperyment 1 (Terbalyan i wsp., 2025b) był bezpośrednią odpowiedzią na te wnioski. Skoncentrowano się na najczęściej stosowanym wskaźniku (wysokośću jednonoż, analogicznym do CMJ u zawodników siatkówki) oraz sprawdzono działanie konkretnego, powtarzalnego protokołu w kontrolowanych warunkach. Uwzględniono aspekt lateralizacji, często pomijany, lecz istotny z praktycznego punktu widzenia oraz zbadano różnice między sportowcami o różnym poziomie wytrenowania. W efekcie pogłębiono rozumienie mechanizmów PAPE – wykazano, że intensywne izometryczne ćwiczenie może wywołać wyraźny efekt ergogeniczny u zawodników o wyższym poziomie zaawansowania sportowego, lecz efekt ten jest specyficzny dla aktywowanej grupy mięśni i nie dochodzi do transferu na kończynę kontralateralną. Potwierdzono, że optymalizacja protokołu powinna uwzględniać poziom sportowy – zgodnie z sugestiami z metaanalizy. Eksperyment 2 (Terbalyan i wsp., 2025c) stanowił kolejny krok mający na celu implikację uzyskanych wyników w warunkach praktycznych. Skoro w warunkach eksperymentalnych PAPE przynosił korzyści, należało sprawdzić, czy wprowadzenie

go do typowej rozgrzewki przedstartowej zapewni przewidywane usprawnienie wykonania. Porównanie z klasyczną rozgrzewką wykazało jednak, że potencjalne zyski z PAPE mogą być trudne do osiągnięcia w standardowym protokole rozgrzewkowym – przynajmniej w postaci zastosowanej w badaniu. Rezultaty te są cennym uzupełnieniem cyklu, gdyż uwidaczniają różnicę między kontrolowanym eksperymentem a warunkami praktyki sportowej – wskazują, iż sama obecność zjawiska PAPE nie gwarantuje natychmiastowej przewagi nad tradycyjnymi metodami przygotowania, o ile protokół nie zostanie odpowiednio dostosowany do kontekstu, w tym dyscypliny, czasu rozgrzewki, indywidualnej reakcji zawodnika. Tym samym drugie badanie waliduje praktyczne implikacje wcześniejszych ustaleń i kieruje uwagę na dalszą optymalizację i personalizację CA.

4. Przedmiot rozprawy

Przedmiotem niniejszej rozprawy doktorskiej realizowanej w formie monotematycznego cyklu publikacji jest PAPE i jego wpływ na wybrane wskaźniki generowania mocy mięśniowej kończyn dolnych u sportowców. W ramach rozprawy podjęto interdyscyplinarne badania łączące wiedzę z zakresu fizjologii wysiłku oraz teorii treningu sportowego, aby lepiej zrozumieć uwarunkowania zjawiska PAPE oraz ocenić jego potencjał praktyczny.

Cykl publikacji obejmuje trzy oryginalne prace badawcze skupiające się na różnych aspektach PAPE:

1. Przegląd systematyczny z metaanalizą (Terbalyan i wsp., 2025a) – synteza dotychczasowych wyników badań dotyczących PAPE w sportach walki, ukierunkowana na ogólne wskaźniki sprawności fizycznej (np. wysokość skoku, siła ciosu) i zróżnicowanie efektów w zależności od dyscypliny oraz poziomu zaawansowania zawodników.
2. Badanie eksperymentalne (Terbalyan i wsp., 2025b) – ocena natychmiastowego wpływu unilateralnego izometrycznego CA na parametry skoku pionowego po zeskoku w głąb jedno nogi (SLDJ, ang. *Single-Leg DropJump*) u siatkarzy, z uwzględnieniem poziomu wytrenowania sportowego oraz analizy efektu kontralateralnego.
3. Badanie eksperymentalne (Terbalyan i wsp., 2025c) – porównanie skuteczności alternatywnej formy rozgrzewki ukierunkowanej na indukcję PAPE z klasyczną rozgrzewką aerobową u zawodników gier zespołowych, ze szczególnym uwzględnieniem takich parametrów, jak wysokość CMJ, asymetria siły kończyn oraz RFD.

Wszystkie trzy prace łączy wspólna idea badawcza: ocena efektywności i ograniczeń zastosowania protokołów PAPE w poprawie zdolności wysiłkowych sportowców. Przedmiot rozprawy obejmuje zarówno perspektywę teoretyczną, jak i praktyczną.

4.1. Problem badawczy

Pomimo rosnącej liczby publikacji poświęconych zjawisku PAPE, w literaturze wciąż istnieją rozbieżności co do wielkości efektu wzmocnienia i czynników warunkujących jego uzyskanie. Aktualne wyniki badań nie są jednoznaczne – podczas gdy w niektórych pracach odnotowano istotną poprawę wyników sportowych po zastosowaniu CA, w innych nie stwierdzono żadnych korzyści lub wskazano na dużą zmienność międzyosobniczą. Rodzi to pytanie o granice i uwarunkowania skuteczności PAPE: w jakich warunkach PAPE

faktycznie się ujawnia, a kiedy pozostaje nieistotny? Kluczowym problemem badawczym jest zatem określenie, czy i w jakim stopniu zastosowanie protokołów PAPE przekłada się na poprawę konkretnych wskaźników generowania mocy, do których należą m.in. wysokość CMJ, RSI, RFD czy poziom asymetrii aktywnej między kończynami. W ramach tego problemu mieszczą się bardziej szczegółowe zagadnienia, takie jak:

- Specyficzność lokalna a efekt przeniesienia – czy korzyści wynikające z PAPE mają charakter wyłącznie lokalny, czy również mogą przenosić się na niewykorzystywane bezpośrednio grupy mięśni? Dotychczasowe obserwacje sugerowały raczej brak istotnego efektu kontralateralnego, jednak zagadnienie to nie było szeroko badane.
- Wpływ specyfiki dyscypliny sportowej – czy wartość PAPE różni się w zależności od rodzaju aktywności fizycznej? Na przykład w sportach o dominującym charakterze interwałowym PAPE może dawać inne rezultaty, niż w dyscyplinach wytrzymałościowych. Brak jest jednak jednoznacznych danych porównawczych między dyscyplinami.
- Rola poziomu zaawansowania i cech osobniczych – czy bardziej wytrenowani zawodnicy czerpią większe korzyści z PAPE, niż amatorzy? Hipotetycznie wydaje się, że tak, ze względu na większy odsetek włókien szybkokurczliwych i lepszą kontrolę motoryczną u zawodników o wyższym poziomie zaawansowania sportowego, lecz wyniki badań są niespójne – niektóre sugerują większą podatność wytrenowanych na PAPE, podczas gdy nie wszystkie prace wykazują istotnych różnic między grupami o różnym poziomie sportowym.
- Optymalizacja CA – jakie rodzaje ćwiczeń i parametry maksymalizują PAPE, a jakie mogą być nieskuteczne lub wręcz szkodliwe? Przykładowo, zbyt intensywne lub zbyt specyficzne bodźce mogą powodować zmęczenie niwelujące potencjalne korzyści. W literaturze brakowało dotąd stanowiska co do „idealnego” protokołu PAPE, zwłaszcza w kontekście rozgrzewki przedstartowej.

Zidentyfikowany problem badawczy ma zatem wymiar zarówno teoretyczny - pogłębienie rozumienia zjawiska PAPE, jak i praktyczny – opracowanie zaleceń dla trenerów co do stosowania lub niestosowania dodatkowych bodźców aktywacyjnych w rozgrzewce.

4.2. Cel badań, pytania oraz hipotezy badawcze

Głównym celem cyklu badań składających się na niniejszą rozprawę było określenie poziomu PAPE w kontekście poprawy wybranych parametrów generowania mocy mięśniowej kończyn dolnych u sportowców, a także identyfikacja czynników warunkujących wystąpienie tego zjawiska. Cel ten zrealizowano poprzez trzy odrębne, komplementarne projekty badawcze odpowiadające na następujące pytania szczegółowe:

- Pytanie badawcze 1: Czy i w jakim zakresie protokoły PAPE poprawiają wybrane wskaźniki ogólnej sprawności fizycznej w sportach walki oraz jakie uwarunkowania determinują wielkość obserwowanego efektu?

- Hipoteza 1: Przyjęto, że zastosowanie protokołów PAPE w sportach walki daje statystycznie istotną poprawę ogólnych parametrów sprawności (np. wysokości skoku, mocy ciosu) w porównaniu do standardowej rozgrzewki. Oczekiwano jednak dużej zmienności wyników w zależności od rodzaju dyscypliny (przy czym dyscypliny łączące elementy szybkościowo-siłowe miałyby większy PAPE). Zakładano ponadto, że poziom zaawansowania sportowego zawodników będzie różnicował efekt, to oznacza, że sportowcy o wyższym poziomie mogą odnosić większe korzyści, o ile protokół zostanie odpowiednio dostosowany.

- Pytanie badawcze 2: Czy jednorazowe zastosowanie unilateralnego izometrycznego CA wywoła PAPE dotyczące wysokości SLDJ lub innych parametrów (RSI, CT – czas kontaktu z podłożem, *ang. contact time*) u zawodników piłki siatkowej, oraz czy wielkość obserwowanego efektu zależy od kończyny poddanej aktywacji i podlega transferowi na kończynę kontralateralną?

- Hipoteza 2: Zakładano, że izometryczne CA spowoduje istotną poprawę parametrów skoku dla kończyny poddanej aktywacji w porównaniu do stanu bez bodźca, przy czym efekt ten będzie lokalny, to jest nie wystąpi znacząca poprawa (a potencjalnie nawet pogorszenie) w kończynie dolnej nieobjętej ćwiczeniem. spodziewano się uzyskać w przypadku zawodników będących na wyższym poziomie zaawansowania sportowego.

- Pytanie badawcze 3: Czy zastosowanie unilateralnej izometrycznej rozgrzewki opartej o PAPE zapewnia wyższy poziom poprawy zdolności plyometrycznych u zawodników sportów zespołowych, niż tradycyjna rozgrzewka aerobowa?

- Hipoteza 3: Przewidywano, że wprowadzenie do protokołu rozgrzewki ćwiczeń izometrycznych o wysokiej intensywności spowoduje większą poprawę wysokości CMJ, korzystne zmiany w aktywnej asymetrii (zmniejszenie dysproporcji między kończynami) oraz większy wzrost RFD w porównaniu z klasyczną rozgrzewką opartą jedynie na biegu o niskiej intensywności.

4.3. Osiągnięcia naukowe

W wyniku przeprowadzonych badań sformułowano szereg nowych ustaleń poszerzających wiedzę na temat zjawiska PAPE w kontekście sportowym. Do najważniejszych osiągnięć naukowych rozprawy należą:

1. Pierwsza demonstracja lokalnego PAPE w warunkach unilateralnych u sportowców o różnym poziomie zaawansowania (Terbalyan i wsp., 2025b). Wykazano, że unilateralne izometryczne CA jest skuteczne w osiągnięciu istotnej poprawy parametrów SLDJ wyłącznie w kończynie aktywowanej, przy braku pozytywnego efektu na kończynę kontralateralną. PAPE okazał się wyraźnie większy u zawodników o wyższym poziomie zaawansowania sportowego w porównaniu z amatorami. Wyniki te stanowią wkład w istniejącą literaturę, potwierdzając specyficzność lokalną zjawiska PAPE oraz sugerują, że poziom wytrenowania moduluje wielkość efektu (przynajmniej w zadaniach plyometrycznych).
2. Pierwsza metaanaliza dotycząca PAPE w sportach walki (Terbalyan i wsp., 2025a). Przeprowadzony przegląd systematyczny i metaanaliza 19 badań dostarczyły szczegółowego obrazu skuteczności protokołów PAPE w dyscyplinach, takich jak karate, taekwondo, boks, judo, muay thai i inne. Ustalono, że ogólnie PAPE w sportach walki jest statystycznie istotny, ale niewielki ($ES \sim 0,13$; ang. *Effect Size* - wielkość efektu). Ponadto ujawniono istotne zróżnicowanie wyników: od znacznych korzyści w niektórych konfiguracjach (np. skoki po dynamicznych kopnięciach specyficznych dla taekwondo), po efekty negatywne w innych (przeciążenie specyficznymi bodźcami

w muay thai). Analiza wykazała również, że dyscyplina sportu oraz charakterystyka zastosowanego protokołu mają kluczowy wpływ na rezultat – protokoły łączące elementy siły i mocy wydają się dawać najlepsze efekty, podczas gdy nadmierna specyficzność ruchowa może prowadzić do zmęczenia i pogorszenia wyników. Poziom zaawansowania sportowego nie różnicował istotnie efektu w skali ogólnej, co sugeruje, że właściwie zaprojektowane protokoły mające na celu wywołać PAPE mogą być skuteczne zarówno u zawodników o wysokim poziomie zaawansowania sportowego, jak i amatorów. Wyniki te stanowią cenną syntezę dotychczas rozproszonych badań i dostarczają praktycznych wskazówek dla trenerów w sportach walki co do doboru optymalnych metod wzmocnienia.

3. Nowe dowody w zakresie zastosowania PAPE w rozgrzewce w sportach zespołowych (Terbalyan i wsp., 2025c). Przeprowadzone badanie eksperymentalne jako jedno z pierwszych bezpośrednio porównało rozgrzewkę PAPE (opartą na maksymalnych skurczach izometrycznych) z klasyczną rozgrzewką aerobową u licznej grupy sportowców zespołowych obojga płci. Uzyskane rezultaty wykazały brak przewagi protokołu PAPE – żaden z ocenianych parametrów (wysokość CMJ, asymetrie siłowe, RFD) nie uległ poprawie w większym stopniu po rozgrzewce izometrycznej, niż po zwykłym biegu. Wynik ten podważa powszechne założenie, że dodatkowy bodziec w postaci izometrycznych ćwiczeń siłowych automatycznie przełoży się na lepsze przygotowanie do wysiłku eksplozywnego. Jednocześnie eksperyment ten uwidoczniał potrzebę dalszej optymalizacji protokołów – sugeruje się, że intensywność i objętość zastosowanych skurczów izometrycznych mogły być niewystarczające, by wywołać mierzalny PAPE w założonym czasie. Te rezultaty mają istotne znaczenie praktyczne: wskazuje trenerom, iż w przypadku sportów zespołowych standardowa rozgrzewka (obejmująca elementy biegu i dynamicznej mobilizacji) nie może być zastąpiona dodatkowymi ćwiczeniami siłowymi tuż przed meczem – a przynajmniej nie według zaproponowanego schematu – ponieważ może to nie przynieść oczekiwanej efektu w postaci poprawy wyników.

5. Materiał i metody badawcze

W niniejszym monotematycznym cyklu badawczym wykorzystano trzy odrębne podejścia metodologiczne, które miały na celu wielostronną ocenę skuteczności oraz specyfiki działania zjawiska PAPE na różne grupy sportowców oraz różne rodzaje testów sprawności fizycznej. Pierwszym krokiem było przeprowadzenie systematycznego przeglądu literatury oraz metaanalizy, których zadaniem była ilościowa ocena efektywności dotychczas stosowanych protokołów PAPE w sportach walki. Kolejne dwa badania miały charakter eksperymentalny i koncentrowały się na bezpośredniej ocenie efektów CA na sprawność fizyczną sportowców z dyscyplin zespołowych.

Badania 2 i 3 (Terbalyan 2025b, 2025c) zostały przeprowadzone za zgodą Komisji Bioetycznej Akademii Wychowania Fizycznego im. Jerzego Kukuczki w Katowicach (opinia nr 3/2021) i w pełnym poszanowaniu zasad Deklaracji Helsińskiej. Każdy uczestnik przed przystąpieniem do eksperymentu wyraził pisemną, świadomą zgodę na udział w badaniu oraz został poinformowany o możliwości wycofania się z udziału w dowolnym momencie, bez konieczności podawania przyczyny. Badanie 1 (Terbalyan i wsp. 2025a) nie wymagało uzyskania zgody komisji bioetycznej ze względu na charakter przeglądowy.

5.1. Badanie 1

Pierwsze badanie (Terbalyan i wsp., 2025a) miało formę systematycznego przeglądu literatury i metaanalizy dotyczącej zjawiska PAPE u sportowców uprawiających sporty walki. Celem badania była ilościowa ocena wpływu protokołów PAPE na ogólne wskaźniki sprawności fizycznej w sportach walki oraz analiza, jak efekty PAPE zależą od dyscypliny sportowej oraz poziomu zaawansowania zawodników.

Niniejsze badanie przeprowadzono zgodnie z wytycznymi PRISMA dotyczącymi systematycznych przeglądów literatury (Moher i wsp., 2009). W celu identyfikacji odpowiednich badań dokonano przeszukiwania baz PubMed/Medline, SPORTDiscus, Web of Science, Scopus, EBSCO oraz Google Scholar. Procedura obejmowała publikacje dostępne w okresie od stycznia 2010 r. do maja 2023 r. Do wyszukiwania zastosowano zestaw słów kluczowych obejmujący zarówno nazwy dyscyplin, jak i terminy związane z omawianym zjawiskiem: *'combat sport*' OR 'martial art*' OR 'MMA' OR 'kickbox*' OR 'box*' OR 'wrestl*' OR 'judo' OR 'taekwondo' OR 'karate' OR 'muay thai' OR 'grappl*' OR 'jiu-jitsu'*, łączone z terminami *'post-warm-up' OR 'pre-activity' OR 'post-activation potentiation'*

OR 'post-activation performance enhancement'. Symbol '*' stosowano jako znak ucięcia, co pozwoliło na uwzględnienie różnych form fleksyjnych (np. *kickboxer* kontra *kickboxing*).

Zasadniczym wymogiem było zastosowanie jasno zdefiniowanych protokołów PAP lub PAPE, porównywanych z odpowiednimi warunkami kontrolnymi (np. odpoczynek, ustandaryzowana rozgrzewka, alternatywna interwencja) oraz raportowanie zmian w parametrach sprawności fizycznej. Kryteria włączenia i wyłączenia opracowano w oparciu o ramy metodologiczne PICOS, zgodnie z wytycznymi PRISMA. Do populacji (P) kwalifikowano zdrowych zawodników sportów walki, do interwencji (I) – badania wykorzystujące jasno określone protokoły PAPE ze wskazaniem parametrów takich jak procent obciążenia w stosunku do 1RM, objętość (serie/powtórzenia), czasy przerw wewnątrz- i między seriami oraz typ ćwiczenia. Jako porównania (C) przyjmowano warunki kontrolne, standardowe rozgrzewki lub alternatywne metody aktywacji, a także zestawienia różnych protokołów PAPE. Wyniki (O) obejmowały natychmiastowe zmiany w ogólnych wskaźnikach sprawności – m.in. wysokość CMJ, siłę izokinetyczną, wyniki sprintu, moce czy testy zwinności, z podaniem średnich, odchyłeń standardowych lub wielkości efektu. Protokół badania (S) musiał mieć charakter eksperymentalny (randomizowane kontrolowane badanie, projekt crossover lub quasi-eksperyment), z precyzyjnie opisanym protokołem interwencyjnym i metodyką pomiarów. Kryteria wyłączenia obejmowały prace przeglądowe, niepublikowane streszczenia, prace dyplomowe i rozprawy doktorskie oraz wystąpienia konferencyjne, a także badania bez pełnego dostępu do tekstu lub opublikowane w innych językach niż angielski. Wykluczono również te badania, w których uczestnicy mieli aktualne urazy dolnej kończyny lub inne schorzenia wpływające na funkcjonowanie nerwowo-mięśniowe, a także prace pozbawione jednoznacznych protokołów PAPE bądź grup kontrolnych umożliwiających porównanie efektu. Ponadto odrzucono badania niezgodne z eksperymentalnym charakterem kryteriów (np. badania obserwacyjne bez interwencji) oraz te, które nie prezentowały stosownych danych statystycznych dotyczących zmian w miarach sprawności.

Analizę statystyczną przeprowadzono w oparciu o metaanalizę średnich, odchyłeń standardowych oraz wielkości efektu, wyliczanych z zastosowaniem korekty Hedgesa g zgodnie z opisem Hedgesa i Olkina [23]. Z uwagi na fakt, że część analizowanych badań obejmowała niewielkie próby, użycie tej formuły pozwalało ograniczyć potencjalne zniekształcenia w estymacji wielkości efektu.

Zmienność pomiędzy badaniami oceniano przy użyciu wykresów typu leśnego oraz statystyki I^2 , określającej procent zmienności wyników pomiędzy badaniami wynikającej z heterogeniczności, a nie z przypadku. Wartość $I^2 = 0\%$ wskazuje na brak heterogeniczności,

jednocześnie wartości powyżej 50% interpretowane są jako znaczna heterogeniczność. Do analizy przyjęto model efektów losowych, co stanowi podejście bardziej konserwatywne, a wybór ten był dodatkowo uzasadniony występowaniem w niektórych przypadkach wartości I^2 przekraczających 50%.

Obliczenia statystyczne przeprowadzono w programie PQStat Software (wersja 1.8.2.208, PQStat, Poznań, Polska), natomiast wizualizację danych wykonano przy użyciu oprogramowania PRISM 10 (wersja 10.1.1, GraphPad, San Diego, CA, USA). Ze względu na ograniczoną liczbę badań zakwalifikowanych do analizy, nie stosowano wykresów lejkowych ani formalnych testów statystycznych do oceny ryzyka stroniczości, ponieważ przy niewielkiej liczbie badań interpretacja tego typu analiz może być myląca.

Uzupełniając, w celu porównania wielkości efektu pomiędzy różnymi podgrupami – takimi jak dyscypliny sportów walki czy poziom sportowy zawodników – zastosowano jednoczynnikową analizę wariancji (ANOVA, ang. *ANalysis Of VAriance*). Poziom istotności statystycznej ustalono na $p < 0,05$.

5.2. Badanie 2

Drugie badanie (Terbalyan i wsp., 2025b) było badaniem eksperymentalnym z randomizacją, zaprojektowanym w układzie podwójnie ślepej próby typu crossover. Sprawdzano w nim natychmiastowy efekt izometrycznego unilateralnego CA na parametry SLDJ u siatkarzy, z rozróżnieniem wpływu na kończynę zaangażowaną oraz niezaangażowaną w wysiłek. Celem badania była ocena, czy izometryczne CA polegające na rozwijaniu maksymalnej siły przeciwko nieruchomemu oporowi (ang. *overcoming*) wykonywane jedną kończyną zwiększa wysokość SLDJ, a także czy występuje efekt przeniesienia na kończynę kontralateralną. Dodatkowo analizowano, czy odpowiedź PAPE różni się w zależności od poziomu wytrenowania – porównano zawodników elitarnego poziomu i amatorów.

Zrekrutowano 20 zdrowych siatkarzy płci męskiej – 10 zawodników poziomu elitarnego (ELI) oraz 10 zawodników amatorskich (AMA). Grupa ELI charakteryzowała się średnim wiekiem ok. 28 ± 7 lat, wzrostem 198 ± 10 cm, masą ciała 92 ± 9 kg oraz wysokim poziomem siły względnej (1RM w przysiadzie ze sztangą wynosi $1,63 \pm 0,15$ kg·kg⁻¹ mc). Średnie doświadczenie treningowe wynosiło 15 ± 7 lat. Z kolei grupa AMA miała średnio 19 ± 1 lat, 189 ± 5 cm wzrostu i $87,7 \pm 6,8$ kg masy; ich względny 1RM w przysiadzie to $1,49 \pm 0,21$ kg·kg⁻¹ mc, a staż treningowy 6 ± 2 lata. Badania przeprowadzono w okresie przygotowawczym, między sesjami zachowano 48–72 h przerwy.

Do badania włączono sportowców spełniających następujące kryteria: brak poważnych urazów kończyny dolnej, regularny udział w treningach siłowych oraz stałe starty w zawodach siatkarskich, a także utrzymanie dotychczasowych nawyków związanych ze snem i dietą oraz powstrzymanie się od stosowania stymulantów przez cały okres trwania badania. Dodatkowo do grupy ELI kwalifikowano osoby startujące w najwyższej polskiej lidze siatkówki przez co najmniej dwa kolejne sezony, natomiast do grupy AMA – zawodników rywalizujących wyłącznie w kategoriach juniorskich poza najwyższą klasą rozgrywkową. Z badania wyłączono uczestników, którzy w ciągu ostatnich 12 miesięcy doznali poważnego urazu mięśni, ścięgien lub innych struktur kończyny dolnej, nieregularnie wykonywali trening siły mięśniowej lub rezygnowali z udziału w zawodach, nie spełniali kryteriów przynależności do danej grupy sportowej oraz nie przestrzegali zaleceń dotyczących higieny snu, nawyków żywieniowych lub stosowali środki pobudzające w trakcie trwania eksperymentu.

Zawodnicy wykonali dwie sesje eksperymentalne w układzie naprzemiennym. Każda sesja obejmowała ten sam protokół z wyjątkiem strony dominacji: w jednej sesji ćwiczenie izometryczne wykonywano kończyną dominującą, a w drugiej kończyną niedominującą (kolejność zrandomizowana). Za dominującą uznano kończynę wskazaną przez zawodnika jako preferowaną przy kopnięciu piłki. CA stanowił izometryczny przysiad wykroczny (ang. *split squat*; Rycina 2) – zawodnik ustawiony w danej pozycji napierał maksymalnie przez 3 sekundy na nieruchomo zablokowaną sztangę ustawioną na wysokości odpowiadającej kątowi $\sim 90^\circ$ w stawie kolanowym. Wykonywano 3 serie takiego izometrycznego wysiłku, oddzielone przerwami 3-minutowymi.



Rycina 2. Ćwiczenie aktywacyjne

Bezpośrednio przed każdą sesją przeprowadzono standardową rozgrzewkę (5 minut jazdy na cykloergometrze + dynamiczne rozciąganie). Pomiar mocy mięśniowej obejmował SLDJ. Każdy zawodnik wykonywał próby SLDJ zarówno prawą, jak i lewą kończyną: dwie próby na kończynę na 5 minut przed wykonaniem ćwiczenia izometrycznego (pomiar wyjściowy) oraz dwie próby na każdą kończynę w 4 i 8 minucie po zakończeniu CA. Wysokość skrzyni dostosowano do poziomu sportowego dla zachowania specyficzności testu – zawodnicy elitarni skakali z 40 cm, a amatorzy z 20 cm.

Wszystkie skoki rejestrowano na dwupłytywnej platformie dynamometrycznej (ForceDecks, Vald), co umożliwiało dokładny pomiar wysokości skoku, CT oraz RSI. Każdorazowo badanych motywowano do maksymalnie szybkiego odbicia i najwyższego skoku, utrzymując ręce na biodrach. Jako wynik dla danej próby przyjmowano najlepszy osiągnięty skok (maksymalna wysokość) spośród prób po danym CA. W celu kontroli warunków wszyscy zawodnicy wykonywali skok w ustandaryzowanym obuwiu sportowym (płaska podeszwa do 3 cm grubości, bez systemów amortyzujących) i o stałej porze dnia.

Analiza statystyczna objęła weryfikację rozkładu za pomocą testu Shapiro–Wilka oraz porównanie wyjściowych cech fizycznych grup z użyciem testu t studenta dla prób niezależnych. Do oceny efektów zastosowano trójczynnikową analizę wariancji z mieszanym układem: 2 grupy (ELI vs AMA; czynnik międzygrupowy) $\times$ 2 warunki (ćwiczenie kończyną dominującą a niedominującą; czynnik wewnątrzgrupowy) $\times$ 2 punkty czasowe (przed a po CA; czynnik wewnątrzgrupowy). Ponieważ po wysiłku brano pod uwagę najlepszy wynik, w analizie czasu uwzględniono dla każdej sesji wartość PRE oraz najlepszą wartość POST. W przypadku istotnych efektów głównych lub interakcji wykonywano testy post-hoc Tukeya dla porównań parami. Do oceny istotności przyjęto $\alpha = 0,05$. Wielkość zmian efektu oceniano za pomocą Hedges' g (dla różnic pre-post między warunkami) z interpretacją: $g > 0,2$ – mały; $> 0,5$ – umiarkowany; $> 0,8$ – duży efekt oraz eta-kwadrat cząstkowa η^2_p (dla efektów głównych i interakcji) z interpretacją mały: $\eta^2_p > 0,01$; średni: $\eta^2_p > 0,06$ duży: $\eta^2_p > 0,14$.

5.3. Badanie 3

Trzecie badanie (Terbalyan i wsp., 2025c) stanowiło eksperyment porównawczy dwóch modeli rozgrzewki, przeprowadzony w układzie randomizowanych grup równoległych. Jego celem było określenie, czy zastosowanie izometrycznej rozgrzewki ukierunkowanej na PAPE daje lepsze natychmiastowe rezultaty w CMJ niż tradycyjna rozgrzewka biegowa u zawodników sportów zespołowych.

Do udziału zrekrutowano 53 zawodników gier zespołowych (kobiet i mężczyzn) uprawiających koszykówkę, siatkówkę, piłkę ręczną lub nożną. Łącznie badano 32 mężczyzn i 21 kobiet, średnio w wieku ok. $22,3 \pm 1,9$ roku, o masie ciała $75,0 \pm 13,1$ kg i wzroście $176,9 \pm 9,0$ cm. Uczestników losowo przydzielono do jednej z dwóch grup: eksperymentalnej (PAPE; EXP) – rozgrzewka izometryczna ($n = 31$) lub kontrolnej (bieżnia; CON) – rozgrzewka biegowa ($n = 22$).

Do badania włączono wyłącznie uczestników bez aktualnych urazów lub schorzeń kończyn dolnych, którzy nosili standardowe obuwie treningowe o płaskiej podeszwie i maksymalnej wysokości 3 cm (bez systemów amortyzacji powietrznej lub sprężynowej), przestrzegali ustalonych wytycznych dotyczących nawodnienia i żywienia w ciągu 24 godzin poprzedzających test oraz przystępowali. Z badania wykluczono osoby z aktualnymi kontuzjami lub dolegliwościami kończyny dolnej, korzystające z obuwia niezgodnego z powyższymi wymaganiami, niestosujące się do zaleceń dotyczących płynów i diety 24 godziny przed testem.

Grupa EXP realizowała protokół izometryczny angażujący unilateralnie mięśnie kończyn dolnych. Składał się on z czterech ćwiczeń izometrycznych wykonywanych kolejno na każdą kończynę: (a) izometryczne pchanie kończyną wykroczną nieruchomej sztangi w pozycji wykroczo-zakroczej, (b) izometryczne wypychanie bioder w górę w pozycji mostu biodrowego, (3) izometryczne przyciąganie pięty do pośladka stojąc, oraz (4) izometryczne wspięcie na palce przeciw zablokowanej sztandze (Rycina 3).



Rycina 3. Ćwiczenia aktywacyjne, A-D

Ćwiczenia te wykonywano na wcześniej przygotowanym stanowisku (klatka treningowa z unieruchomioną sztangą na odpowiedniej wysokości) przy maksymalnym wysiłku w fazie nacisku/ciągnięcia. Każde z ćwiczeń obejmowało 2 powtórzenia na każdą kończynę dolną, każde trwające 5 s, z przerwą 10 s między powtórzeniami i 1 min przerwy między seriami danego ćwiczenia. Cały protokół (4 ćwiczenia $\times$ 2 serie) wykonano dwukrotnie – osobno dla lewej i prawej kończyny. Bezpośrednio po zakończeniu tej rozgrzewki

izometrycznej uczestnicy odpoczywali przez 5 minut, co miało zapobiec ewentualnym efektom zmęczenia i umożliwić pełne ujawnienie się zjawiska PAPE. Grupa kontrolna odbywała klasyczną rozgrzewkę w formie biegu na bieżni mechanicznej: 5 minut truchtu o umiarkowanej intensywności. Intensywność dostosowano indywidualnie na podstawie tętna – zadano zakres tętna odpowiadający wysiłkowi umiarkowanemu, który uczestnicy utrzymywali przez całe trwanie 5- minutowego biegu. Po zakończeniu 5 minut biegu uczestnicy również mieli krótki odpoczynek (~1–2 min) tak, by procedura testu CMJ rozpoczynała się w zbliżonym czasie od zakończenia rozgrzewki jak w grupie EXP.

Po interwencjach wszyscy badani wykonywali test CMJ. Zastosowano CMJ. Do pomiaru użyto tej samej platformy dynamometrycznej ForceDecks, co w badaniu 2, celem rejestracji parametrów skoku. Każdy uczestnik wykonał 3 próby CMJ, a do analizy przyjęto najwyższy uzyskany skok (maksymalna wysokość). Platforma dostarczyła również dodatkowych danych, m.in. średniej siły koncentrycznej generowanej przez każdą z kończyn dolnych w fazie odbicia oraz sił lądowania – na tej podstawie obliczono wskaźniki asymetrii siły między kończynami (zarówno asymetrię siły koncentrycznej przy wybiciu, jak i asymetrię siły reakcji podłoża przy lądowaniu). Dodatkowo wyznaczono RFD w fazie koncentrycznej skoku.

Dla zmiennych przeprowadzono mieszaną analizę wariancji $2 \times 2 \times 2$. Czynniki obejmowały: czynnik wewnątrzgrupowy – czas: pomiar przed i po rozgrzewce, oraz czynniki międzygrupowe: rodzaj rozgrzewki (izometryczna vs biegowa) oraz płeć (M vs K). Takie ujęcie pozwoliło sprawdzić zarówno ogólny efekt rozgrzewki (czy nastąpiła poprawa po vs przed), jak i interakcję czy ewentualne różnice między grupami (czy zmiany różniły się między protokołami PAPE a kontrolnym) oraz czy różnice zależały od płci. Za istotne uznano wartości $p < 0,05$.

6. Wyniki

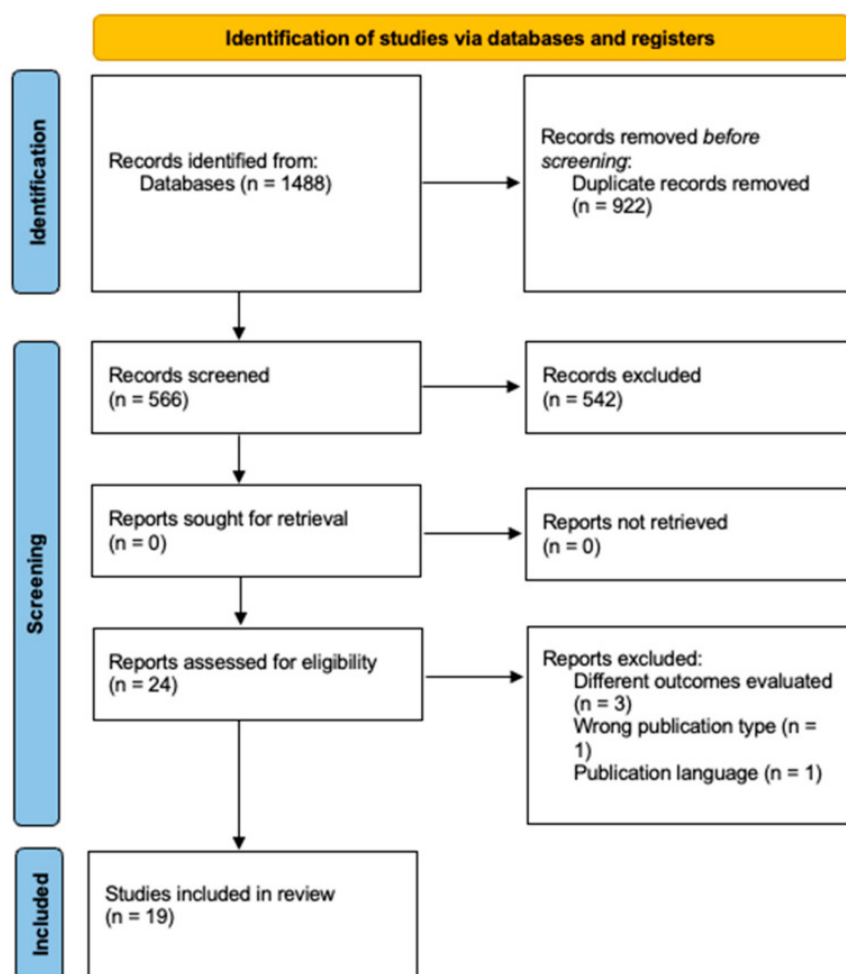
6.1. Badanie 1

Schemat procesu selekcji publikacji przedstawiono na Rycinie 1. Ostatecznie do przeglądu zakwalifikowano 19 artykułów dotyczących zjawiska PAPE w sportach walki. Największą reprezentację stanowiły badania nad taekwondo ($n = 8$), natomiast pojedyncze prace dotyczyły zapasów ($n = 1$), judo ($n = 1$), mieszanych sztuk walki (MMA; $n = 1$), karate ($n = 1$), kickboxingu ($n = 1$), Muay Thai ($n = 1$) oraz taolu wushu ($n = 1$). Dwa badania obejmowały grupy zawodników reprezentujących różne dyscypliny ($n = 2$), a dwa inne dotyczyły boksu ($n = 2$).

Pod względem charakterystyki próby uczestników, kobiety uwzględniono jedynie w dwóch badaniach, mężczyzn w dwunastu, natomiast pięć badań obejmowało grupy mieszane. Liczebność prób wahała się od 8 do 48 zawodników, a łączna liczba uczestników we wszystkich badaniach wyniosła 286. Przeważającą część stanowili zawodnicy amatorscy ($n = 13$ badań), podczas gdy cztery badania obejmowały sportowców na poziomie elitarnym, a dwa – grupy mieszane pod względem wytrenowania sportowego. Większość analizowanych prac koncentrowała się na zawodnikach w wieku 16–25 lat, choć niektóre obejmowały szersze przedziały wiekowe, sięgające do 29 lat.

Zakres stosowanych miar obejmował różnorodne wskaźniki sprawności ogólnej. Najczęściej ocenianym parametrem był CMJ ($n = 12$ badań). W pozostałych pracach stosowano między innymi wyniki testu siły izokinetycznej, testu wytrzymałości beztlenowej i mocy RAST (ang. *Running Anaerobic Sprint Test*), testu mocy bioder, rzutu sztangą leżąc na ławce poziomej (ang. *bench press throw*) oraz testu siły w postaci wyciskania hantli.

Pod względem metodologicznym dominowały randomizowane badania kontrolne ($n = 12$), uzupełnione przez badania w schemacie naprzemiennym ($n = 5$) oraz quasi-eksperymentalne ($n = 2$). Wszystkie włączone prace obejmowały porównanie wyników przed i po interwencji, umożliwiając ocenę efektu PAPE. Wykorzystywane CA były zróżnicowane i obejmowały między innymi skoki z obciążeniem, trening oporowy z dużym ciężarem (np. przysiady ze sztangą, różne rodzaje wyciskania sztangi), ćwiczenia plyometryczne (np. skoki powtarzalne, skoki w dal), balistyczne uginanie i prostowanie ramion w podporze przodem, ćwiczenia izokinetyczne, uderzenia z oporem elastycznym, a także protokoły specyficzne dla danej dyscypliny, takie jak kopnięcia okrężne czy techniki uzupełnione stymulacją całego ciała za pomocą platformy wibracyjnej.



Rycina 1. Schemat wyszukiwania i włączenia badań PRISMA

Średni wynik jakości metodologicznej ocenionej za pomocą skali PEDro dla wszystkich 19 włączonych badań wyniósł 7,8 punktu. Wśród analizowanych prac trzy (16%) zaklasyfikowano jako badania o jakości doskonałej, trzynaście (68%) jako dobre, natomiast dwa (11%) jako umiarkowane. Żadne z badań nie zostało ocenione jako słabe (0%).

Do metaanalizy włączono 9 badań, z których wyodrębniono 62 CA (866 uczestników). Analizę przeprowadzono wyłącznie dla wysokości CMJ, ponieważ była to jedyna zmienna, dla której odnotowano istotnie wysoką liczebność danych umożliwiającą wiarygodne wniosków.

W metaanalizie (Terbalyan i wsp., 2025a) zaobserwowano statystycznie istotny, aczkolwiek niewielki uśredniony efekt protokołów PAPE na CMJ zawodników sportów walki. Interwencje wybrane do metaanalizy znajdują się w tabeli 1. Średnia siła efektu Hedgesa g wyniosła 0,136 (95% CI: 0,008–0,263) na korzyść pomiarów po zastosowaniu protokołu PAPE względem warunków kontrolnych (Tabela 2).

Tabela 1. Zbiorcza reprezentacja interwencji włączonych do metaanalizy

Autorzy	#	Ćwiczenie aktywacyjne/dyscyplina-poziom zaawansowania
Yi i wsp., 2022	CA1	Loaded squat jumps 4x8x30%1RM, 3-min rest, 90-sec, intraset rest /B-A
	CA2	Loaded squat jumps 4x8x30%1RM, 6-min rest, 90-sec, intraset rest /B-A
	CA3	Loaded squat jumps 4x8x30%1RM, 9-min rest, 90-sec, intraset rest /B-A
	CA4	Loaded squat jumps 4x8x30%1RM, 12-min rest, 90-sec, intraset rest /B-A
	CA5	Squat 3x5x80%1RM, 3-min rest, 90-sec, intraset rest /B-A
	CA6	Squat 3x5x80%1RM, 6-min rest, 90-sec, intraset rest /B-A
	CA7	Squat 3x5x80%1RM, 9-min rest, 90-sec, intraset rest /B-A
	CA8	Squat 3x5x80%1RM, 12-min rest, 90-sec, intraset rest /B-A
Ouergui i wsp., 2022	CA9	Bandal chagui, 3x5sec, 10-min rest, 30-sec intraset rest /T-A
	CA10	Bandal chagui, 3x5sec, 10-min rest, 35-sec intraset rest /T-A
	CA11	Bandal chagui, 3x5sec, 10-min rest, self-selected intraset rest /T-A
	CA12	Consecutive vertical jump, 3x5sec, 10-min rest, 30-sec intraset rest /T-A
	CA13	Consecutive vertical jump, 3x5sec, 10-min rest, 35-sec intraset rest /T-A
	CA14	Consecutive vertical jump, 3x5sec, 10-min rest, self-selected interrest /T-A
Margaritopoulos, i wsp., 2015	CA15	Tuck jumps, 3x5, 5-min rest, intraset rest 30 sek (a) /K-A
	CA16	Tuck jumps, 3x5, 5-min rest, intraset rest 30 sek (b) /K-A
	CA17	Tuck jumps, 3x5, 5-min rest, intraset rest 30 sek (c) /K-A
	CA18	Control, 5-min rest, (a) /K-A
	CA19	Control, 5-min rest, (b) /K-A
	CA20	Control, 5-min rest, (c) /K-A
Da Silva Santos, i wsp., 2015	CA21	Half squat, 3x1x95%1RM, 5-min rest, 3-min interset rest /T-E
	CA22	Half squat, 3x1x95%1RM, 10-min rest, 3-min interset rest /T-E
	CA23	Half squat, 3x1x95%1RM, self-selected rest, 3-min interset rest /T-E
	CA24	Jumps, 3x10, 5-min rest, 30-sec interset rest /T-E
	CA25	Jumps, 3x10, 10-min rest, 30-sec interset rest /T-E
	CA26	Jumps, 3x10, self-selected rest, 30-sec interset rest /T-E
	CA27	Half squat + Jumps, 3x2x95%1RM + 4, 5-min rest, 3-min interset rest /T-E
	CA28	Half squat + Jumps, 3x2x95%1RM + 4, 10-min rest, 3-min interset rest /T-E
	CA29	Half squat + Jumps, 3x2x95%1RM + 4, self-selected rest, 3-min interset rest /T-E
Da Silva Santos, i wsp., 2016	CA30	Half Squat, 1x3x50%1RM, 10-min rest /T-E
	CA31	Half Squat, 1x3x90%1RM, 10-min rest /T-E
	CA32	Half Squat, 3x3x50%1RM, 10-min rest /T-E
	CA33	Half Squat, 3x3x90%1RM, 10-min rest /T-E
Cimadoro, i wsp., 2018	CA34	Roundhouse kicks, 20x1, 0-min rest, 1-sec interset rest /M-A
	CA35	Roundhouse kicks, 20x1, 5-min rest, 1-sec interset rest /M-A
	CA36	Roundhouse kicks, 20x1, 10-min rest, 1-sec interset rest /M-A
	CA37	Roundhouse kicks, 20x1, 20-min rest, 1-sec interset rest /M-A
	CA38	Roundhouse kicks, 20x1, 30-min rest, 1-sec interset rest /M-A
	CA39	Roundhouse kicks, 20x1, 0-min rest, 3-sec interset rest /M-A
	CA40	Roundhouse kicks, 20x1, 5-min rest, 3-sec interset rest /M-A
	CA41	Roundhouse kicks, 20x1, 10-min rest, 3-sec interset rest /M-A
	CA42	Roundhouse kicks, 20x1, 20-min rest, 3-sec interset rest /M-A
	CA43	Roundhouse kicks, 20x1, 30-min rest, 3-sec interset rest /M-A

Oliviera, i wsp., 2018	CA44	Whole body vibration 1x1min x26 Hz /T-A
Ouergui i wsp., 2023	CA45	Bandal chagui, 3x5sec, 3-min rest, 30-sec intraset rest /T-A
	CA46	Bandal chagui, 3x5sec, 3-min rest, 45-sec intraset rest /T-A
	CA47	Bandal chagui, 3x5sec, 3-min rest, self-selected intraset rest /T-A
	CA48	Consecutive vertical jump, 3x5sec, 3-min rest, 30-sec intraset rest /T-A
	CA49	Consecutive vertical jump, 3x5sec, 3-min rest, 45-sec intraset rest /T-A
	CA50	Consecutive vertical jump, 3x5sec, 3-min rest, self-selected intersetrest /T-A
	CA51	Bandal chagui, 3x5sec, 7-min rest, 30-sec intraset rest /T-A
	CA52	Bandal chagui, 3x5sec, 7-min rest, 45-sec intraset rest /T-A
	CA53	Bandal chagui, 3x5sec, 7-min rest, self-selected intraset rest /T-A
	CA54	Consecutive vertical jump, 3x5sec, 7-min rest, 30-sec intraset rest /T-A
	CA55	Consecutive vertical jump, 3x5sec, 7-min rest, 45-sec intraset rest /T-A
	CA56	Consecutive vertical jump, 3x5sec, 7-min rest, self-selected intersetrest /T-A
Boyaci, i wsp., 2023	CA57	Squat, 3x12x75%1RM, 30-sec rest. 180-sec interset /T-E
	CA58	Squat, 3x12x75%1RM, 4-min rest. 180-sec interset /T-E
	CA59	Squat, 3x12x75%1RM, 8-min rest. 180-sec interset /T-E
	CA60	Squat, 3x(4+4+4)x75%1RM, 30-sec rest. 180-sec interset /T-E
	CA61	Squat, 3x(4+4+4)x75%1RM, 4-min rest. 180-sec interset /T-E
	CA62	Squat, 3x(4+4+4)x75%1RM, 8-min rest. 180-sec interset /T-E

CA – ćwiczenie aktywacyjne; A – poziom amatorski; E – poziom elitarny; B – boks; K – karate; M – muay thai; T – taekwondo.

Tabela 2. Wyniki metaanalizy bez podziału na podgrupy

Interwencja	Liczność	g	SE	±95%CI	Z-statystyka	p	Wariancja	Waga
CA1	10	-0.2	0.45	-1.08; 0.68	-0.44	0.66	0.20	3.28
CA2	10	0	0.45	-0.88; 0.88	0.00	1.00	0.20	3.28
CA3	10	0.03	0.45	-0.85; 0.91	0.07	0.95	0.20	3.28
CA4	10	-0.02	0.45	-0.90; 0.86	-0.04	0.96	0.20	3.28
CA5	10	-0.02	0.45	-0.90; 0.86	-0.04	0.96	0.20	3.28
CA6	10	-0.06	0.45	-0.94; 0.82	-0.13	0.89	0.20	3.28
CA7	10	0.03	0.45	-0.85; 0.91	0.07	0.95	0.20	3.28
CA8	10	-0.04	0.45	-0.92; 0.84	-0.09	0.93	0.20	3.28
CA9	27	0.09	0.27	-0.44; 0.84	0.33	0.74	0.07	5.70
CA10	27	0.09	0.27	-0.44; 0.62	0.33	0.74	0.07	5.70
CA11	27	0.14	0.27	-0.39; 0.67	0.52	0.60	0.07	5.70
CA12	27	-0.21	0.27	-0.74; 0.32	-0.78	0.44	0.07	5.70
CA13	27	0.23	0.27	-0.30; 0.76	0.85	0.39	0.07	5.70
CA14	27	-0.04	0.27	-0.57; 0.49	-0.15	0.88	0.07	5.70
CA15	10	0.17	0.45	-0.71; 1.05	0.38	0.71	0.20	3.28
CA16	10	0	0.45	-0.88; 0.88	0.00	1.00	0.20	3.28
CA17	10	0.14	0.45	-0.74; 1.02	0.31	0.76	0.20	3.28
CA18	10	-0.2	0.45	-1.08; 0.68	-0.44	0.66	0.20	3.28
CA19	10	-0.22	0.45	-1.10; 0.66	-0.49	0.62	0.20	3.28
CA20	10	-0.37	0.45	-1.25; 0.51	-0.82	0.41	0.20	3.28
CA21	11	-0.06	0.43	-0.90; 0.78	-0.14	0.89	0.18	3.48
CA22	11	0	0.43	-0.84; 0.84	0.00	1.00	0.18	3.48
CA23	11	-0.11	0.43	-0.95; 0.73	-0.26	0.80	0.18	3.48
CA24	11	-0.17	0.43	-1.01; 0.67	-0.40	0.69	0.18	3.48
CA25	11	-0.16	0.43	-1.00; 0.68	-0.37	0.71	0.18	3.48
CA26	11	0.19	0.43	-0.65; 1.03	0.44	0.66	0.18	3.48
CA27	11	0.04	0.43	-0.80; 0.88	0.09	0.93	0.18	3.48
CA28	11	0.17	0.43	-0.67; 1.01	0.40	0.69	0.18	3.48

CA29	11	0.19	0.43	-0.65; 1.03	0.44	0.66	0.18	3.48
CA30	9	-0.19	0.47	-1.11; 0.73	-0.40	0.69	0.22	3.09
CA31	9	0.08	0.47	-0.84; 1.00	0.17	0.86	0.22	3.09
CA32	9	-0.31	0.47	-1.23; 0.61	-0.66	0.51	0.22	3.09
CA33	9	0.17	0.47	-0.75; 1.09	0.36	0.72	0.22	3.09
CA34	9	-0.53	0.48	-1.47; 0.41	-1.10	0.27	0.23	3.00
CA35	9	-0.24	0.47	-1.16; 0.68	-0.51	0.61	0.22	3.09
CA36	9	-0.37	0.48	-1.31; 0.57	-0.77	0.44	0.23	3.00
CA37	9	-0.95	0.5	-1.93; 0.03	-1.90	0.06	0.25	2.84
CA38	9	-1.36	0.52	-2.38; -0.34	-2.62	0.009 *	0.27	2.68
CA39	9	-0.37	0.48	-1.31; 0.57	-0.77	0.44	0.23	3.00
CA40	9	-0.31	0.47	-1.23; 0.61	-0.66	0.51	0.22	3.09
CA41	9	-0.71	0.49	-1.67; 0.25	-1.45	0.15	0.24	2.92
CA42	9	-1.14	0.51	-2.14; -0.14	-2.24	0.025 *	0.26	2.76
CA43	9	-1.33	0.52	-2.35; -0.31	-2.56	0.011 *	0.27	2.68
CA44	15	0.02	0.37	-0.71; 0.75	0.05	0.96	0.14	4.18
CA45	21	0.23	0.31	-0.38; 0.84	0.74	0.46	0.10	5.04
CA46	21	0.66	0.32	0.03; 1.29	2.06	0.039 *	0.10	4.88
CA47	21	0.84	0.32	0.21; 1.47	2.63	0.009 *	0.10	4.88
CA48	21	0.53	0.31	-0.08; 1.14	1.71	0.09	0.10	5.04
CA49	21	0.93	0.32	0.30; 1.56	2.91	0.004 *	0.10	4.88
CA50	21	0.95	0.33	0.30; 1.60	2.88	0.004 *	0.11	4.73
CA51	21	1.19	0.33	0.54; 1.84	3.61	0.000 *	0.11	4.73
CA52	21	0.93	0.32	0.30; 1.56	2.91	0.004 *	0.10	4.88
CA53	21	0.81	0.32	0.18; 1.44	2.53	0.011 *	0.10	4.88
CA54	21	0.82	0.32	0.19; 1.45	2.56	0.010 *	0.10	4.88
CA55	21	0.65	0.32	0.02; 1.28	2.03	0.042 *	0.10	4.88
CA56	21	0.7	0.32	0.07; 1.33	2.19	0.029 *	0.10	4.88
CA57	12	0.04	0.41	-0.76; 0.84	0.10	0.92	0.17	3.70
CA58	12	0.38	0.41	-0.42; 1.18	0.93	0.35	0.17	3.70
CA59	12	0.21	0.41	-0.59; 1.01	0.51	0.61	0.17	3.70
CA60	12	0.53	0.42	-0.29; 1.35	1.26	0.21	0.18	3.59
CA61	12	1.07	0.44	0.21; 1.93	2.43	0.015 *	0.19	3.38
CA62	12	0.34	0.41	-0.46; 1.14	0.83	0.41	0.17	3.70
Razem	866	0.136	0.065	0.008; 0.263	2.090	0.037 *		

CA – ćwiczenie aktywacyjne; g – wielkość efektu g (Hedgesa); p -prawdopodobieństwo testowe; SE – błąd standardowy; CI – przedział ufności; * - wynik istotny statystycznie

Analizy podgrup ujawniły jednak istotne zróżnicowanie efektu w zależności od dyscypliny (Tabela 3). Największe korzyści odnotowano u zawodników taekwondo – szczególnie, gdy zastosowany protokół łączył dynamiczne podskoki z seriami ciężkich przysiadów w seriach klasterowych. W jednym z badań na zawodnikach taekwondo zanotowano nawet efekt rzędu $g = 1,19$ ($p < 0,001$) dla wysokości skoku po protokole “bandal chagui” (kopnięcia techniczne połączone z obciążeniem). Dla kontrastu, w sportach, takich jak muay thai specyficzne CA mogą pogarszać wynik – na przykład, protokół z kopnięciami okrężnymi (ang. *roundhouse kicks*) spowodował spadek wyników ($g = -1,36$, $p = 0,009$).

Tabela 3. Wyniki metaanalizy z podziałem na dyscypliny

Poziom	Liczność	g	SE	±95%CI	Z-statystyka	p	Wariancja	Waga
Boks	80	-0.035	0.159	-0.347; 0.277	-0.220	0.826	0.025	39.506
Karate	60	-0.080	0.184	-0.440; 0.280	-0.435	0.663	0.034	29.630
Muay thai	90	-0.701	0.155	-1.006; -0.397	-4.517	0.001 *	0.024	41.481
Taekwondo	636	0.346	0.067	0.214; 0.477	5.137	<0.001 *	0.005	220.925
Razem	866	0.131	0.055	0.024; 0.239	2.389	0.017 *		

CA – ćwiczenie aktywacyjne; g – wielkość efektu g (Hegdesa); p - prawdopodobieństwo testowe; SE – błąd standardowy; CI – przedział ufności; * - wynik istotny statystycznie

Analiza pod kątem poziomu zaawansowania (Tabela 4) nie wykazała natomiast istotnych różnic: sumaryczny efekt u amatorów ($g = 0,14$; 95% CI: $-0,01-0,29$) był porównywalny z efektem u zawodników z poziomu elitarnego ($g = 0,13$; 95% CI: $-0,11-0,38$) – różnice te nie osiągnęły istotności statystycznej.

Tabela 4. Wyniki metaanalizy z podziałem na poziom zaawansowania

Poziom	Liczność	g	SE	±95%CI	Z-statystyka	p	Wariancja	Waga	Udział
Amatorski	659	0.14	0.08	-0.01; 0.29	1.77	0.08	0.01	169.53	0.72
Elitarny	207	0.13	0.12	-0.11; 0.38	1.06	0.29	0.02	64.69	0.28
Razem	866	0.13	0.07	0.01; 0.26	2.06	0.039 *			

CA – ćwiczenie aktywacyjne; g – wielkość efektu g (Hegdesa); p - prawdopodobieństwo testowe; SE – błąd standardowy; CI – przedział ufności; * - wynik istotny statystycznie

Ogółem wyniki metaanalizy wykazują, że skuteczność PAPE zależy od dostosowania protokołu do specyfiki dyscypliny. W dyscyplinach wymagających eksplozywności odpowiednio dobrane ćwiczenia przynoszą duże korzyści, natomiast zbyt specyficzne CA w innych sportach (jak kopnięcia w muay thai) mogą być nieefektywne lub wręcz szkodliwe dla natychmiastowego wyniku.

6.2. Badanie 2

Wyniki drugiego badania (Terbalyan i wsp., 2025b) potwierdziły istnienie PAPE wywołanego izometrycznym ćwiczeniem typu *overcoming* u siatkarzy, przy czym efekt ten okazał się zależny od rodzaju zastosowanej kończyny oraz poziomu wytrenowania zawodnika. Analiza wariancji wykazała istotną interakcję strona $\times$ czas ($p < 0,001$), co oznacza, że zmiana wysokości skoku po wysiłku była różna w zależności od tego, która kończyna wykonywała CA. U zawodników ELI zaobserwowano znaczącą poprawę wysokości SLDJ tylko w przypadku kończyny, która wykonywała ćwiczenie izometryczne. Wyniki przeprowadzonej ANOVA są przedstawione w tabeli 5 poniżej.

Tabela 5. Efekty i interakcje ANOVA

Efekt/ interakcja	Wysokość skoku		Czas kontaktu		RSI	
	Niedominująca	Dominująca	Niedominująca	Dominująca	Niedominująca	Dominująca
	CA	CA	CA	CA	CA	CA
Grupa $\times$ Strona $\times$ Czas	F=0.497; p=0.49; $\eta^2_p=0.027$	F=3.669; p=0.071; $\eta^2_p=0.169$	F=0.37; p=0.551; $\eta^2_p=0.02$	F=0.576; p=0.458; $\eta^2_p=0.031$	F=0.132; p=0.721; $\eta^2_p=0.007$	F=4.428; p=0.05; $\eta^2_p=0.197$
	F=17.078; p<0.001; $\eta^2_p=0.487$	F=0.448; p=0.512; $\eta^2_p=0.024$	F=2.222; p=0.153; $\eta^2_p=0.11$	F=13.3; p=0.002; $\eta^2_p=0.425$	F=6.454; p=0.021; $\eta^2_p=0.264$	F=1.446; p=0.245; $\eta^2_p=0.074$
	F=1.142; p=0.299; $\eta^2_p=0.06$	F=5.738; p=0.028; $\eta^2_p=0.242$	F<0.001; p=1; $\eta^2_p<0.001$	F=0.053; p=0.82; $\eta^2_p=0.003$	F=1.217; p=0.284; $\eta^2_p=0.063$	F=5.315; p=0.033; $\eta^2_p=0.228$
Grupa $\times$ Strona $\times$ Czas	F=0.024; p=0.877; $\eta^2_p=0.001$	F=8.519; p=0.009; $\eta^2_p=0.321$	F=0.802; p=0.382; $\eta^2_p=0.043$	F=0.349; p=0.562; $\eta^2_p=0.019$	F=0.161; p=0.693; $\eta^2_p=0.009$	F=6.034; p=0.024; $\eta^2_p=0.251$
	F=4.399; p=0.05; $\eta^2_p=0.196$	F=12.779; p=0.002; $\eta^2_p=0.321$	F=0.038; p=0.847; $\eta^2_p=0.002$	F=5.182; p=0.035; $\eta^2_p=0.224$	F=5.367; p=0.033; $\eta^2_p=0.23$	F=4.756; p=0.043; $\eta^2_p=0.209$
	F=10.964; p=0.004; $\eta^2_p=0.379$	F=39.503; p<0.001; $\eta^2_p=0.687$	F=0.63; p=0.438; $\eta^2_p=0.034$	F=1.378; p=0.256; $\eta^2_p=0.071$	F=10.547; p=0.004; $\eta^2_p=0.369$	F=31.592; p<0.001; $\eta^2_p=0.637$

	F=9.056;	F=3.559;	F=0.13;	F=0.644;	F=13.961;	F=3.249;
Grupa	p=0.008;	p=0.075;	p=0.722;	p=0.433;	p=0.002;	p=0.088;
	$\eta^2_p=0.335$	$\eta^2_p=0.165$	$\eta^2_p=0.007$	$\eta^2_p=0.035$	$\eta^2_p=0.437$	$\eta^2_p=0.153$

Pogrubienie – istotny statystycznie wynik; η^2_p – wielkość efektu (częstkowe eta-kwadrat); F - wartość testu Fishera; p - prawdopodobieństwo testowe, CA – ćwiczenie aktywacyjne.

Gdy seria izometrycznych przysiadów wykrocznych była wykonana dominującą kończyną dolną, wysokość skoku tej samej kończyny wzrosła z $16,4 \pm 2,4$ cm przed do $18,3 \pm 3,3$ cm po – wzrost o $\sim 1,9$ cm ($p < 0,001$). Wielkość efektu dla tej zmiany była duża (Hedges' $g = 0,79$). Analogicznie, po izometrycznym obciążeniu kończyny niedominującej wysokość skoku tej kończyny wzrosła z $13,7 \pm 2,6$ cm do $15,5 \pm 2,7$ cm (czyli o $\sim 1,8$ cm; $p = 0,001$; $g = 0,65$). Kluczowe jest to, że nie odnotowano statystycznie istotnego efektu przeniesionego na drugą, niećwiczoną kończynę – w grupie ELI poprawa dotyczyła wyłącznie kończyny zaangażowanej w ćwiczenie. Skoki wykonane kończyną kontralateralną nie zmieniły istotnie wysokości.

Co więcej, u siatkarzy elitarnych zaobserwowano poprawę także innych parametrów skoku: RSI dla kończyny dominującej zwiększył się z $0,47 \pm 0,06$ do $0,53 \pm 0,07$ ($p = 0,011$; $g = 0,68$), a dla niedominującej również nastąpił istotny wzrost ($p = 0,008$; $g = 0,58$).

CT podczas lądowania w skoku zawodników elitarnych zasadniczo nie wydłużył się po ćwiczeniu na tej samej nodze, jednak zaobserwowano niespodziewany efekt: po obciążeniu izometrycznym kończyny dominującej CT kontralateralnej (niedominującej) kończyny uległ wydłużeniu – CT wzrósł istotnie ($p = 0,001$; $g = 0,66$) dla skoku kończyną niedominującą po tym, gdy ćwiczenie wykonano kończyną dominującą.

Mimo to główne wnioski dla zawodników o wyższym poziomie rozgrywkowym są pozytywne: izometryczne przysiady wykroczne wyraźnie zwiększyły ich wysokość skoku, ale tylko w kończynie bezpośrednio zaangażowanej w CA. W przypadku zawodników AMA zaobserwowano odmienny wzorec. Istotna poprawa wysokości skoku wystąpiła u nich tylko wtedy, gdy ćwiczenie izometryczne wykonywała kończyna niedominująca. Po obciążeniu niedominującej kończyny wysokość jej skoku wzrosła z $11,0 \pm 2,4$ cm do $12,4 \pm 2,4$ cm (średnio $+1,4$ cm; $p = 0,008$), co odpowiada efektowi średniej wielkości ($g = 0,58$). Z kolei, gdy amatorzy wykonywali izometryczny wysiłek kończyną dominującą, nie odnotowano istotnej zmiany wysokości skoku ani dla kończyny dominującej, ani kontralateralną – wpływ takiego obciążenia okazał się statystycznie nieistotny. Podobnie RSI w grupie AMA uległ poprawie tylko po procedurze z kończyną niedominującą ($p = 0,021$; $g = 0,264$), ponownie

po obciążeniu kończyny dominującej nie stwierdzono istotnej zmiany RSI. CT u amatorów cechowała większa zmienność i brak jednoznacznych trendów – nie wykazano spójnych zmian CT w żadnym z warunków, a interakcje z czynnikiem treningowym nie były istotne.

Reasumując, izometryczne ćwiczenie typu *overcoming* o charakterze unilateralnym wywołało zjawisko PAPE w SLDJ, jednak głównie jako efekt lokalny. Siatkarzom o wysokim poziomie zaawansowania sportowego przyniosło ono wyraźne korzyści w skoku realizowanym tą samą kończyną przy braku pozytywnego efektu krzyżowego na drugą, jednak u słabiej wytrenowanych amatorów efekt był mniejszy i wystąpił tylko przy wzmocnieniu kończyny słabszej. Można to interpretować tak, że u zawodników z mniejszym doświadczeniem treningowym mocne pobudzenie ich słabszej strony daje szansę na zauważalną poprawę, czyli związana z redukcją dysproporcji, podczas gdy u profesjonalistów obie kończyny dolne są na tyle wytrenowane, że reagują silnie jedynie na własną aktywację. W każdym razie badanie potwierdziło skuteczność protokołu izometrycznego w krótkotrwałym podniesieniu parametrów skoku u siatkarzy, szczególnie tych z wysokim poziomem siły względnej.

6.3. Badanie 3

W trzecim badaniu (Terbalyan i wsp., 2025c) nie stwierdzono przewagi izometrycznej rozgrzewki PAPE nad tradycyjną rozgrzewką biegową pod względem poprawy wyników CMJ. Analiza wariancji nie wykazała istotnej interakcji między typem rozgrzewki a czasem pomiaru dla żadnego z mierzonych parametrów. W szczególności, wysokość skoku CMJ nie uległa istotnej zmianie w żadnej z grup – nie odnotowano istotnego głównego efektu czasu ($F = 0,146$; $p = 0,704$), a interakcja czas $\times$ grupa również była nieistotna ($F = 0,203$; $p = 0,654$). Podstawowe statystyki opisowe z podziałem na płeć i stronę zostały przedstawione poniżej (Tabela 6).

Tabela 6. Podstawowe statystyki opisowe

Zmienna	Grupa	Płeć	PRE	POST
			M $\pm$ SD (-95%CI; +95%CI)	
Średnia asymetria siły koncentrycznej [% L,R]	CON	K	-1.18 $\pm$ 11.62 (-13.38; 11.01)	2.07 $\pm$ 8.24 (-6.58; 10.72)
		M	0.32 $\pm$ 6.51 (-3.61; 4.26)	2.13 $\pm$ 7.72 (-2.53; 6.80)
	EXP	K	4.03 $\pm$ 10.61 (-1.85; 9.90)	2.55 $\pm$ 9.72 (-2.83; 7.93)
		M	1.15 $\pm$ 10.47 (-3.90; 6.19)	1.64 $\pm$ 11.44 (-3.88; 7.15)
Wysokość skoku (impuls-moment) [cm]	CON	K	29.15 $\pm$ 12.20 (16.35; 41.95)	33.05 $\pm$ 9.64 (22.94; 43.16)
		M	40.24 $\pm$ 11.60 (33.23; 47.25)	38.38 $\pm$ 12.12 (31.05; 45.70)
	EXP	K	28.51 $\pm$ 10.46 (22.72; 34.30)	27.02 $\pm$ 8.77 (22.16; 31.87)
		M	37.77 $\pm$ 8.26 (33.79; 41.76)	38.33 $\pm$ 9.95 (33.54; 43.12)
Asymetria szczytowej siły lądowania [% L,R]	CON	K	0.53 $\pm$ 16.60 (-16.89; 17.95)	0.53 $\pm$ 16.60 (-16.89; 17.95)
		M	-0.34 $\pm$ 26.86 (-16.57; 15.90)	-0.34 $\pm$ 26.86 (-16.57; 15.90)
	EXP	K	1.82 $\pm$ 20.99 (-9.81; 13.45)	7.13 $\pm$ 25.08 (-6.76; 21.02)
		M	15.31 $\pm$ 22.75 (4.34; 26.28)	8.17 $\pm$ 19.64 (-1.30; 17.63)

Koncentryczne RFD [N/s]	CON	K	1853.67 ± 950.13 (856.56; 2850.77)	1712.19 ± 1092.56 (565.62; 2858.75)
		M	1791.08 ± 1293.87 (1009.20; 2572.95)	1479.09 ± 1119.16 (802.79; 2155.39)
	EXP	K	980.27 ± 648.92 (620.90; 1339.63)	1542.56 ± 572.35 (1225.60; 1859.52)
		M	3043.00 ± 2505.30 (1835.48; 4250.52)	2261.44 ± 1739.30 (1423.13; 3099.76)

RFD – szybkość rozwijania siły; CON – grupa kontrolna; EXP – grupa eksperymentalna; L –lewa; R –prawa; K – kobiety; M – mężczyźni; SD – odchylenie standardowe; PRE – pomiar przed interwencją; POST – pomiar po interwencji; CI – 95 % przedział ufności.

Średnia wysokość skoku w grupie PAPE przed rozgrzewką wynosiła około $37,8 \pm 8,3$ cm u mężczyzn i $28,5 \pm 10,5$ cm u kobiet, po rozgrzewce izometrycznej odpowiednio $38,3 \pm 9,9$ cm (M) i $27,0 \pm 8,8$ cm (K). Różnice $\sim 0,5$ cm (M) i $-1,5$ cm (K) są pomijalne i statystycznie nieistotne. W grupie kontrolnej odnotowano niewielkie wahania: mężczyźni skakali średnio $40,2 \pm 11,6$ cm przed vs $38,4 \pm 12,1$ cm po truchcie, a kobiety $29,2 \pm 12,2$ cm przed vs $33,0 \pm 9,6$ cm po – te zmiany ($+3-4$ cm u kobiet, $-1,8$ cm u mężczyzn) również okazały się nieistotne statystycznie. Zaobserwowano istotny główny efekt płci: mężczyźni uzyskiwali ogólnie wyższe skoki niż kobiety ($p < 0,001$), co jest spodziewane ze względu na różnice siły i mocy mięśniowej. Co więcej, różnica między grupami okazała się nieistotna (brak głównego efektu typu rozgrzewki: $F = 1,201$; $p = 0,278$).

Wyniki dotyczące parametrów dodatkowych również nie wykazały przewagi rozgrzewki izometrycznej. Asymetria aktywna siły mierzona zarówno podczas odbicia koncentrycznego, jak i lądowania, nie uległa istotnym zmianom po rozgrzewce ani w jednej, ani w drugiej grupie ($p > 0,1$ dla efektów czasu i interakcji). Na przykład, średnia asymetria siły koncentrycznej przed rozgrzewką w grupie PAPE wynosiła ok. 1,1% (u M) i 4,0% (u K), a po rozgrzewce $\sim 1,6\%$ (M) i $2,6\%$ (K), przy dużych rozrzutach indywidualnych – zmiany te były statystycznie nieistotne. RFD również nie wykazało żadnych różnic po rozgrzewkach – wartości RFD przed a po pozostały na zbliżonym poziomie, a ANOVA nie ujawniła efektów głównych ani interakcji (np. $F_{\text{czas}} = 0,758$; $p = 0,388$).

Podsumowując, rozgrzewka izometryczna PAPE nie przyniosła dodatkowych korzyści w porównaniu z tradycyjną rozgrzewką aerobową, jeśli chodzi o natychmiastową wysokość skoku oraz związane parametry siły u badanych zawodników gier zespołowych. Obie grupy – zarówno po izometrycznych ćwiczeniach maksymalnych, jak i po 5 min truchtu – uzyskały podobne wyniki CMJ i podobny brak zmian w asymetrii czy RFD. Wynik ten sugeruje, że w warunkach tego eksperymentu standardowa rozgrzewka biegowa zapewniła już optymalny poziom pobudzenia i temperatury mięśni, a dodanie komponentu izometrycznego nie było w stanie wygenerować dodatkowego efektu PAPE.

7. Dyskusja

Celem cyklu badań stanowiących podstawę niniejszej rozprawy była ocena zjawiska PAPE w kontekście generowania mocy mięśniowej kończyn dolnych. Zagadnienie to zrealizowano poprzez trzy projekty badawcze: eksperyment dotyczący wpływu unilateralnej izometrycznej CA na parametry SLDJ, systematyczny przegląd literatury z metaanalizą efektywności protokołów CA w sportach walki oraz badanie porównujące izometryczny protokół aktywacyjny z klasyczną rozgrzewką pod kątem ich oddziaływania na CMJ, RFD i asymetrię aktywną.

Wyniki przeprowadzonych badań wykazały, że zjawisko PAPE, w odniesieniu do wybranych zdolności motorycznych, występuje w różnych warunkach w sposób istotny, ale krótkotrwały. Ważnym zagadnieniem pojawiającym się na marginesie uzyskanych rezultatów jest również problem tzw. „*non-responders*” – osób, które pomimo teoretycznie poprawnie skonstruowanego protokołu CA nie wykazują spodziewanej poprawy wyników. Zjawisko to zostało uznane za ważne przez Evetovicha i współautorów (2015), którzy wskazują na dużą zmienność indywidualnych odpowiedzi, często niezależnych od płci czy doświadczenia sportowego. Taka obserwacja może tłumaczyć niektóre niejednoznaczne rezultaty w niniejszych badaniach, gdzie mimo teoretycznej poprawności metodycznej i kontroli parametrów obciążenia izometrycznego nie udało się uzyskać jednoznacznych efektów potęgujących skoczność w całej badanej grupie.

Metaanaliza (Terbalyan i wsp., 2025a) obejmująca łącznie 866 zawodników sportów walki potwierdziła z kolei, że ogólnie PAPE jest statystycznie nieznaczny do umiarkowanego (połączony ustandaryzowany $g \approx 0,14$). Zarazem wykazano, iż PAPE silnie zależy od specyfiki protokołu oraz dyscypliny sportu. Największe korzyści zaobserwowano u zawodników taekwondo – na przykład, protokół łączący wielokrotne skoki pionowe z ciężkimi seriami siłowymi typu klasterowego skutkował znaczącym wzrostem wysokości skoku ($g > 1,1$). Dla kontrastu, w dyscyplinach takich jak muay thai odnotowano nawet pogorszenie wyników po zastosowaniu wysoce specyficznych bodźców (na przykład, maksymalnych kopnięć okrężnych jako ćwiczenia aktywacyjnego, $g \approx -1,36$). W przekroju poziomym zaawansowania zawodników analiza nie wykazała istotnych różnic – średnia wielkość efektu u sportowców amatorskich ($g \approx 0,14$) była zbliżona do obserwowanej u zawodników elitarnych ($g \approx 0,13$).

Ważnym aspektem, który pojawił się w toku prowadzonych analiz jest zagadnienie tak zwanej natury lokalnej oraz kontralateralnej PAPE. W eksperymencie z udziałem siatkarki (Terbalyan i wsp., 2025b) zaobserwowano wyraźny lokalny PAPE zgodnie z wcześniejszymi

ustaleniami Wong i wsp. (2020) oraz Andrews i wsp. (2014) – unilateralne izometryczne CA spowodowało istotny wzrost wysokości SLDJ oraz wskaźnika RSI w kończynie poddanej aktywacji, przy czym efekt ten był najbardziej widoczny u zawodników o wyższym poziomie sportowym. Należy także zaznaczyć, iż wciąż nie ma jednoznacznej zgody co do istnienia kontralateralnego PAPE. Istnieją przesłanki sugerujące możliwość występowania zjawiska na drodze mechanizmów neurofizjologicznych, takich jak ogólny wzrost pobudzenia układu nerwowego czy podwyższona sekrecja katecholamin po intensywnym CA (Cairns i Borrani, 2015). Przyczyn tych rozbieżności należy szukać w różnicach metodycznych, takich jak rodzaj stosowanego CA czy czas trwania aktywacji – oraz w odmiennych poziomach zaawansowania sportowego badanych grup. U siatkarzy o wysokim poziomie zaawansowania sportowego potwierdzono poprawę wyników skoku zarówno w kończynie dominującej, jak i niedominującej po zastosowaniu bodźca izometrycznego. Odmienne reagowali zawodnicy mniej wytrenowani – w grupie amatorskiej odnotowano jedynie niewielką poprawę w skoku realizowanym kończyną niedominującą po aktywacji tej samej kończyny, aczkolwiek zaobserwowano brak istotnych zmian po wzmocnieniu kończyny dominującej. Prawdopodobnie, zmiany te leżą u podstaw wyższej efektywności kontroli motorycznej, bardziej wydajną rekrutacją jednostek motorycznych, lepszą zdolnością tolerowania intensywnych bodźców aktywacyjnych oraz ogólnie wyższą poziomem sprawności nerwowo-mięśniowej, co pozwala skuteczniej wykorzystywać zjawisko PAPE bardziej doświadczonym sportowcom (Chiu i wsp., 2003; Lim i Kong, 2013).

W badaniu porównującym izometryczną CA z tradycyjną rozgrzewką w postaci biegu na bieżni (Terbalyan i wsp, 2025c) stwierdzono natomiast, że izometryczna aktywacja nie zapewniła przewagi w stosunku do klasycznej metody przygotowania do treningu. Bezpośrednio po obu rodzajach rozgrzewki uzyskano zbliżone rezultaty: wysokość CMJ nie uległa istotnej zmianie, podobnie jak asymetria siły kończyn dolnych i wskaźnik RFD, przy czym nie odnotowano statystycznie istotnych różnic między grupą wykonującą ćwiczenie izometryczne a grupą biegu aerobowego. Jedynym zaobserwowanym czynnikiem różnicującym była płeć uczestników – mężczyźni uzyskiwali wyższe wyniki skoku, niż kobiety – lecz rodzaj rozgrzewki nie wpływał istotnie na te różnice. Unilateralne ćwiczenia izometryczne są proponowane jako efektywny sposób korekcji asymetrii kończyn oraz optymalizacji rekrutacji jednostek motorycznych w kontekście specyficznych ruchów sportowych (McCurdy i Conner, 2003). Jednakże powyższe wyniki nie wykazały wyraźnych korzyści z wykorzystania unilateralnej rozgrzewki izometrycznej względem rozgrzewki biegowej w kontekście poprawy asymetrii siłowej czy zwiększenia wskaźnika RFD. Bieg

o niskiej intensywności na bieżni skutkuje wzrostem temperatury mięśniowej oraz wzmożonym przepływ krwi, co stanowi kluczowe czynniki optymalizujące przygotowanie organizmu do wysiłku (Racinas i wsp., 2017). Fakt, iż oba protokoły – izometryczny i dynamiczny – nie różniły się znacząco w skuteczności, może wykazywać, że prostsza technicznie i powszechnie stosowana rozgrzewka dynamiczna może być równie efektywna fizjologicznie, niż bardziej zaawansowane techniki izometryczne.

Warto zwrócić uwagę, że protokoły oparte na maksymalnych izometrycznych skurczach (MVIC) są szczególnie polecane w kontekście generowania PAPE, zwłaszcza w dyscyplinach wymagających dużych prędkości ruchów (Lum i wsp., 2021; Koźlenia i Domaradzki, 2024). Istotne jest jednak, że protokoły wykorzystujące krótkie, powtarzalne MVIC mogą mieć zmienną efektywność, co podkreśla konieczność precyzyjnego dobierania parametrów takich jak czas trwania czy obciążenie.

Uzyskane wyniki wskazują na kluczową rolę parametrów protokołu oraz charakterystyki zawodników w modulowaniu PAPE. Istotne wzrosty mocy w skoku po izometrycznym bodźcu u siatkarzy trenujących zawodowo są zgodne z koncepcją, że wytrenowani sportowcy efektywniej wykorzystują zjawisko PAPE – dzięki większej sile i odporności na zmęczenie są oni w stanie generować silniejszą odpowiedź po intensywnej CA (Wilson i wsp., 2013). Zgodnie z wcześniejszymi doniesieniami (Seitz i Haff, 2015), osoby o wyższym poziomie siły i mocy notują silniejsze efekty tego typu interwencji w porównaniu do słabiej wytrenowanych. Z drugiej strony, słabsza reakcja lub brak istotnych zmian u zawodników mniej zaawansowanych sugeruje, że u nich mechanizmy odpowiedzialne za PAPE nie ujawniają się tak łatwo lub zostają zniwelowane przez zmęczenie wywołane przez CA (Hodgson i wsp., 2005).

Przedstawiony cykl badań nie jest pozbawiony istotnych ograniczeń metodologicznych, które powinny zostać uwzględnione przy interpretacji uzyskanych wyników oraz przy formułowaniu wniosków.

Po pierwsze, liczba włączonych do metaanalizy (Terbalyan i wsp., 2025a) badań była relatywnie ograniczona ($n = 9$), co znacząco zawęża możliwość generalizacji wyników oraz zmniejsza precyzję oszacowania zbiorczego efektu zastosowanych CA, pomijając fakt, że do przeprowadzenia metaanalizy potrzebne są tylko dwa badania. Dodatkowo, uwzględnione badania koncentrowały się głównie na ograniczonym zakresie CA, pozostawiając istotne metody takie jak aktywacja izometryczna czy różnorodne formy plyometryczne, nadal niewystarczająco zbadane.

Po drugie, duża heterogeniczność metodologiczna uwzględnionych badań – przejawiająca się w odmiennych protokołach testowania, różnych przerwach wypoczynkowych, intensywnościach obciążeń, doborze ćwiczeń oraz różnicach w ocenie wyników – mogła wpłynąć na uzyskaną zmienność wyników. Takie zróżnicowanie mogło ograniczyć dokładność estymacji efektów, wprowadzając dodatkowe źródło potencjalnych zmiennych zakłócających. Ponadto, zastosowanie jedynie ogólnych miar sprawności, takich jak CMJ, może nie odzwierciedlać ogólnej specyfiki ruchowej i taktycznej rzeczywistych warunków sportowej rywalizacji, szczególnie w dyscyplinach walki.

Po trzecie, jednym z ograniczeń było uwzględnienie badań z zawodnikami, którzy nie rywalizują czynnie, co ogranicza możliwość bezpośredniego odniesienia wyników do populacji zawodników sportów walki na poziomie profesjonalnym. Jest to wyszczególnione w sekcji ograniczeń metaanalizy.

Po czwarte, wykorzystanie protokołu zawierającego połączenie klasycznej rozgrzewki na bieżni z interwencją PAPE jest najbardziej zbliżoną formą wykorzystania tego zjawiska w praktyce trenerskiej. Dodanie trzeciej grupy badawczej do eksperymentu Terbalyan i wsp. (2025c) mogłoby w większej mierze wyjaśnić stosowanie CA przez startami mistrzowskimi.

Ponadto, analiza efektów izometrycznych przysiadów wykrocznych w eksperymencie dotyczącym siatkarzy opierała się na ćwiczeniu, które nie było ściśle unilateralne. Ogranicza to pewność, czy zastosowany bodziec aktywacyjny był jednorodny i czy kończyna tylna nie była dodatkowo zaangażowana w generowanie siły, co mogło wpłynąć na uzyskane efekty. Ponadto brak warunków kontrolnych (bez aktywacji) w tym eksperymencie nie pozwala na jednoznaczne przypisanie obserwowanych efektów jedynie do zastosowanego bodźca izometrycznego.

Istotnym ograniczeniem zastosowanej metodologii było także pominięcie pomiarów fizjologicznych, takich jak elektromiografia mięśniowa, temperatura mięśniowa, markery metaboliczne lub hormonalne. Brak tych pomiarów uniemożliwia jednoznaczne określenie mechanizmów fizjologicznych i systemowych odpowiedzialnych za obserwowane efekty, ograniczając interpretację uzyskanych rezultatów jedynie do poziomu wykonania zadań ruchowych.

W końcu, istotnym ograniczeniem była przekrojowa natura badań oraz fakt, że pomiary przeprowadzono jednorazowo, co ogranicza możliwość oceny długoterminowych efektów treningowych lub adaptacji kumulatywnych. Zastosowanie projektów badań o charakterze longitudinalnym, obejmujących regularne stosowanie CA oraz wielokrotne pomiary,

pozwoлиoby na precyzyjniejsze określenie skuteczności i długoterminowej efektywności analizowanych protokołów.

Dotychczasowe badania zrealizowane w ramach niniejszej pracy doktorskiej miały głównie charakter aplikacyjny. Skupiały się one na ocenie PAPE w kontekście wyników testów wysiłkowych, takich jak wysokość wyskoku czy czas sprintu. Tego typu podejście dostarczyło cennych informacji praktycznych sugerując, że odpowiednio dobrane CA mogą przejściowo poprawiać parametry sprawnościowe u sportowców. Niemniej jednak, w literaturze podkreśla się, że większość badań nad zjawiskiem PAP/PAPE koncentrowała się na zewnętrznych wynikach wykonania ćwiczeń, a nie na bezpośrednich markerach fizjologicznych stojących za efektem wzmocnienia (Boullosa i wsp., 2020). Innymi słowy, brakuje pogłębionego zrozumienia, dlaczego i jak dokładnie dochodzi do poprawy wyników wskutek PAPE – jakie zmiany w mięśniach i układzie tę poprawę powodują.

Obecnie w literaturze naukowej brakuje szczegółowych badań nad mechanizmami fizjologicznymi i strukturalnymi PAPE. Dotyczy to zarówno charakterystyki samego skurczu mięśniowego (np. RFD, sztywności mięśni, opóźnienia reakcji mięśnia), jak i ewentualnych adaptacji architektury mięśniowej wywołanych powtarzaniem PAPE. Co prawda proponuje się szereg potencjalnych wyjaśnień zjawiska PAPE – m.in. wzrost temperatury mięśnia i zmiany uwodnienia tkanki wpływające na jej elastyczność i sztywność, a także zwiększoną aktywację nerwową skutkującą lepszą rekrutacją jednostek motorycznych – jednak dotychczas niewiele prac empirycznych potwierdziło te mechanizmy bezpośrednimi pomiarami (Blazevich i Babault, 2019). Ponadto, autorzy najnowszych przeglądów systematycznych podkreślają potrzebę przesunięcia akcentu badawczego z samych efektów sprawnościowych na zrozumienie mechanizmów nerwowo-mięśniowych leżących u podstaw PAPE (Terbalyan i wsp., 2025a; Fischer, J., & Paternoster, 2024). Wynika stąd wyraźna luka poznawcza, którą należy wypełnić, aby zjawisko PAPE było w pełni wyjaśnione naukowo.

Aby odpowiedzieć na powyższe wyzwania, doktorant planuje kontynuację pracy naukowej w kierunku pogłębionej analizy mechanizmów PAPE. Celem tych badań – stanowiących podstawę przyszłej pracy habilitacyjnej – będzie kompleksowe zbadanie zmian zachodzących w mięśniach i układzie nerwowym podczas PAPE, z wykorzystaniem obiektywnych metod pomiarowych. W planowanym projekcie badawczym zostaną zastosowane m.in. tensiomiografia (TMG), elektromiografia (EMG) oraz ultrasonografia mięśniowa (USG) połączone w jednym protokole badawczym. Takie wielowymiarowe tworzenie modelu odpowiedzi fizjologicznej pozwoli równocześnie śledzić mechanikę skurczu mięśnia, jego aktywność elektryczną oraz strukturę wewnętrzną, co stanowi nowatorski krok

naprzód w badaniach nad PAPE. TMG jest nieinwazyjną techniką oceny właściwości skurczowych mięśni i dostarcza szybkich, precyzyjnych informacji o reaktywności mięśnia bez zakłócania normalnej aktywności badanej osoby. Pozwala ona zmierzyć kluczowe parametry, takie jak czas inicjacji skurczu mięśnia czy maksymalne przemieszczenie brzośca mięśnia, które wiąże się ze sztywnością. Z kolei EMG umożliwi rejestrację aktywności elektrycznej mięśni (zarówno podczas CA, jak i w trakcie następującego po nim wysiłku), co odsłoni dynamikę rekrutacji jednostek motorycznych i ewentualne zwiększenie pobudzenia nerwowo-mięśniowego związane z PAPE. Natomiast USG mięśniowa pozwoli na obserwację architektury mięśni – np. pomiar grubości mięśnia, długości pęczków mięśniowych i kątów przebiegu włókien – w warunkach *in vivo*.

Ponadto niezbędne jest przeprowadzenie drugiej części systematycznego przeglądu literatury oraz metaanalizy, tym razem ukierunkowanej na specyficzne wskaźniki sprawności fizycznej związane bezpośrednio z daną dyscypliną sportową (ang. *sport-specific performance indicators*). Pierwsza część dotyczyła ogólnych parametrów sprawności fizycznej (na przykład, wysokość skoku), jednak wiele protokołów CA może oddziaływać odmiennie w zależności od rodzaju wysiłku typowego dla danej dyscypliny. Z tego powodu, szczegółowe przeanalizowanie PAPE w kontekście specyficznych wskaźników, takich jak siła uderzenia, szybkość kopnięcia, skuteczność wykonywania rzutów w sportach walki czy specyficzne parametry sprintu i wyskoku w sportach zespołowych, może przynieść cenne praktyczne wskazówki dla trenerów i sportowców.

Przedstawiony cykl badań wnosi istotny wkład w rozwój wiedzy o krótkoterminowych adaptacjach wysiłkowych i metodach optymalizacji rozgrzewki sportowej. Z naukowego punktu widzenia uzyskano nowe informacje na temat uwarunkowań PAPE. Szczegółowo przeanalizowano PAPE w ujęciu unilateralnym – wykazując, że wzmocnienie ma charakter głównie lokalny (dotyczy aktywowanej grupy mięśni), a efekt przeniesienia na kończynę kontralateralną jest ograniczony. Zmiany te są uwidocznione na tle poziomu wytrenowania. Uwidoczniono także, jak poziom wytrenowania wpływa na odpowiedź na CA, dostarczając empirycznych dowodów na silniejszą odpowiedź u zawodników o wyższym poziomie zaawansowania sportowego. Ponadto, wykonany przegląd systematyczny z metaanalizą jest pierwszym kompleksowym opracowaniem poświęconym wyłącznie sportom walki w kontekście PAPE. Syntetyzuje on rozproszone dotąd wyniki badań cząstkowych, ułatwiając zidentyfikowanie ogólnych prawidłowości (np. skuteczność różnych rodzajów CA) oraz obszarów wymagających dalszej eksploracji. Co ważne, analiza ta potwierdziła brak standaryzacji protokołów CA w literaturze – widoczna zmienność podejść treningowych

przekładała się na zróżnicowane rezultaty, co podkreśla potrzebę dalszych badań nad ujednoliceniem i doprecyzowaniem zaleceń w tym obszarze. Ostatni z eksperymentów dodał do całości perspektywę aplikacyjną, sprawdzając skutki wprowadzenia PAPE do rutynowej rozgrzewki.

Praktycznie podsumowując niniejszy badawczy cykl monotematyczny, w sportach walki o profilu skocznościowym (jak taekwondo, karate) włączenie do rozgrzewki kilku skoków lub dynamicznych ćwiczeń siłowych może zwiększyć moc generowaną podczas skoków i kopnięć, natomiast w dyscyplinach wymagających precyzyjnych technik (boks, MMA) zbyt ciężkie lub zbyt specyficzne ćwiczenie przed samym występem może pogorszyć szybkość i dokładność ruchów – stąd zalecana jest ostrożność i testowanie różnych wariantów. W sportach zespołowych natomiast wykazano, że tradycyjna rozgrzewka bazująca na ćwiczeniach aerobowych i dynamicznych jest równie skuteczna w przygotowaniu do wysiłku, a ewentualne uzupełnienie jej o elementy PAPE musi być dobrze przemyślane. W praktyce trenerzy powinni więc monitorować odpowiedź zawodników na ewentualne wprowadzenie izometrycznych czy konwencjonalnych bodźców w rozgrzewce i stopniowo modyfikować ich parametry (intensywność, czas trwania, przerwy), tak aby wykorzystać potencjał poprawy bez ryzyka przeciążenia czy spadku wydajności. Pomimo powyższych ograniczeń, uzyskane w niniejszym cyklu badawczym wyniki dostarczają spójnego obrazu PAPE.

8. Wnioski

W świetle postawionych pytań badawczych oraz przyjętych hipotez należy stwierdzić, że efekt PAPE w sportach walki jest zjawiskiem rzeczywistym, jednak jego skala w ujęciu łącznym pozostaje umiarkowana. Przeprowadzony przegląd systematyczny z metaanalizą wykazał niewielki, lecz istotny statystycznie przyrost ogólnych wskaźników sprawności, przy czym wielkość uzyskiwanego efektu była wyraźnie uwarunkowana charakterystyką zastosowanego protokołu oraz specyfiką dyscypliny: konfiguracje łączące komponent siły i mocy okazywały się najbardziej korzystne, natomiast bodźce nadmiernie specyficzne mogły prowadzić do braku efektu lub nawet przejściowego pogorszenia wykonania. Równocześnie, w analizie podgrup nie potwierdzono jednoznacznej przewagi odpowiedzi u zawodników o wyższym poziomie zaawansowania sportowego nad amatorami, co przemawia za tym, że sam poziom sportowy – w skali całej syntezy – nie stanowił rozstrzygającego moderatora reakcji na PAPE. W tym sensie hipotezę pierwszą należy uznać za potwierdzoną w zakresie istnienia efektu ogólnego, przy braku jednoznacznego potwierdzenia tezy o wyraźniejszym wzroście wyników u zawodników będących na wysokim poziomie zaawansowania sportowego.

W ujęciu unilateralnym uzyskane dane wskazują na zdecydowanie lokalny charakter odpowiedzi. Jednorazowe, unilateralne izometryczne CA prowadziło do poprawy parametrów SLDJ w kończynie poddanej aktywacji, natomiast nie obserwowano wiarygodnego transferu korzyści na stronę przeciwną; w pewnych konfiguracjach odnotowywano wręcz niekorzystne zmiany czasu kontaktu z podłożem. Wielkość reakcji była zróżnicowana w zależności od kończyny aktywowanej i poziomu wytrenowania, z wyraźniejszymi zmianami u zawodników o wyższym poziomie zaawansowania sportowego. Tak ukształtowany obraz wyników skłania do wniosku, iż hipotezę drugą należy uznać za zasadniczo potwierdzoną: efekt ma charakter ściśle lokalny, a obserwowana modulacja przez stronę aktywacji i poziom wytrenowania ma znaczenie praktyczne dla planowania interwencji.

W warunkach porównania z praktyką rozgrzewkową, izometryczny protokół ukierunkowany na PAPE nie wykazał przewagi nad klasyczną rozgrzewką aerobową w bezpośredniej poprawie wysokości skoku CMJ, redukcji asymetrii siłowej ani we wzroście RFD; oba podejścia zapewniały porównywalny poziom zmian, statystycznie nieistotny. W konsekwencji hipoteza trzecia nie znalazła potwierdzenia, co należy interpretować jako argument na rzecz ostrożności w traktowaniu PAPE jako substytutu kompleksowej rozgrzewki i – co ważniejsze – jako wskazanie potrzeby precyzyjnego dopasowania parametrów

CA (rodzaj, intensywność, objętość, czas przerwy) do realiów danej dyscypliny, profilu zawodnika i okna czasowego, w którym oczekuje się ujawnienia efektu.

Podsumowując, przedstawione dowody potwierdzają potencjał ergogeniczny PAPE: skuteczność zależy od właściwego doboru i dawkowania bodźca oraz od zgodności protokołu z wymaganiami danej dyscypliny, natomiast w przypadku interwencji unilateralnych należy oczekiwać efektów o zasięgu lokalnym bez gwarantowanego przeniesienia na kończynę kontralateralną. Praktyczne zastosowanie omawianych rozwiązań powinno zatem opierać się na personalizacji i indywidualnej walidacji reakcji zawodnika, a nie na założeniu ich automatycznej przewagi nad rozwiązaniami konwencjonalnymi.

9. Bibliografia

1. Andrews, S. K., Horodyski, J. M., MacLeod, D. A., Whitten, J., & Behm, D. G. (2016). The Interaction of Fatigue and Potentiation Following an Acute Bout of Unilateral Squats. *Journal of sports science & medicine*, 15(4), 625–632.
2. Blazevich AJ and Babault N (2019) Post-activation Potentiation Versus Post-activation Performance Enhancement in Humans: Historical Perspective, Underlying Mechanisms, and Current Issues. *Front. Physiol.* 10:1359. <https://doi.org/10.3389/fphys.2019.01359>
3. 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>
4. Bourgeois, H., Duchateau, J., & Baudry, S. (2022). Effects of postactivation potentiation on mechanical output and muscle architecture during electrically induced contractions in plantar flexors. *Journal of applied physiology*, 132(5), 1213–1222. <https://doi.org/10.1152/jap.00359.2021>
5. Brown I. E., Loeb G. E. (1998). Post-activation potentiation—a clue for simplifying models of muscle dynamics. *Am. Zool.* 38, 743–754. <http://dx.doi.org/10.1093/icb/38.4.743>
6. Bueno, J. C. A., Faro, H., Lenetsky, S., Gonçalves, A. F., Dias, S. B. C. D., Ribeiro, A. L. B., da Silva, B. V. C., Filho, C. A. C., de Vasconcelos, B. M., Serrão, J. C., Andrade, A., Souza-Junior, T. P., & Claudino, J. G. (2022). Exploratory Systematic Review of Mixed Martial Arts: An Overview of Performance of Importance Factors with over 20,000 Athletes. *Sports*, 10(6), 80. <https://doi.org/10.3390/sports10060080>
7. Cairns, S. P., & Borrani, F. (2015). β -Adrenergic modulation of skeletal muscle contraction: key role of excitation-contraction coupling. *The Journal of physiology*, 593(21), 4713–4727. <https://doi.org/10.1113/JP270909>
8. Chen Y, Su Q, Yang J, Li G, Zhang S, Lv Y and Yu L (2023) Effects of rest interval and training intensity on jumping performance: a systematic review and meta-analysis investigating post-activation performance enhancement. *Front. Physiol.* 14:1202789. doi: 10.3389/fphys.2023.1202789
9. Chiu, L. Z., 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)
10. Comfort, P., Stewart, A., Bloom, L., & Clarkson, B. (2014). Relationships between strength, sprint, and jump performance in well-trained youth soccer players. *Journal of strength and conditioning research*, 28(1), 173–177.
<https://doi.org/10.1519/jsc.0b013e318291b8c7>
 11. Cormie, P., McGuigan, M. R., & Newton, R. U. (2010). Influence of strength on magnitude and mechanisms of adaptation to power training. *Medicine and science in sports and exercise*, 42(8), 1566–1581. <https://doi.org/10.1249/mss.0b013e3181cf818d>
 12. 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 = Physiologie appliquee, nutrition et metabolisme*, 42(10), 1122–1125. <https://doi.org/10.1139/apnm-2017-0217>
 13. Dunn, E. C., Humberstone, C. E., Franchini, E., Iredale, K. F., & Blazeovich, A. J. (2022). Relationships Between Punch Impact Force and Upper- and Lower-Body Muscular Strength and Power in Highly Trained Amateur Boxers. *Journal of strength and conditioning research*, 36(4), 1019–1025. <https://doi.org/10.1519/jsc.0000000000003585>
 14. Edman K. A., Hwang J. C. (1977). The force-velocity relationship in vertebrate muscle fibres at varied tonicity of the extracellular medium. *J. Physiol.* 269, 255–272.
<https://doi.org/10.1113/jphysiol.1977.sp011901>
 15. Enoka R. M., Hutton R. S., Eldred E. (1980). Changes in excitability of tendon tap and Hoffmann reflexes following voluntary contractions. *Electroencephalogr. Clin. Neurophysiol.* 48, 664–672. [https://doi.org/10.1016/0013-4694\(80\)90423-x](https://doi.org/10.1016/0013-4694(80)90423-x)
 16. Evetovich, T. K., Conley, D. S., & McCawley, P. F. (2015). Postactivation potentiation enhances upper- and lower-body athletic performance in collegiate male and female athletes. *Journal of strength and conditioning research*, 29(2), 336–342.
<https://doi.org/10.1519/JSC.0000000000000728>
 17. Fischer, J., & Paternoster, F. K. (2024). Post-Activation-Performance Enhancement: Possible Contributing Factors. *Journal of sports science & medicine*, 23(1), 34–45.
<https://doi.org/10.52082/jssm.2024.34>
 18. Folland, J. P., & Williams, A. G. (2007). The adaptations to strength training: morphological and neurological contributions to increased strength. *Sports medicine (Auckland, N.Z.)*, 37(2), 145–168. <https://doi.org/10.2165/00007256-200737020-00004>

19. Gossen E. R., Sale D. G. (2000). Effect of postactivation potentiation on dynamic knee extension performance. *Eur. J. Appl. Physiol.* 83, 524–530. <https://doi.org/10.1007/s004210000304>
20. Heckman C. J., Enoka R. M. (2012). *Motor unit. Compr. Physiol.* 2, 2629–2682. <https://doi.org/10.1002/cphy.c100087>
21. Hernandez-Martinez, J., Cid-Calfucura, I., Valdés-Badilla, P., Franchini, E., García-García, J. M., & Herrera-Valenzuela, T. (2024). Acute and Chronic Effects of Muscle Strength Training on Physical Fitness in Boxers: A Scoping Review. *Applied Sciences*, 14(21), 9706. <https://doi.org/10.3390/app14219706>
22. Hewett, T. E., Myer, G. D., Ford, K. R., Heidt, R. S., Jr, Colosimo, A. J., McLean, S. G., van den Bogert, A. J., Paterno, M. V., & Succop, P. (2005). Biomechanical measures of neuromuscular control and valgus loading of the knee predict anterior cruciate ligament injury risk in female athletes: a prospective study. *The American journal of sports medicine*, 33(4), 492–501. <https://doi.org/10.1177/0363546504269591>
23. Hodgson, M., Docherty, D., & Robbins, D. (2005). Post-activation potentiation: underlying physiology and implications for motor performance. *Sports medicine (Auckland, N.Z.)*, 35(7), 585–595. <https://doi.org/10.2165/00007256-200535070-00004>
24. Kalinowski R, Pisz A, Kolinger D, Wilk M, Stastny P and Krzysztofik M (2022) Acute effects of combined isometric and plyometric conditioning activities on sports performance and tendon stiffness in female volleyball players. *Front. Physiol.* 13:1025839. doi: 10.3389/fphys.2022.1025839
25. 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, 239–247. <https://doi.org/10.2478/hukin-2019-0016>
26. Koźlenia, D., & Domaradzki, J. (2024). Postsubmaximal Isometric Full Squat Jump Potentiation in Trained Men. *Journal of strength and conditioning research*, 38(3), 459–464. <https://doi.org/10.1519/JSC.0000000000004647>
27. Krzysztofik, M., Wilk, M., Pisz, A., Kolinger, D., Bichowska, M., Zajac, A., & Šťastný, P. (2022). Acute Effects of High-Load vs. Plyometric Conditioning Activity on Jumping Performance and the Muscle-Tendon Mechanical Properties. *Journal of Strength and Conditioning Research*, 37, 1397 - 1403. <https://doi.org/10.1519/jsc.00000000000004398>

28. 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*, 37(7), 1419–1427. <https://doi.org/10.1519/jsc.0000000000004453>
29. Lauersen, J. B., Bertelsen, D. M., & Andersen, L. B. (2014). The effectiveness of exercise interventions to prevent sports injuries: a systematic review and meta-analysis of randomised controlled trials. *British journal of sports medicine*, 48(11), 871–877. <https://doi.org/10.1136/bjsports-2013-092538>
30. Li, T., Liang, Y. (2024). The effects of different post-activation potentiation strategies on the performance of elite female track cyclists in position 1 of team sprint. *Sci Rep* 14, 24604. <https://doi.org/10.1038/s41598-024-75464-4>
31. Lim, J. J., & Kong, P. W. (2013). Effects of isometric and dynamic postactivation potentiation protocols on maximal sprint performance. *Journal of strength and conditioning research*, 27(10), 2730–2736. <https://doi.org/10.1519/JSC.0b013e3182815995>
32. Liu, L., Niu, X., & Zhou, Z. (2024). Acute Effects of Different Conditioning Activities on the Post-Activation Performance Enhancement in Athletes' Jumping and Sprinting Performances: A Systematic Review and Meta-Analysis. *Applied Sciences*, 14(20), 9301. <https://doi.org/10.3390/app14209301>
33. Lum, D., Comfort, P., Barbosa, T. M., & Balasekaran, G. (2022). Comparing the effects of plyometric and isometric strength training on dynamic and isometric force-time characteristics. *Biology of sport*, 39(1), 189–197. <https://doi.org/10.5114/biol sport.2022.103575>
34. 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 = Physiologie appliquee, nutrition et metabolisme*, 37(3), 546–550. <https://doi.org/10.1139/h2012-016>
35. McCurdy, K., & Conner, C. (2003). Unilateral Support Resistance Training Incorporating the Hip and Knee. *Strength and Conditioning Journal*, 25, 45–51.
36. Moher, D., Liberati, A., Tetzlaff, J., Altman, D. G., & The PRISMA Group. (2009). Preferred reporting items for systematic reviews and meta-analyses: The PRISMA statement. *PLoS Medicine*, 6(7), e1000097. <https://doi.org/10.1371/journal.pmed.1000097>
- 37.

38. Ouergui I, Delleli S, Messaoudi H, Bridge CA, Chtourou H, Franchini E and Ardigò LP (2023) Effects of conditioning activity mode, rest interval and effort to pause ratio on post-activation performance enhancement in taekwondo: a randomized study. *Front. Physiol.* 14:1179309. doi: 10.3389/fphys.2023.1179309
39. Prieske, O., Behrens, M., Chaabene, H., Granacher, U., & Maffiuletti, N. A. (2020). Time to Differentiate Postactivation "Potentiation" from "Performance Enhancement" in the Strength and Conditioning Community. *Sports medicine (Auckland, N.Z.)*, 50(9), 1559–1565. <https://doi.org/10.1007/s40279-020-01300-0>
40. Racinais, S., Cocking, S., & Périard, J. D. (2017). Sports and environmental temperature: From warming-up to heating-up. *Temperature (Austin, Tex.)*, 4(3), 227–257. <https://doi.org/10.1080/23328940.2017.1356427>
41. Rassier, D. E., & Macintosh, B. R. (2000). Coexistence of potentiation and fatigue in skeletal muscle. *Brazilian journal of medical and biological research = Revista brasileira de pesquisas medicas e biologicas*, 33(5), 499–508. <https://doi.org/10.1590/s0100-879x2000000500003>
42. Sargeant, A. (1987). Effect of muscle temperature on leg extension force and short-term power output in humans. *European Journal of Applied Physiology and Occupational Physiology*, 56, 693-698. <https://doi.org/10.1007/bf00424812>
43. 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 (Auckland, N.Z.)*, 46(2), 231–240. <https://doi.org/10.1007/s40279-015-0415-7>
44. Steggerda, F. (1927). Effects of Water Content on Muscular Efficiency. *Proceedings of the Society for Experimental Biology and Medicine*, 24, 915 – 916
45. Suchomel, T. J., Nimphius, S., & Stone, M. H. (2016). The Importance of Muscular Strength in Athletic Performance. *Sports medicine (Auckland, N.Z.)*, 46(10), 1419–1449. <https://doi.org/10.1007/s40279-016-0486-0>
46. Terbalyan A., Mikołajec K., Krzysztofik M., Urbański R., Jarosz J., Stastny P., Spieszny M. (2025b). Effects of overcoming isometric unilateral conditioning activity on subsequent single-leg drop jump in elite and amateur volleyball players: a randomized crossover trial. *BMC Sports Science, Medicine and Rehabilitation*, 17(1):30. <https://doi.org/10.1186/s13102-025-01083-9>.
47. Terbalyan A., Skotniczny K., Krzysztofik M., Chycki J., Kasparov V., Roczniok R. (2025a). Effect of Post-Activation Performance Enhancement in Combat Sports: A

- Systematic Review and Meta-Analysis – Part I: General Performance Indicators. *Journal of Functional Morphology and Kinesiology*, 10(1):88. <https://doi.org/10.3390/jfmk10010088>.
48. Terbalyan A., Ścisłowska-Czarnecka A., Maszczyk A., Roczniok R. (2025c). No Evidence of PAPE-Induced Jumping Performance Enhancement Following Isometric and Treadmill Warm-Ups in Team Sport Athletes. *Baltic Journal of Health and Physical Activity*, 17(2). <https://doi.org/10.29359/BJHPA.17.2.07>
 49. 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>
 50. Vandervoort A. A., Quinlan J., McComas A. J. (1983). Twitch potentiation after voluntary contraction. *Exp. Neurol.* 81, 141–152. [https://doi.org/10.1016/0014-4886\(83\)90163-2](https://doi.org/10.1016/0014-4886(83)90163-2)
 51. Vargas-Molina, S., Salgado-Ramírez, U., Chulvi-Medrano, I., Carbone, L., Maroto-Izquierdo, S., & Benítez-Porres, J. (2021). Comparison of post-activation performance enhancement (PAPE) after isometric and isotonic exercise on vertical jump performance. *PloS one*, 16(12). <https://doi.org/10.1371/journal.pone.0260866>
 52. Vetter R. E. (2007). Effects of six warm-up protocols on sprint and jump performance. *Journal of strength and conditioning research*, 21(3), 819–823. <https://doi.org/10.1519/r-20296.1>
 53. Wang L., Bahadir A., Kawai M. (2015). High ionic strength depresses muscle contractility by decreasing both force per cross-bridge and the number of strongly attached cross-bridges. *J. Muscle Res. Cell Motil.* 36, 227–241. <https://doi.org/10.1007/s10974-015-9412-6>
 54. Wilson, J. M., Duncan, N. M., Marin, P. J., Brown, L. E., Loenneke, J. P., Wilson, S. M., 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>
 55. Wong, V., Yamada, Y., Bell, Z. W., Spitz, R. W., Viana, R. B., Chatakondi, R. N., Abe, T., & Loenneke, J. P. (2020). Postactivation performance enhancement: Does conditioning one arm augment performance in the other?. *Clinical physiology and functional imaging*, 40(6), 407–414. <https://doi.org/10.1111/cpf.12659>

56. Young, W. B., James, R., & Montgomery, I. (2002). Is muscle power related to running speed with changes of direction?. *The Journal of sports medicine and physical fitness*, 42(3), 282–288.
57. Zimmermann, H. B., MacIntosh, B. R., & Dal Pupo, J. (2020). Does postactivation potentiation (PAP) increase voluntary performance?. *Applied physiology, nutrition, and metabolism = Physiologie appliquee, nutrition et metabolisme*, 45(4), 349–356. <https://doi.org/10.1139/apnm-2019-0406>

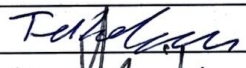
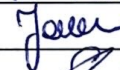
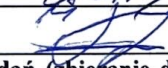
OŚWIADCZENIE WSPÓLAUTORÓW ARTYKUŁU NAUKOWEGO

Oświadczenie dotyczy wykorzystania artykułu naukowego na potrzeby rozprawy doktorskiej Pana Artura Terbałyana

Tytuł rozprawy doktorskiej: OCENA ZJAWISKA POSTAKTYWACYJNEJ POPRAWY SPRAWNOŚCI FIZYCZNEJ W KONTEKŚCIE WYBRANYCH WSKAŹNIKÓW WYDOLNOŚCI NERWOWOMIĘŚNIOWEJ KOŃCZYN DOLNYCH

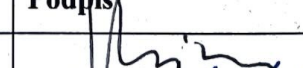
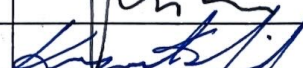
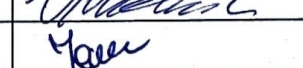
Artykuł: Effects of overcoming isometric unilateral conditioning activity on subsequent single-leg drop jump in elite and amateur volleyball players: a randomized crossover trial, 2025, BMC Sports Sci Med Rehabil, 17(1):3, doi:10.1186/s13102-025-01083-9

A. Oświadczam, że indywidualny wkład w powstanie wyżej wymienionego artykułu naukowego jest następujący (oświadczają wszyscy współautorzy):

	Współautor artykułu	Udział w artykule*	Potwierdzenie wkładu
	Imię Nazwisko	Np. A, B, D, G	Podpis
1	Artur Terbałyan	A, C, E, F, D	
2	Kazimierz Mikołajec	B, F	
3	Michał Krzysztofik	A, B, D	
4	Robert Urbański	C, E, F	
5	Jakub Jarosz	C, D	
6	Petr Stastny	A, G	
7	Michał Spieszny	A, F, G	

* A – koncepcja badań; B – planowanie badań; C – realizacja badań (zbieranie danych); D – analiza statystyczna; E – interpretacja wyników; F – redagowanie (pisanie) pracy; G – korekta merytoryczna artykułu;

B. Oświadczam, że Pan Artur Terbałyan miał wiodący udział w powstanie wyżej wymienionego artykułu oraz wyrażam zgodę na wykorzystanie tego artykułu jako część rozprawy doktorskiej.

	Współautor artykułu	Podpis
1	Kazimierz Mikołajec	
2	Michał Krzysztofik	
3	Robert Urbański	
4	Jakub Jarosz	
5	Petr Stastny	
6	Michał Spieszny	

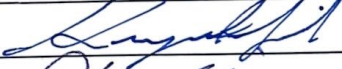
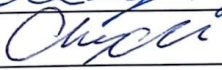
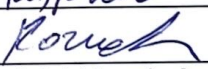
OŚWIADCZENIE WSPÓLAUTORÓW ARTYKUŁU NAUKOWEGO

Oświadczenie dotyczy wykorzystania artykułu naukowego na potrzeby rozprawy doktorskiej Pana Artura Terbalyana

Tytuł rozprawy doktorskiej: OCENA ZJAWISKA POSTAKTYWACYJNEJ POPRAWY SPRAWNOŚCI FIZYCZNEJ W KONTEKŚCIE WYBRANYCH WSKAŹNIKÓW WYDOLNOŚCI NERWOWOMIĘŚNIOWEJ KOŃCZYN DOLNYCH

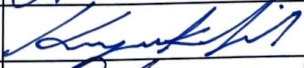
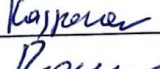
Artykuł: Effect of Post-Activation Performance Enhancement in Combat Sports: A Systematic Review and Meta-Analysis—Part I: General Performance Indicators, 2025, J. Funct. Morphol. Kinesiol. 10(1), 88; <https://doi.org/10.3390/jfmk10010088>

A. Oświadczam, że indywidualny wkład w powstanie wyżej wymienionego artykułu naukowego jest następujący (oświadczają wszyscy współautorzy):

	Współautor artykułu	Udział w artykule*	Potwierdzenie wkładu
	Imię Nazwisko	Np. A, B, D, G	Podpis
1	Artur Terbalyan	A, B, C, D, E, F, H	
2	Karol Skotniczny	A, D, E, F	
3	Michał Krzysztofik	D, F	
4	Jakub Chycki	D, E	
5	Vadim Kasparov	F	
6	Robert Roczniok	G	

* A – koncepcja badań; B – planowanie badań; C – realizacja badań (zbieranie danych); D – analiza statystyczna; E – interpretacja wyników; F – redagowanie (pisanie) pracy; G – korekta merytoryczna artykułu; H – udział w procesie recenzji; I – inne (opisać).....

B. Oświadczam, że Pan Artur Terbalyan miał wiodący udział w powstanie wyżej wymienionego artykułu oraz wyrażam zgodę na wykorzystanie tego artykułu jako część rozprawy doktorskiej.

	Współautor artykułu	Podpis
1	Karol Skotniczny	
2	Michał Krzysztofik	
3	Jakub Chycki	
4	Vadim Kasparov	
5	Robert Roczniok	

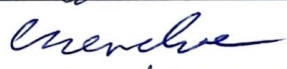
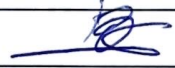
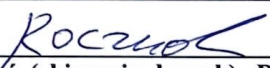
OŚWIADCZENIE WSPÓLAUTORÓW ARTYKUŁU NAUKOWEGO

Oświadczenie dotyczy wykorzystania artykułu naukowego na potrzeby rozprawy doktorskiej Pana Artura Terbalyana

Tytuł rozprawy doktorskiej: OCENA ZJAWISKA POSTAKTYWACYJNEJ POPRAWY SPRAWNOŚCI FIZYCZNEJ W KONTEKŚCIE WYBRANYCH WSKAŹNIKÓW WYDOLNOŚCI NERWOWOMIĘŚNIOWEJ KOŃCZYN DOLNYCH

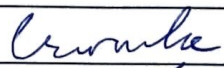
Artykuł: No evidence for PAPE-Induced Jumping Performance Enhancement Following Isometric and Treadmill Warm-Ups in Team Sport Athletes, 2025, Balt J Health Phys Act, IN PRESS, doi:10.29359/BJHPA.17.2.07

A. Oświadczam, że indywidualny wkład w powstanie wyżej wymienionego artykułu naukowego jest następujący (oświadczają wszyscy współautorzy):

	Współautor artykułu	Udział w artykule*	Potwierdzenie wkładu
	Imię Nazwisko	Np. A, B, D, G	Podpis
1	Artur Terbalyan	A, B, C, E, F	
2	Anna Ścisłowska-Czarnecka	A, H	
3	Adam Maszczyk	G	
4	Robert Roczniok	D	

* A – koncepcja badań; B – planowanie badań; C – realizacja badań (zbieranie danych); D – analiza statystyczna; E – interpretacja wyników; F – redagowanie (pisanie) pracy; G – korekta merytoryczna artykułu; H – udział w procesie recenzji; I – inne (opisać).....

B. Oświadczam, że Pan Artur Terbalyan miał wiodący udział w powstanie wyżej wymienionego artykułu oraz wyrażam zgodę na wykorzystanie tego artykułu jako część rozprawy doktorskiej.

	Współautor artykułu	Podpis
1	Anna Ścisłowska-Czarnecka	
2	Adam Maszczyk	
3	Robert Roczniok	

10. Prace wchodzące w skład osiągnięcia naukowego

10.1. Praca 1



Review

Effect of Post-Activation Performance Enhancement in Combat Sports: A Systematic Review and Meta-Analysis—Part I: General Performance Indicators

Artur Terbalyan ¹, Karol Skotniczny ¹, Michał Krzysztofik ^{1,2,*}, Jakub Chycki ¹, Vadim Kasparov ¹ and Robert Roczniok ¹

¹ Institute of Sport Sciences, Jerzy Kukuczka Academy of Physical Education, 40-065 Katowice, Poland; a.terbalyan@awf.katowice.pl (A.T.); k.skotniczny@awf.katowice.pl (K.S.); j.chycki@awf.katowice.pl (J.C.); kaspary996@gmail.com (V.K.); r.roczniok@awf.katowice.pl (R.R.)

² Department of Sport Games, Faculty of Physical Education and Sport, Charles University in Prague, 162 52 Prague, Czech Republic

* Correspondence: m.krzysztofik@awf.katowice.pl



Academic Editor: Helmi Chaabene

Received: 19 January 2025

Revised: 28 February 2025

Accepted: 7 March 2025

Published: 9 March 2025

Citation: Terbalyan, A.; Skotniczny, K.; Krzysztofik, M.; Chycki, J.; Kasparov, V.; Roczniok, R. Effect of Post-Activation Performance Enhancement in Combat Sports: A Systematic Review and Meta-Analysis—Part I: General Performance Indicators. *J. Funct. Morphol. Kinesiol.* **2025**, *10*, 88. <https://doi.org/10.3390/jfmk10010088>

Copyright: © 2025 by the authors. Licensee MDPI, Basel, Switzerland. This article is an open access article distributed under the terms and conditions of the Creative Commons Attribution (CC BY) license (<https://creativecommons.org/licenses/by/4.0/>).

Abstract: **Background/Objectives:** Post-activation performance enhancement (PAPE) has been explored for its potential to improve general performance in combat sports. This systematic review and meta-analysis investigated the effects of PAPE protocols on physical performance, focusing on differences across disciplines, competitive levels, and testing methods. **Methods:** A PRISMA-guided search (2010–2023) identified 19 studies examining PAPE protocols in combat sports athletes. The inclusion criteria required human trials using defined PAPE protocols, with outcomes of general performance indicators such as countermovement jumps (CMJs). A meta-analysis was conducted on data from 866 athletes using random effects modeling. **Results:** The PAPE protocols yielded a pooled effect size of 0.136 (95% CI, 0.008–0.263) across 866 athletes. Taekwondo athletes exhibited the most pronounced improvements in CMJ performance, particularly when using protocols that combined repeated vertical jumps with heavy-resistance cluster sets, and with dynamic, sport-specific movements such as the bandal chagui protocol achieving an effect size of 1.19 ($p < 0.001$). Conversely, Muay Thai athletes experienced performance declines when the protocols incorporated highly specific techniques, such as roundhouse kicks ($ES = -1.36$, $p = 0.009$). Analysis by competitive level revealed pooled effect sizes of 0.14 (95% CI, -0.01 to 0.29) for amateur athletes and 0.13 (95% CI, -0.11 to 0.38) for elite athletes, with no statistically significant differences observed between these groups. **Conclusions:** PAPE's effectiveness depends on tailoring protocols to the competitive level and discipline. Short rest intervals support plyometric protocols for amateurs, while heavy-resistance exercises enhance elite performers. Further research is needed to standardize PAPE protocols and explore discipline-specific adaptations.

Keywords: countermovement jump; performance testing; strength training; plyometrics; martial arts

1. Introduction

Understanding the physiological determinants of performance is essential for optimizing training strategies and enhancing competitive outcomes [1–3]. The key features in athletic parameters of muscle strength and power are associated with improved force–time properties (such as rate of force development [RFD] and external mechanical power) and general sport skill performance (such as jumping, sprinting, and direction change) and

lower injury rates [4]. An athlete's overall performance is influenced by enhanced force-time characteristics, which are significantly correlated with greater muscular strength [4].

Based on its recent contractile experience, skeletal muscle may exhibit diminished or improved contractile capability. Through post-activation potentiation (PAP), certain contractions may cause an increase in muscular force, RFD, or both in subsequent contractions [5]. While phosphorylation of the myosin regulatory light chain (MRLC) is widely recognized as the primary mechanism driving the PAP effect, much of the research in this field has focused on performance-based outcomes rather than direct physiological markers of potentiation [6,7]. Moreover, while PAP is significant for only a few minutes [8], the peak voluntary performance enhancement often occurs 6–10 min after the conditioning activity (CA). Due to this discrepancy, the alternative term post-activation performance enhancement (PAPE) has been proposed, along with additional mechanisms that may contribute to acute performance improvements [6,9]. These include an increase in muscle temperature to enhance contractile efficiency and changes in muscle water content influencing tissue elasticity and stiffness [6]. Additionally, enhanced neural activation, reflected in improved motor unit recruitment and firing rates, further augments performance outcomes [6]. In training practice, this acute improvement in strength and power performance is typically induced through recent voluntary contractile activity, such as performing a maximum voluntary isometric contraction (MVIC) or another maximal effort exercise as a CA to enhance the subsequent athletic task [5].

The nature of combat sports presupposes a high level of power manifestation [10], which could be achieved through PAPE-based training protocols [11], obtaining the previously mentioned neuromuscular adaptations [5,6]. Power development is fundamental to performance in combat sports, where explosive strength underlies critical skills such as rapid kicks, punches, jumps, and quick changes of direction. In disciplines such as taekwondo, boxing, Muay Thai, judo, wrestling, and karate, effective power output can be the decisive factor between winning and losing. Recent research, including the work by da Silva Santos et al. [12], has emphasized the importance of assessing lower-body performance, particularly in taekwondo, where rapid force production is directly linked to effective kicking and dynamic movement. The PAPE phenomenon is typically integrated into training via methods such as complex training [13] and contrast training [14]. While both techniques are widely endorsed for enhancing athletic performance [15] and have gained considerable acceptance in the strength and conditioning community [16], they differ in their implementation and the specific neuromuscular activation strategies they employ.

A multitude of discriminant factors exist between individual combat sports athletes, including competitive level and discipline [17]. Therefore, the optimization of PAPE protocols for combat sports athletes, with an emphasis on adapting to these factors, should be studied to allow coaches to achieve maximal outcomes during the preparation process. To the best of the authors' knowledge, there have yet to be published comprehensive studies reviewing the effect of CAs on the PAPE of combat sports athletes. To date, only one study has investigated the effectiveness of plyometric training interventions on enhancing the physical performance of combat sports athletes [18]. Hence, there is a need for research to evaluate the efficacy of various PAPE protocols, which may help to select the most appropriate training variables to elicit the PAPE effect. Additionally, the type of discipline, experience, fitness level, and competitive level, as well as the type of physical test, must be considered to solve the research problem. Therefore, this systematic review and meta-analysis aimed to determine the following:

- (a) Are there CA protocols capable of eliciting PAPE in combat sports athletes?
- (b) How do different combat sports disciplines respond to PAPE protocols?

- (c) What type of test had the greatest PAPE effect?
- (d) Does the level of competition affect the magnitude of the enhancement effect of CA?

2. Materials and Methods

2.1. Search Strategy

This study followed the PRISMA guidelines for a systematic literature review and was not registered in a public database. [19,20]. PRISMA stands for “Preferred Reporting Items for Systematic Reviews and Meta-Analyses”. We collected data through the following stages: literature verification, literature selection, selection criteria review, and final selection [21]. To identify appropriate studies for the current review, literature searches of the PubMed/Medline, SPORTDiscus and Web of Science, Scopus, EBSCO, and Google Scholar databases were conducted by a member of the research team. The literature search included published records from databases between January 2010 and May 2023. The following keywords were used as search terms: “combat sport*” OR “martial art*” OR “MMA” OR “kickbox*” OR “box*” OR “wrestl*” OR “judo” OR “taekwondo” OR “karate” OR “muay thai” OR “grappl*” OR “jiu-jitsu”) AND “post-warm-up” OR “pre-activity” OR “post-activation potentiation” OR “post-activation performance enhancement”. “*” indicates truncations to avoid missing data (e.g., kickboxING vs kickboxER).

2.2. Inclusion and Exclusion Criteria

Review papers, unpublished abstracts, theses, and dissertations were not included; only peer-reviewed, original research articles published in English and providing full-text accessibility were considered. To be accepted for inclusion, studies needed to include human experimental trials that examined healthy combat sports athletes actively participating in recognized disciplines (e.g., boxing, judo, karate, taekwondo, Brazilian jiu-jitsu, mixed martial arts, wrestling, kickboxing, Muay Thai). The participants were required to have no current injuries or known health conditions that might affect their neuromuscular performance. Crucially, eligible studies had to employ well-defined PAP or PAPE protocols, compare these to appropriate control conditions (e.g., rest, standard warm-up, or alternative intervention), and report changes in performance measures. The PICOS framework [20] was developed following the PRISMA guidelines to ensure systematic and standardized inclusion criteria (Table 1).

Table 1. PICOS framework.

Factor	Description
Participants	Healthy combat sports athletes actively participating in recognized disciplines such as boxing, judo, karate, taekwondo, Brazilian jiu-jitsu, MMA, wrestling, kickboxing, and Muay Thai. Athletes must be free of injuries and any health conditions that could affect neuromuscular performance
Interventions	Studies must implement a defined post-activation performance enhancement (PAPE) protocol, specifying training parameters such as intensity (%1RM), volume (sets/reps), intra- and inter-set rest periods, and exercise type. Pre- and post-intervention performance metrics must be compared.

Table 1. *Cont.*

Factor	Description
Comparisons	Control or comparison conditions, including rest, standard warm-up, alternative interventions, or between different PAPE protocols. Studies may also compare effects by discipline, competition level, or test results.
Outcomes	Acute changes in general performance metrics, including but not limited to countermovement jump (CMJ), isokinetic strength, sprint performance, power outputs, or agility tests. Results must be reported with means, standard deviations, or effect sizes.
Study design	Experimental designs such as randomized controlled trials, crossover designs, or quasi-experimental studies. Studies must include clearly defined protocols and outcome measures

2.3. Text Screening

Titles and abstracts of the initial search results were independently assessed for relevance by two investigators (AT and KS), based on a priori inclusion and exclusion criteria. The same two researchers independently screened the full texts after screening the titles and abstracts to assess compliance with the inclusion and exclusion criteria, to further identify studies for inclusion in the analysis. Any disagreements among reviewers were discussed until a consensus decision was reached.

2.4. Data Extraction, Study Coding

The extracted information included the study authors, year of publication, study design, age, sex, competitive level, 1RM values in a range of strength measures, the combat sports discipline, CAs with training variables, and outcomes. The first and second authors gathered the data through the blind method. The authors collected the means with SD of pre- and post-conditioning performance test results. The third author was responsible for the initial screening and selection process. Any missing data were obtained by direct request to the corresponding author. In the absence of feedback, ImageJ® software (ImageJ v. 1.54d, National Institute of Health, Bethesda, MD, USA) was employed to obtain the requisite data. In cases where data were unavailable, the study was excluded. Effect sizes were calculated from the means and standard deviations of the pre- and post-intervention data. The results of the random effects meta-analysis are presented in a forest plot. The minimum number of studies included in the meta-analysis was five. All studies meeting the inclusion criteria were carefully reviewed to document relevant study characteristics and were tabulated in an Excel spreadsheet (Microsoft Corporation, Redmond, WA, USA).

2.5. Quality Assessment

The Physiotherapy Evidence Database (PEDro) scale [22] was employed by the initial and secondary authors of the review (AT and KS) to assess the risk of bias and the level of research quality of each study independently. In the event of any discrepancies between the two assessors, a consensus meeting was held to resolve them. Studies with a low or high risk of bias and studies with high research quality were given a score of 0 or 1 for each item. In the absence of clear information or evidence to the contrary, the item was assigned a score of 0. Studies were classified as excellent (PEDro score of 9 to 10), good (6 to 8), fair (4 to 5), or poor (0 to 3) according to their PEDro score. Studies with a PEDro score greater than 4 were included in the systematic review, while for the meta-analysis only studies scoring 6 or above were retained.

2.6. Meta-Analysis

The statistical analysis was conducted on meta-analyses of means, standard deviations, and effect sizes (ESs) computed using Hedges' g as described by Hedges and Olkin [23]. Given that many of the selected studies had small sample sizes, this version of the formula was used to correct for potential bias in effect size estimates. Between-study heterogeneity was explored using forest plots and was evaluated statistically using I^2 , which represents the percentage of between-study variation that is due to heterogeneity rather than chance. A I^2 of 0% indicates the absence of heterogeneity, while values of 50% or above suggest considerable heterogeneity. A random effects model was used since it is more conservative, and the observed heterogeneity in a few cases was 50%. Statistical analysis was carried out using PQStat Software (1.8.2.208, PQStat, Poznań, Poland) and data was visualized using PRISM 10 software (v. 10.1.1, GraphPad, MA, USA). The use of either funnel plots or formal statistical tests to explore publication bias was not employed, as the number of articles utilized for analysis was insufficient for the interpretation of funnel plots. Furthermore, the use of funnel plots can be misleading for the exploration of publication bias, particularly when the number of studies is relatively limited [24]. In addition to these meta-analytic techniques, a one-way analysis of variance (ANOVA) was conducted to compare effect sizes across different subgroups, such as combat sports disciplines and competitive levels. The significance level was set at $p < 0.05$.

3. Results

3.1. Literature Search

Figure 1 illustrates the screening process, which was organized into three consecutive phases: (i) identification, (ii) screening, and (iii) inclusion in the review. Nineteen articles were ultimately selected to investigate PAPE in combat sports. Among these, eight articles focused on taekwondo [12,25–31], two on boxing [32,33], one on wrestling [34], one on judo [35], one on mixed martial arts [36], one on karate [37], one on kickboxing [38], one on Muay Thai [39], one on wushu [40], and two included mixed combat sports [41,42].

3.2. Quality Assessment

The mean PEDro score across all 19 studies was 7.8. Of these studies, 3 were classified as excellent (16%), 13 as good (68%), and 2 as fair (11%). No studies were classified as poor (0%). The results of the quality assessment are presented below in Table 2.

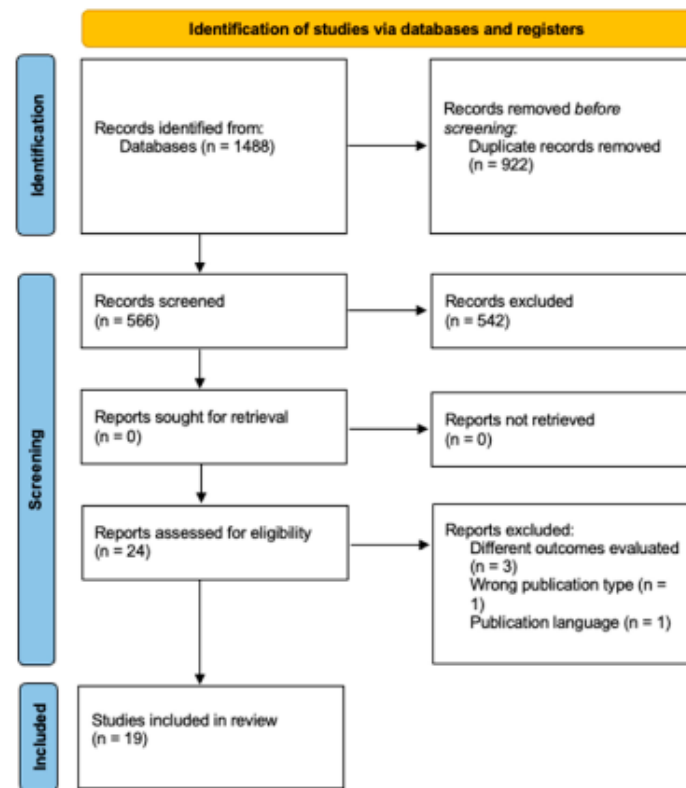


Figure 1. PRISMA chart of the search and study inclusion process.

Table 2. PEDro scale quality assessment.

#	Reference	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	Sum
1	Yi et al., 2022 [32]	yes	1	1	1	1	0	1	1	1	0	1	8
2	Eroglu et al., 2022 [34]	yes	0	1	1	0	0	1	1	1	1	1	7
3	Langer et al., 2022 [36]	yes	0	1	0	0	0	1	1	1	0	0	4
4	Ferreira et al., 2012 [41]	yes	1	1	1	1	0	1	1	1	0	0	7
5	Liossis et al., 2013 [42]	yes	1	1	1	0	0	1	1	1	1	1	8
6	Finlay et al., 2022 [33]	yes	1	1	1	1	0	1	1	1	1	1	9
7	Ouergui et al., 2022 [25]	yes	1	1	1	1	0	1	1	1	1	1	9
8	Margaritopoulos et al., 2015 [37]	yes	1	1	1	1	0	1	1	1	1	1	9
9	Da Silva Santos et al., 2015 [26]	yes	1	1	1	1	0	1	1	1	1	1	9
10	Pyun et al., 2022 [27]	yes	0	0	0	0	0	1	1	1	1	1	5
11	Afonso et al., 2021 [40]	yes	1	1	1	1	0	1	1	1	1	1	9
12	Catsro-Gatrido et al., 2020 [28]	yes	1	1	1	1	0	1	1	1	1	0	8
13	da Silva Santos et al., 2016 [12]	yes	1	1	1	1	0	1	1	1	1	1	9
14	Lum, 2019 [35]	yes	1	1	1	1	0	1	1	1	0	1	8

Table 2. Cont.

#	Reference	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	Sum
15	Cimadoro et al., 2018 [39]	yes	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	10
16	Oliviera et al., 2018 [29]	yes	1	0	1	1	0	1	1	1	0	1	7
17	Ouergui et al., 2023 [30]	yes	1	1	0	1	1	1	1	1	1	1	9
18	Boyaci & Kizilet, 2023 [31]	yes	1	0	1	0	0	0	1	1	1	1	6
19	Yilmaz et al., 2018 [38]	yes	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	10

The included studies were evaluated using the Physiotherapy Evidence Database (PEDro) scale, which classifies studies into four quality levels: excellent (scores of 9–10), good (6–8), fair (4–5), and poor (0–3).

3.3. Systematic Review

The 19 studies included in this systematic review (Table 3) investigated PAPE interventions across combat sports, including taekwondo ($n = 8$), wrestling ($n = 1$), judo ($n = 1$), boxing ($n = 2$), and a mixed group of participants ($n = 2$). The remaining studies investigated mixed martial arts (MMA; $n = 1$), karate ($n = 1$), kickboxing ($n = 1$), Muay Thai ($n = 1$), and taolu wushu ($n = 1$). Female athletes were included in 2 studies, males in 12, while 5 studies included mixed-gender groups. The sample sizes ranged from 8 to 48 participants. The aggregate sample size across the 19 studies included in the systematic review was 286 participants. The majority of participants were amateurs ($n = 13$ studies), while 4 studies focused on elite athletes and 2 on mixed athlete status. The majority of studies target participants aged 16–25 years, with some including broader age ranges up to 29 years. The outcome measures included general performance metrics. The countermovement jump was the most frequently assessed parameter ($n = 12$ studies), followed by isokinetic strength, running anaerobic sprint test, hip power test, bench press throw, and dumbbell press tests. The study designs included randomized controlled trials (RCTs) ($n = 12$), crossover trials ($n = 5$), and quasi-experimental methods ($n = 2$). All the studies employed a pre- and post-intervention comparison to evaluate the PAPE effect. The CAs employed were diverse, encompassing loaded squat jumps, heavy-resistance training (e.g., squats, bench presses), plyometric drills (e.g., tuck jumps, broad jumps), ballistic push-ups, isokinetic exercises, elastic resistance punches, and sport-specific protocols such as roundhouse kicks and other techniques like whole-body vibration.

Table 3. Characteristics of studies included in systematic review.

Ref.	AGE (M ± SD)	SEX	Level	1RM	D	n	CG	CA	L	RI, min	ISR, s	GPT
Yi et al., 2022 [32]	19–20 ± 1.55	M	A	90.80 ± 8.39 kg-squat	BOX	10	X	LSJ Squat	LSJ: 4 × 8@30% BE SQ: 3 × 5@80% HRE	3/6/9/12	90	CMJ
Eroglu et al., 2022 [34]	19.3 ± 1.2	M	A	86.3 ± 5.6 kg-squat	WRE	22	X	Squat	1 × 85%1RM	<1/3/6/9	X	CMJ
Langer et al., 2022 [36]	25 ± 7.3	M	MIX	X	MMA	48	NR	BPU/DBP	MIX	4	X	DBPT
Ferreira et al., 2012 [41]	25 ± 4	M	A	74 ± 8 kg-BP	MIX	11	X	BP	6x@50%1RM	NR	NR	PBPT
Liossis et al., 2013 [42]	26.1 ± 3.4	M	A	83.9 ± 8.4 kg-BP	MIX	9	NR	BP BPT	BP: 5 × 65%/5 × 85%1RM BPT: 3x@30%1RM	4	X	BPT

Table 3. Cont.

Ref.	AGE (M ± SD)	SEX	Level	1RM	D	n	CG	CA	L	RI, min	ISR, s	GPT
Finlay et al., 2022 [33]	19.7 ± 1.2	M	A	X	BOX	10	Y	ERP ISOP	ERP:2 × 5 ISOP:3 × 3s	3	NR	CMJ
Ouergui et al., 2022 [25]	16 ± 1	MIX	A	X	TKD	27	Y	RHIT CMJ	RHIT:3 × 5s CMJ:3 × 5s	<1	SSR	CMJ
Margaritopoulos et al., 2015 [37]	18.4 ± 1.2 (M); 19.2 ± 0.4 (F)	MIX	A	X	KAR	10	X	TJ	3 × 5	<1	30	CMJ
Da Silva Santos et al., 2015 [26]	20.3 ± 5.2	M	E	136.4 ± 30.7 kg. HS	TKD	11	Y	HS HS + J J	HS:3 × 1@95% J:3 × 10@40cm HS + J:3 × 2@95% + 4	5/10/SSR	3/30	CMJ
Pyun et al., 2022 [27]	20.2 ± 1.5	MIX	A	X	TKD	18	X	ISO EXT	%MV varied (10–40%, 40–10%)	NR	X	ISO
Afonso et al., 2021 [40]	19.9 ± 3.3	F	E	53.90 ± 27.2 kg. squat	TW	10	X	Squat	2 × 4@70%1RM	5 min	NR	RAST
Gastro-Gatrido et al., 2020 [28]	20.5 ± 2.38 (A); 24.75 ± 4.27 (E)	M	MIX	X	TKD	8	Y	HS HS + J J	HS:3 × 3@95% HS + J:3 × 2@95% + 4 J:3 × 10	<1/10	3/30	CMJ
da Silva Santos et al., 2016 [12]	20.3 ± 5.2	M	E	132.8 ± 32.5 kg. HS	TKD	9	Y	HS	1 × 3(50%) 1 × 3(90%) 3 × 3(50%) 3 × 3(90%)	10	NR	CMJ
Lum et al., 2019 [35]	16–29	M	A	X	JU	11	Y	ER pull + BJ/BJ	2 × 5 or 3 × 5 BJ/ER pulls	3	X	HPT
Yilmaz et al., 2018 [38]	22.38 ± 4.01	M	A	X	KBOX	15	Y	HS	3 × 3@75%1RM	2	10	ISO
Cimadoro et al., 2018 [39]	20 ± 4	M	A	X	MT	9	NR	Kicks	20 × 1	<1	3	CMJ
Oliviera et al., 2018 [29]	18.6 ± 2.1	MIX	A	NR	TKD	15	X	WBV	1min@26Hz	NR	NR	CMJ
Ouergui et al., 2023 [30]	20.4 ± 1.4	MIX	A	X	TKD	21	Y	RHIT/P	RT:3 × 5s P:3 × 5s(40cm)	3/7/SSR	30/45/SSICMJ	
Boyaci & Kizilet, 2023 [31]	15.17 ± 0.718	F	E	X	TKD	12	X	Squat, TS/CS	TS:3 × 12@75% CS:3 × (4 + 4 + 4)@75%	<1/4/8	180	CMJ

1RM—one maximal repetition test; A—amateur; BE—ballistic exercise; BJ—broad jump; BOX—boxing; BP—bench press; BPT—bench press throw; BPU—ballistic push-up; CG—control group; CMJ—countermovement jump; CS—cluster set; D—discipline; DBPT—dumbbell press test; E—elite; ERP—elastic resistance punch; F—female; GPT—general performance test; HPT—hip power test; HRE—heavy resistance exercise; HS—half-squat; ISO—isokinetic test; ISO EXT—isokinetic extensions; ISOP—isometric punch; ISR—intra-set rest; J—jump; JU—judo; KAR—karate; KBOX—kickboxing; L—load as SETS×REPS@INTENSITY; LSJ—loaded squat jump; LVL—competitive level; M—mean; M—male; MIX—mixed; MT—Muay Thai; n—sample size; NR—not reported; P—plyometrics; PBPT—power bench press test; RAST—running anaerobic sprint test; REF—reference; RHIT—repeated high-intensity techniques; RI—rest intervals; SD—standard deviation; SQ—squat; SSR—self-selected rest interval; TJ—tuck jump; TKD—taekwondo; TS—traditional set; TW—taolo wushu; WBV—whole-body vibration; WRE—wrestling; X—lack of data; Y—yes.

3.4. Meta-Analysis

Nine studies provided sufficient data for inclusion in the meta-analysis. These studies reported the requisite statistical information—such as means and standard deviations—for CMJ performance, which was selected as the primary outcome measure for the meta-analysis due to the limited availability of comprehensive data for the other performance indicators. The meta-analysis was performed on the effects of selected CAs extracted

from each study. The data synthesis process resulted in the inclusion of 62 CAs in the meta-analysis input (Table 4).

Table 4. Conditioning activities of studies included in the meta-analysis.

Author	#	Conditioning Activity/Discipline Competitive Level
Yi et al., 2022 [32]	CA1	Loaded squat jumps $4 \times 8 \times 30\%1RM$, 3 min rest, 90 s, intraset rest/B-A
	CA2	Loaded squat jumps $4 \times 8 \times 30\%1RM$, 6 min rest, 90 s, intraset rest/B-A
	CA3	Loaded squat jumps $4 \times 8 \times 30\%1RM$, 9 min rest, 90 s, intraset rest/B-A
	CA4	Loaded squat jumps $4 \times 8 \times 30\%1RM$, 12 min rest, 90 s, intraset rest/B-A
	CA5	Squat $3 \times 5 \times 80\%1RM$, 3 min rest, 9 -s, intraset rest/B-A
	CA6	Squat $3 \times 5 \times 80\%1RM$, 6 min rest, 90 s, intraset rest/B-A
	CA7	Squat $3 \times 5 \times 80\%1RM$, 9 min rest, 90 s, intraset rest/B-A
	CA8	Squat $3 \times 5 \times 80\%1RM$, 12 min rest, 90 s, intraset rest/B-A
Ouergui et al., 2022 [25]	CA9	Bandal chagui, 3×5 s, 10 min rest, 30 s intraset rest/T-A
	CA10	Bandal chagui, 3×5 s, 10 min rest, 35 s intraset rest/T-A
	CA11	Bandal chagui, 3×5 s, 10 min rest, self-selected intraset rest/T-A
	CA12	Consutive vertical jump, 3×5 s, 10 min rest, 30 s intraset rest/T-A
	CA13	Consecutive vertical jump, 3×5 s, 10 min rest, 35 s intraset rest/T-A
	CA14	Consecutive vertical jump, 3×5 s, 10 min rest, self-selected interset rest/T-A
Margaritopoulos, et al., 2015 [37]	CA15	Tuck jumps, 3×5 , 5 min rest, intraset rest 30 sek (a)/K-A
	CA16	Tuck jumps, 3×5 , 5 min rest, intraset rest 30 sek (b)/K-A
	CA17	Tuck jumps, 3×5 , 5 min rest, intraset rest 30 sek (c)/K-A
	CA18	Control, 5 min rest, (a)/K-A
	CA19	Control, 5 min rest, (b)/K-A
	CA20	Control, 5 min rest, (c)/K-A
Da Silva Santos, et al., 2015 [26]	CA21	Half squat, $3 \times 1 \times 95\%1RM$, 5 min rest, 3 min interset rest/T-E
	CA22	Half squat, $3 \times 1 \times 95\%1RM$, 10 min rest, 3 min interset rest/T-E
	CA23	Half squat, $3 \times 1 \times 95\%1RM$, self-selected rest, 3 min interset rest/T-E
	CA24	Jumps, 3×10 , 5 min rest, 30 s interset rest/T-E
	CA25	Jumps, 3×10 , 10 min rest, 30 s interset rest/T-E
	CA26	Jumps, 3×10 , self-selected rest, 30 s interset rest/T-E
	CA27	Half squat + jumps, $3 \times 2 \times 95\%1RM + 4$, 5 min rest, 3 min interset rest/T-E
	CA28	Half squat + jumps, $3 \times 2 \times 95\%1RM + 4$, 10 min rest, 3 min interset rest/T-E
	CA29	Half squat + jumps, $3 \times 2 \times 95\%1RM + 4$, self-selected rest, 3 min interset rest/T-E
Da Silva Santos, et al., 2016 [12]	CA30	Half-squat, $1 \times 3 \times 50\%1RM$, 10 min rest/T-E
	CA31	Half-squat, $1 \times 3 \times 90\%1RM$, 10 min rest/T-E
	CA32	Half-squat, $3 \times 3 \times 50\%1RM$, 10 min rest/T-E
	CA33	Half-squat, $3 \times 3 \times 90\%1RM$, 10 min rest/T-E

Table 4. Cont.

Author	#	Conditioning Activity/Discipline Competitive Level
Cimadoro, et al., 2018 [39]	CA34	Roundhouse kicks, 20 × 1, 0 min rest, 1 s interset rest/M-A
	CA35	Roundhouse kicks, 20 × 1, 5 min rest, 1 s interset rest/M-A
	CA36	Roundhouse kicks, 20 × 1, 10 min rest, 1 s interset rest/M-A
	CA37	Roundhouse kicks, 20 × 1, 20 min rest, 1 s interset rest/M-A
	CA38	Roundhouse kicks, 20 × 1, 30 min rest, 1 s interset rest/M-A
	CA39	Roundhouse kicks, 20 × 1, 0 min rest, 3 s interset rest/M-A
	CA40	Roundhouse kicks, 20 × 1, 5 min rest, 3 s interset rest/M-A
	CA41	Roundhouse kicks, 20 × 1, 10 min rest, 3 s interset rest/M-A
	CA42	Roundhouse kicks, 20 × 1, 20 min rest, 3 s interset rest/M-A
	CA43	Roundhouse kicks, 20 × 1, 30 min rest, 3 s interset rest/M-A
Oliviera, et al., 2018 [29]	CA44	Whole-body vibration 1 × 1 min × 26 hz/T-A
	CA45	Bandal chagui, 3 × 5 s, 3 min rest, 30 s intraset rest/T-A
	CA46	Bandal chagui, 3 × 5 s, 3 min rest, 45 s intraset rest/T-A
	CA47	Bandal chagui, 3 × 5 s, 3 min rest, self-selected intraset rest/T-A
	CA48	Consecutive vertical jump, 3 × 5 s, 3 min rest, 30 s intraset rest/T-A
	CA49	Consecutive vertical jump, 3 × 5 s, 3 min rest, 45 s intraset rest/T-A
	CA50	Consecutive vertical jump, 3 × 5 s, 3 min rest, self-selected interset rest/T-A
	CA51	Bandal chagui, 3 × 5 s, 7 min rest, 30 s intraset rest/T-A
	CA52	Bandal chagui, 3 × 5 s, 7 min rest, 45 s intraset rest/T-A
	CA53	Bandal chagui, 3 × 5 s, 7 min rest, self-selected intraset rest/T-A
	CA54	Consecutive vertical jump, 3 × 5 s, 7 min rest, 30 s intraset rest/T-A
Ouerghi et al., 2023 [30]	CA55	Consecutive vertical jump, 3 × 5 s, 7 min rest, 45 s intraset rest/T-A
	CA56	Consecutive vertical jump, 3 × 5 s, 7 min rest, self-selected interset rest/T-A
	CA57	Squat, 3 × 12 × 75%1RM, 30 s rest, 180 s interset/T-E
	CA58	Squat, 3 × 12 × 75%1RM, 4-min rest, 180 s interset/T-E
	CA59	Squat, 3 × 12 × 75%1RM, 8-min rest, 180 s interset/T-E
	CA60	Squat, 3 × (4 + 4 + 4) × 75%1RM, 30-s rest, 180 s interset/T-E
	CA61	Squat, 3 × (4 + 4 + 4) × 75%1RM, 4 min rest, 180 s interset/T-E
	CA62	Squat, 3 × (4 + 4 + 4) × 75%1RM, 8 min rest, 180 s interset/T-E
Boyaci and Kizilet., 2023 [31]		

1RM—one maximal repetition test; combat sport: B—boxing, K—karate, M—Muay Thai, T—taekwondo; competition level: A—amateur, E—elite; CA—conditioning activity.

Significant heterogeneity was found among the included studies, with an I^2 greater than 40% for the outcomes analyzed, hence the decision to use a random effects model. A meta-analysis of the ES was performed, and forest plots were used to describe the ES. Individual results for each of the 62 cases from the nine studies included in the meta-analysis are presented in terms of ES and 95%CI, together with pooled results for all the studies, where the size of the boxes is proportional to the study sample size. The total sample size is 866. The pooled mean for the ES was 0.136 (95% CI, 0.008–0.263) (Figure 2, Table 5). It was found that in the 25 CAs, the mean for the ES was higher than the pooled mean of the ES, especially for Oergui et al. [30] and Boyaci and Kizilet [31], all of them for

taekwondo. It was found that in the 35 CAs, the mean for the ES was lower than the pooled mean of the ES, especially for Cimadoro, et al. [39].

Table 5. Overview of the meta-analysis encompassing all disciplines.

Name	Sample Size	ES	SE	$\pm 95\%CI$	Z-Statistic	p-Value	Variance	Weight
CA1	10	−0.2	0.45	−1.08; 0.68	−0.44	0.66	0.20	3.28
CA2	10	0	0.45	−0.88; 0.88	0.00	1.00	0.20	3.28
CA3	10	0.03	0.45	−0.85; 0.91	0.07	0.95	0.20	3.28
CA4	10	−0.02	0.45	−0.90; 0.86	−0.04	0.96	0.20	3.28
CA5	10	−0.02	0.45	−0.90; 0.86	−0.04	0.96	0.20	3.28
CA6	10	−0.06	0.45	−0.94; 0.82	−0.13	0.89	0.20	3.28
CA7	10	0.03	0.45	−0.85; 0.91	0.07	0.95	0.20	3.28
CA8	10	−0.04	0.45	−0.92; 0.84	−0.09	0.93	0.20	3.28
CA9	27	0.09	0.27	−0.44; 0.84	0.33	0.74	0.07	5.70
CA10	27	0.09	0.27	−0.44; 0.62	0.33	0.74	0.07	5.70
CA11	27	0.14	0.27	−0.39; 0.67	0.52	0.60	0.07	5.70
CA12	27	−0.21	0.27	−0.74; 0.32	−0.78	0.44	0.07	5.70
CA13	27	0.23	0.27	−0.30; 0.76	0.85	0.39	0.07	5.70
CA14	27	−0.04	0.27	−0.57; 0.49	−0.15	0.88	0.07	5.70
CA15	10	0.17	0.45	−0.71; 1.05	0.38	0.71	0.20	3.28
CA16	10	0	0.45	−0.88; 0.88	0.00	1.00	0.20	3.28
CA17	10	0.14	0.45	−0.74; 1.02	0.31	0.76	0.20	3.28
CA18	10	−0.2	0.45	−1.08; 0.68	−0.44	0.66	0.20	3.28
CA19	10	−0.22	0.45	−1.10; 0.66	−0.49	0.62	0.20	3.28
CA20	10	−0.37	0.45	−1.25; 0.51	−0.82	0.41	0.20	3.28
CA21	11	−0.06	0.43	−0.90; 0.78	−0.14	0.89	0.18	3.48
CA22	11	0	0.43	−0.84; 0.84	0.00	1.00	0.18	3.48
CA23	11	−0.11	0.43	−0.95; 0.73	−0.26	0.80	0.18	3.48
CA24	11	−0.17	0.43	−1.01; 0.67	−0.40	0.69	0.18	3.48
CA25	11	−0.16	0.43	−1.00; 0.68	−0.37	0.71	0.18	3.48
CA26	11	0.19	0.43	−0.65; 1.03	0.44	0.66	0.18	3.48
CA27	11	0.04	0.43	−0.80; 0.88	0.09	0.93	0.18	3.48
CA28	11	0.17	0.43	−0.67; 1.01	0.40	0.69	0.18	3.48
CA29	11	0.19	0.43	−0.65; 1.03	0.44	0.66	0.18	3.48
CA30	9	−0.19	0.47	−1.11; 0.73	−0.40	0.69	0.22	3.09
CA31	9	0.08	0.47	−0.84; 1.00	0.17	0.86	0.22	3.09
CA32	9	−0.31	0.47	−1.23; 0.61	−0.66	0.51	0.22	3.09
CA33	9	0.17	0.47	−0.75; 1.09	0.36	0.72	0.22	3.09
CA34	9	−0.53	0.48	−1.47; 0.41	−1.10	0.27	0.23	3.00
CA35	9	−0.24	0.47	−1.16; 0.68	−0.51	0.61	0.22	3.09
CA36	9	−0.37	0.48	−1.31; 0.57	−0.77	0.44	0.23	3.00

Table 5. Cont.

Name	Sample Size	ES	SE	±95%CI	Z-Statistic	p-Value	Variance	Weight
CA37	9	−0.95	0.5	−1.93; 0.03	−1.90	0.06	0.25	2.84
CA38	9	−1.36	0.52	−2.38; −0.34	−2.62	0.009 *	0.27	2.68
CA39	9	−0.37	0.48	−1.31; 0.57	−0.77	0.44	0.23	3.00
CA40	9	−0.31	0.47	−1.23; 0.61	−0.66	0.51	0.22	3.09
CA41	9	−0.71	0.49	−1.67; 0.25	−1.45	0.15	0.24	2.92
CA42	9	−1.14	0.51	−2.14; −0.14	−2.24	0.025 *	0.26	2.76
CA43	9	−1.33	0.52	−2.35; −0.31	−2.56	0.011 *	0.27	2.68
CA44	15	0.02	0.37	−0.71; 0.75	0.05	0.96	0.14	4.18
CA45	21	0.23	0.31	−0.38; 0.84	0.74	0.46	0.10	5.04
CA46	21	0.66	0.32	0.03; 1.29	2.06	0.039 *	0.10	4.88
CA47	21	0.84	0.32	0.21; 1.47	2.63	0.009 *	0.10	4.88
CA48	21	0.53	0.31	−0.08; 1.14	1.71	0.09	0.10	5.04
CA49	21	0.93	0.32	0.30; 1.56	2.91	0.004 *	0.10	4.88
CA50	21	0.95	0.33	0.30; 1.60	2.88	0.004 *	0.11	4.73
CA51	21	1.19	0.33	0.54; 1.84	3.61	0.000 *	0.11	4.73
CA52	21	0.93	0.32	0.30; 1.56	2.91	0.004 *	0.10	4.88
CA53	21	0.81	0.32	0.18; 1.44	2.53	0.011 *	0.10	4.88
CA54	21	0.82	0.32	0.19; 1.45	2.56	0.010 *	0.10	4.88
CA55	21	0.65	0.32	0.02; 1.28	2.03	0.042 *	0.10	4.88
CA56	21	0.7	0.32	0.07; 1.33	2.19	0.029 *	0.10	4.88
CA57	12	0.04	0.41	−0.76; 0.84	0.10	0.92	0.17	3.70
CA58	12	0.38	0.41	−0.42; 1.18	0.93	0.35	0.17	3.70
CA59	12	0.21	0.41	−0.59; 1.01	0.51	0.61	0.17	3.70
CA60	12	0.53	0.42	−0.29; 1.35	1.26	0.21	0.18	3.59
CA61	12	1.07	0.44	0.21; 1.93	2.43	0.015 *	0.19	3.38
CA62	12	0.34	0.41	−0.46; 1.14	0.83	0.41	0.17	3.70
Total	866	0.136	0.065	0.008; 0.263	2.090	0.037 *		

CA—conditioning activity; ES—effect size; SE—standard error; ±95%CI—confidence interval (lower; upper); *—statistical significance.

The results of the meta-analysis conducted for each discipline confirmed the findings previously obtained for the entire sample. The pooled mean Hedges' effect size was 0.131 (95% CI, −0.044–0.280) (Figure 3, Table 6). In 11 reports, the mean ES exceeded the pooled mean, most notably in the studies by Oergui et al. [30] and Boyaci and Kizilet [31], both of which examined taekwondo. Conversely, the mean ES was lower than the pooled mean in three reports, most notably in the study by Cimadoro et al. [39], which focused on roundhouse kicks (20 × 1). The analysis further showed that for Muay Thai, the Hedges' effect was significantly lower at −0.70 (95% CI, −1.01–−0.397) compared to the overall mean Hedges' effect of 0.131 (95% CI, 0.024–0.239). In addition, an ANOVA was conducted for each discipline and across groups. The results confirmed significant differences between disciplines ($F = 44.61$; $df = 3$; $p < 0.0001$) and overall ($F = 102.55$; $df = 61$; $p = 0.001$).

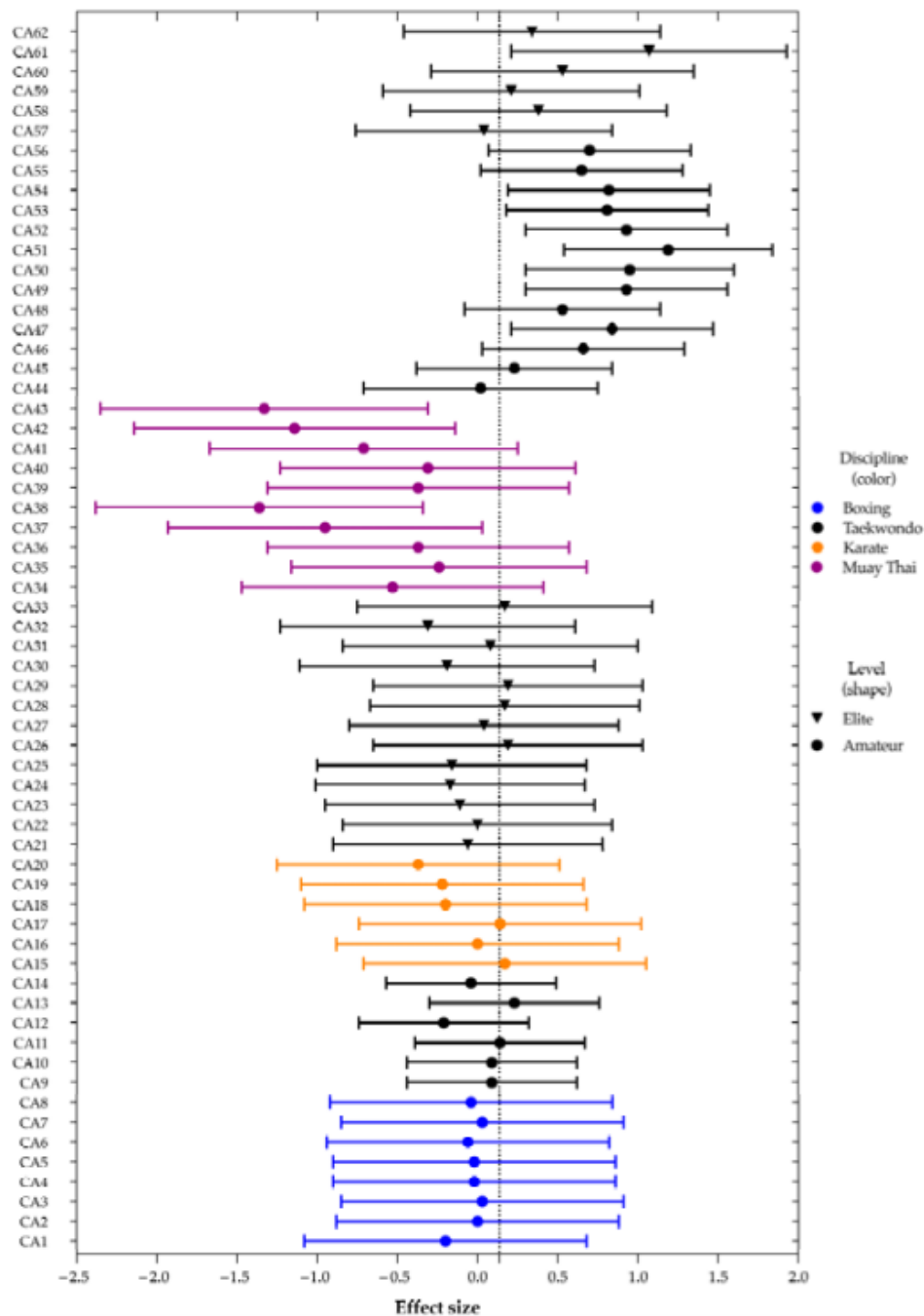


Figure 2. Forest plot for general outcomes. Random effects model showing Hedges' effect for each of the 62 included cases from the 9 studies and pooled for all. Pooled mean for Hedges' effect 0.136 (95% CI, 0.008–0.263); $I^2 = \%$ (40.81%; CI 95% 19.61–56.43%). Size boxes are proportional to study sample size.

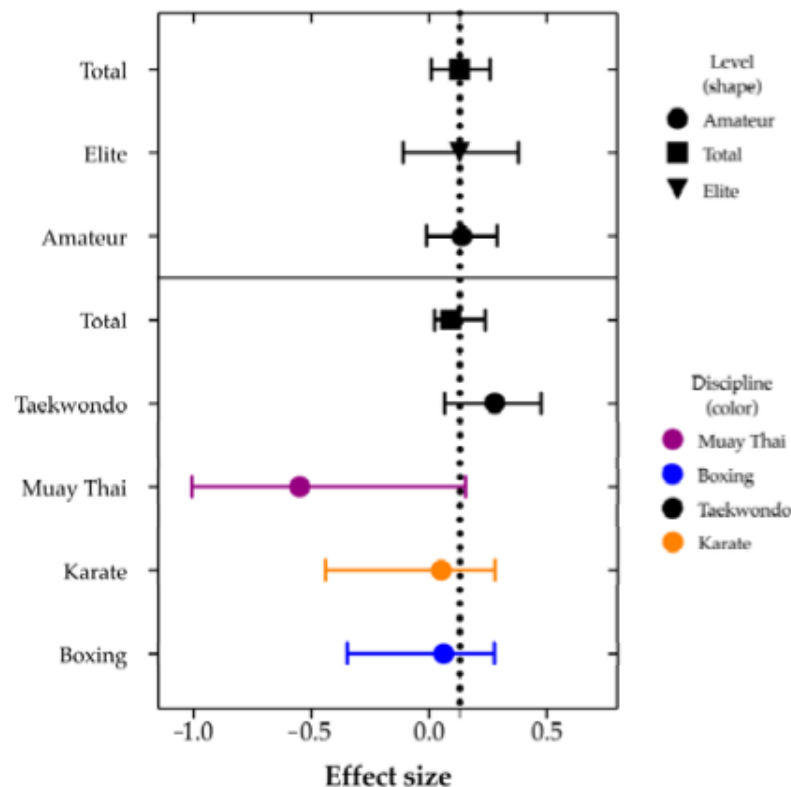


Figure 3. Forest plot (random effects model) showing aggregated Hedges' effect sizes by discipline and competitive level for each of the 62 included cases from 9 studies, as well as the pooled estimate for all cases. The pooled mean Hedges' effect sizes were 0.131 (95% CI, −0.044–0.280) and 0.13 (95% CI, 0.01–0.25), respectively. The size of the squares is proportional to the study sample size. Nine studies, as well as the pooled estimate for all cases.

Table 6. Overview of the meta-analysis by discipline—aggregated view.

Name	Sample Size	ES	SE	±95%CI	Z-Statistic	p-Value	Variance	Weight
Boxing	80	−0.035	0.159	−0.347; 0.277	−0.220	0.826	0.025	39.506
Karate	60	−0.080	0.184	−0.440; 0.280	−0.435	0.663	0.034	29.630
Muay Thai	90	−0.701	0.155	−1.006; −0.397	−4.517	0.00001 *	0.024	41.481
Taekwondo	636	0.346	0.067	0.214; 0.477	5.137	<0.000001 *	0.005	220.925
Total	866	0.131	0.055	0.024; 0.239	2.389	0.017 *		

CA—conditioning activity; ES—effect size; SE—standard error; ±95%CI—confidence interval (lower; upper); *—statistical significance.

The results of the meta-analysis by competitive level confirmed the findings previously obtained for the entire sample. The pooled mean of the ES was 0.13 (95% CI, 0.01–0.26) (Figure 3, Table 7). For 11 reports, the mean Hedges' effect size exceeded the pooled mean, particularly in the studies by Oergui et al. [30] and Boyaci and Kizilet [31], which focused on taekwondo (10 amateur and 1 elite). Conversely, in three reports, the mean Hedges' effect size was lower than the pooled mean, notably in the study by Cimadoro et al. [39]

examining roundhouse kicks (20×1) at the amateur level. Additionally, an ANOVA was performed by competitive level, as well as within and between groups. This analysis did not reveal any statistically significant differences ($p > 0.05$).

Table 7. Overview of the meta-analysis by competitive level—aggregated view.

Name	Sample Size	ES	SE	$\pm 95\%$ CI	Z-Statistic	p-Value	Variance	Weight	Contribution
Amateur	659	0.14	0.08	−0.01; 0.29	1.77	0.08	0.01	169.53	0.72
Elite	207	0.13	0.12	−0.11; 0.38	1.06	0.29	0.02	64.69	0.28
Total	866	0.13	0.07	0.01; 0.26	2.06	0.039 *			

CA—conditioning activity; SE—standard error; $\pm 95\%$ CI—confidence interval (lower; upper); *—statistical significance.

4. Discussion

After a CA, the potentiation effect is ambiguous and dependent on variables related to training experience, the potentiation procedure, and the practiced combat sports discipline. Despite numerous studies, a precise consensus regarding the optimal acute conditioning mode protocol for recreationally trained, trained, and athletic populations has yet to be formed. To address this knowledge gap, we conducted a meta-analysis of nine studies (62 CAs) to quantitatively identify which conditioning protocol components (type of exercise, intensity, and volume) optimize general performance indicators in combat sports athletes, and how these variables are affected by competitive status and combat sports discipline.

This study specifically addressed key questions central to power development in combat sports: (a) Which CA protocols effectively elicit PAPE in athletes? (b) How do various combat disciplines—including taekwondo, boxing, Muay Thai, judo, wrestling, and karate—respond to these protocols? (c) What is the most sensitive performance test for capturing the PAPE effect? (d) Does the competitive level modulate the magnitude of the PAPE response? The present findings underscore that dynamic, sport-specific protocols—exemplified by the bandal chagui method in taekwondo—consistently yield substantial improvements in explosive performance, as measured by the CMJ. In contrast, certain protocols in disciplines like Muay Thai may even reduce performance, highlighting the critical importance of aligning CAs with the neuromuscular and biomechanical demands specific to each combat sport. Moreover, while both amateur and elite athletes exhibit PAPE responses, the variability observed suggests that competitive level and training status must be carefully considered when designing and implementing these interventions.

In addressing the first research question, our meta-analysis revealed that PAPE protocols, overall, produced a pooled effect size of 0.136 (95% CI, 0.008–0.263). Notably, protocols that combined dynamic actions—such as repeated vertical jumps with adequate recovery (3–7 min of rest)—with heavy-resistance cluster sets (performed at 75% 1RM with optimized intra- and inter-set rests) were particularly effective. These dynamic protocols are likely more effective because they closely mimic the explosive movements inherent in combat sports.

Regarding discipline-specific responses, the data show that taekwondo athletes experienced the most pronounced enhancements in CMJ performance. This is likely due to the sport's emphasis on rapid, explosive lower-body actions, as supported by the work of da Silva Santos et al. [12]. Conversely, in Muay Thai, highly specific CAs—such as roundhouse kicks—appeared to be detrimental to performance, suggesting that not all sport-specific techniques translate into a positive PAPE response.

When considering the sensitivity of performance tests, the CMJ emerged as the most frequently employed and reliable measure across studies. Its responsiveness to changes in explosive power makes it an ideal tool for assessing the PAPE effect in combat sports, where rapid force production is paramount.

Finally, analysis by competitive level revealed pooled effect sizes of 0.14 (95% CI, −0.01 to 0.29) for amateur athletes and 0.13 (95% CI, −0.11 to 0.38) for elite athletes, with no statistically significant differences between these groups. This finding suggests that while competitive status influences PAPE outcomes, the design of the conditioning protocol—particularly in relation to rest intervals and exercise specificity—plays a critical role in determining the magnitude of performance enhancement.

4.1. Main Findings

The primary findings of this study were that not all types of conditioning were effective in enhancing general performance variables. The most considerable body of scientific data pertains to the use of CA in the context of performance enhancement, as measured by the CMJ. For example, Boyaci and Kizilet [31] demonstrated that utilizing a cluster set (three sets) in the barbell squat at a 75% 1RM load with a 4 min rest between sets and a 3 min interval within the series yielded the most pronounced enhancement in distance in the jump test relative to the conventional sets type. In comparison, in a study by Ouerghi et al. [30], improvements in general performance were seen after a dynamic type of potentiation. Participants performed three sets of repeated vertical jumps (5 s of consecutive jumps). The largest PAPE effect was observed with a 45 s intra-set and self-selected intra-set rest with a 3 min rest between sets.

In contrast, Ferreira et al. [41] found no additional effect on mean and peak power when performing a power bench press after completing six reps at 50% 1RM in the same exercise. It appears that one set may not be sufficient to achieve the PAPE effect. In another study, five sets of bench presses improved performance in bench press throw on 30% 1RM [42]. A positive effect was noticed after five sets on 65% 1RM with a 4 min rest, as well as after five sets on 85% 1RM with both a 4 and 8 min rest between sets. However, these studies were not included in the meta-analysis due to the different type of test assessing general performance and insufficient evidence for inclusion. Different outcomes with various strategies emphasize the importance of analyzing the PAPE methodology, especially since a variety of strength-training concepts for athletes are widely recognized in the literature [43]. The importance of defining appropriate training modalities for each combat sport cannot be overemphasized, as this aspect of the sport is often neglected, leading to suboptimal results [44].

Nevertheless, the greatest positive effect was observed for the specific type of potency that is bandal chagui, in the form of three sets with a 7 min rest between sets and a 30 s intra-set rest. It is also worth noting that the specific form of potentiation associated with one series of 20 roundhouse kicks with a 30 min rest and 3 s intra-set rest resulted in a deterioration in general performance ($ES = 1.36$; $p = 0.009$) [39]. The findings suggest the necessity for the examination of efficacious potentiation techniques, specifically in the context of resistance training, across a range of high-intensity and dynamic activities, such as repeated jumps under conditions where no positive effect of potentiation was observed.

Overall, the results of our meta-analysis indicate that dynamic, sport-specific conditioning protocols produce superior PAPE effects compared to traditional heavy-resistance approaches. In particular, the bandal chagui protocol, exemplified by CA51—which involves three 5 s bouts with 7 min rest intervals and a 30 s intraset recovery in taekwondo athletes—produced an effect size of 1.19 ($p < 0.001$). This finding suggests that such dynamic protocols, which closely mimic the explosive movement patterns inherent to martial

arts, may be more effective in priming the neuromuscular system. Other dynamic protocols, such as those involving consecutive vertical jumps (CA54–CA56), showed effect sizes ranging from 0.82 to 0.95, further supporting the efficacy of sport-specific conditioning in producing pronounced performance improvements. In contrast, heavy-resistance protocols—such as those examined by Boyaci and Kizilet [31] (CA57–CA62)—achieved slightly lower effect sizes; for example, CA61, a squat-based cluster set performed at 75% 1RM with a 4 min rest between cluster sets and a 180 s recovery between sets, yielded an effect size of 1.07.

In conclusion, although both dynamic and high-resistance CAs can facilitate PAPE, our results suggest that dynamic protocols—particularly the bandal chagui method—may provide a slightly superior stimulus for improving explosive performance in kicking martial arts.

4.2. The Competitive Level Factor

The meta-analysis of the data relating to the effect of the competitive level factor indicated inconclusive results. In the context of amateur athletes, the influence of potentiation can lead to either enhanced or diminished general performance. A reduction in athletic performance as measured by CMJ was noted in amateur Muay Thai athletes as a result of performing a specific form of warm-up [39]. A possible factor in the changes obtained could be the high volume of technical–tactical training associated with the execution of movement sequences similar to the exercise used as a form of potentiation. Perhaps the effectiveness of a CA is closely linked to its specificity to the performance measure being assessed; aligning the CA with the particular neuromuscular and biomechanical demands of the sport may optimize the PAPE effect [16,45]. Although achieving such a specificity may not always be feasible, this consideration underscores the importance of tailoring PAPE protocols to the unique performance requirements inherent to combat sports, thereby reinforcing their relevance as outlined earlier. In a study by Oergui et al. [30], the results demonstrated that the performance in all tests exhibited a notable improvement following the implementation of conditioning in amateur taekwondo athletes when compared to the control condition. It can be observed that plyometric exercises tend to favor a rest period of approximately three minutes, regardless of the effort-to-pause ratio employed. Conversely, repeated high-intensity techniques appear to favor a longer rest period, of around seven minutes, particularly when ratios of 1:6 and 1:9 are utilized. The superiority of longer intervals in inducing the PAPE effect could be a result of positive balance between fatigue and neuromuscular potentiation and the intensity of the load used [46]. This finding is consistent with the aforementioned results. For elite combat sports athletes, it appears that CA may improve general performance or show no effect at all. Heavy barbell squats were found to have a positive influence on the height of the CMJ test in elite taekwondo athletes [31]. In summary, these findings suggest that the optimal PAPE response is highly contingent on both the athlete's competitive level and the specific CA employed, with amateurs exhibiting more variable outcomes and elite athletes tending to respond more consistently to high-load protocols.

In addition, Langer et al. [36] showed that amateurs achieved greater force and RPD results after the ballistic push-up as an activation exercise performed at 50% 1RM, whereas force and RPD were greater at RFD at 65% 1RM. For elites, the highest force was achieved at 80% 1RM, power at 50% 1RM, and RFD and RPD at 80% 1RM. In comparison, Castro-Garrido et al. [28] indicated that the CMJ did not significantly differ between athletes nor between the intervention, competitive level, or conditions, which were a half-squat on 95%1RM with three sets of three reps, three sets of 10 jumps, or a combination of both exercises. In another study, an elastic resistance pull exercise combined with broad

jumps resulted in greater peak power during the high-pull test compared to a protocol that focused solely on lower-body conditioning [35]. This finding reinforces the importance of aligning the CA with the specific performance measure. Since the high-pull test primarily engages the upper body, incorporating an upper body-focused CA appears to be more effective than simply increasing the total volume of activity or involving a greater number of muscle groups.

In the other studies included in the meta-analysis, no improvement in physical performance was observed in elite athletes. However, it is doubtful that this would lead to a deterioration in their athletic performance. The competitive level can therefore potentially influence the PAPE effect. Individuals with a lower level of experience can achieve significant improvement in physical performance but also a decline in performance. This may possibly be attributed to the balance between the mechanical properties of PAPE and the accumulation of fatigue resulting from high-intensity exercise [8]. For example, Wilson et al. [47] indicate that individuals with little training experience showed a decrease in power of approximately 120% when performing multiple sets compared to single sets. In contrast, trained individuals and experienced athletes increased their power by approximately 104% and 320%, respectively, when performing multiple versus single sets. Chronic resistance training improves fatigue resistance by increasing buffering capacity [48,49] and overall resistance to skeletal muscle injury [50]. These data suggest that when transitioning from single to multiple sets in less trained individuals, CA may cause significantly more fatigue than the PAPE effect can overcome. However, in our study, this cannot be unequivocally confirmed and is only a presumption.

In addition to the level of fitness itself, it is worth considering the potential impact of the personal profile related to muscle fiber composition [51], which could potentially be correlated with fitness level [52]. The post-activation enhancement effect is greater in fast-twitch fibers [53], which have lower basal calcium ion sensitivity [54,55] and greater myosin light chain kinase activity than slow-twitch fibers [53]. This, however, remains in the realm of speculation, as the studies included did not verify muscle fiber composition. Attempting to estimate muscle fiber composition may be a suggestion for future research projects that may try to directly characterize athletes via muscle biopsy [56,57] or indirectly, for example via tensiomyography [58,59].

4.3. The Discipline Factor

The above considerations should also include the impact of the combat sports discipline on susceptibility to the PAPE effect. The performance enhancement effect was observed in taekwondo athletes when sports discipline was taken as a differentiating factor, whereas deterioration in physical performance was noted in Muay Thai athletes. In the case of boxing and karate, the effect related to the influence of potentiation was not statistically significant, regardless of whether this referred to an improvement or worsening of general performance. Nevertheless, it would be prudent to maintain skepticism in ascribing the influence of the specific discipline as a determinant of the PAPE effect. In fact, the data on Muay Thai fighters are derived from a study where the potentiation exercises were related to the execution of roundhouse kicks. Taekwondo was the most studied discipline with the highest number of CAs. The result may therefore be more an effect of the type of CA rather than the type of sport. The authors suggest adapting taekwondo's CAs to other combat sports disciplines to make more consistent conclusions. Furthermore, the participants were amateurs, which, when considered alongside the nature of the activity, may have exerted an influence on the outcomes observed. It is possible that a different form of exercise, for instance, one that incorporates high-intensity resistance training, might have yielded entirely disparate results. The PAPE effect has been observed in taekwondo athletes;

however, the majority of the results have been reported by Oergui et al. [30] with the bandal chagui and consecutive vertical jump protocols previously discussed. It would appear that greater consideration should be given to the type of exercise undertaken and the level of training experience, rather than the specific sport, when examining the PAPE effect.

Reliably evoking the PAPE response arises from a careful balance between the athlete's training experience, their achieved strength level, the intensity of the CA, and the duration of the subsequent rest period. Crucially, the specific combat sport discipline also plays a pivotal role in determining the effectiveness of PAPE protocols. In practice, substantial differences in jump height have been documented across various disciplines [60], with the magnitude of these differences ranging from negligible to exceptionally large. These variations highlight that the neuromuscular and biomechanical demands inherent to each sport can markedly influence the response to PAPE interventions. Consequently, it is essential to customize the CA to meet the unique demands of each discipline and to fine-tune the rest intervals accordingly, as deviations from the optimal duration may lead to fatigue accumulation and a diminished PAPE effect [5,47,61,62].

4.4. Limitations

It should be noted that this study is not without limitations. Firstly, the number of included studies was relatively limited ($n = 9$), which restricts the generalizability of the findings. The included studies primarily investigated a limited range of CAs, thereby leaving several potential variations (e.g., isometric potentiation, plyometric variations) underexplored. Secondly, the heterogeneity of methodologies across the studies (e.g., differences in testing protocols, rest intervals, and exercise selection) may have introduced variability, limiting the precision of the meta-analysis. Furthermore, discrepancies in competition status (amateur vs. elite), specific combat sports disciplines, and inconsistencies in participant characteristics (e.g., age, sex, and experience) may have introduced confounding variables. Moreover, the use of general performance measures, such as CMJ, may not fully represent the overall performance in combat sports, which is multifaceted. In addition, the observed results may have been influenced by variations in study design, particularly the use of small sample sizes and an inconsistent statistical power across the included studies.

It is noteworthy that many of the included studies employed relatively low loads in their CAs. This choice likely reflects a strategic attempt to balance the potentiation benefits with the risk of inducing excessive fatigue, which can negate the acute performance enhancements associated with PAPE. Lower loads may allow for sufficient neuromuscular activation while minimizing fatigue, particularly in protocols targeting explosive movements like the countermovement jump. However, this approach also raises questions about the potential trade-offs in maximizing muscle activation versus avoiding fatigue, especially when considering the different demands of various combat sports.

One potential limitation of our study is related to the participant group in Ferreira et al. [41]. Although the protocol used in this study is typical for team and combat sports, the subjects were not competitive athletes. Without further clarification from the original authors, it is not possible to fully verify that these participants meet our inclusion criteria for healthy, competitive athletes. Consequently, caution is warranted when interpreting the findings from this study in relation to competitive athlete populations.

4.5. Practical Applications

From a practical standpoint, the findings of this study offer insights for coaches and practitioners engaged in the training of combat sports athletes. CAs must be meticulously tailored to the athlete's competition level and specific objectives. For amateur athletes, dynamic potentiation exercises such as repeated vertical jumps appear to be an effective

method, provided that adequate rest intervals of approximately three minutes are observed. For elite athletes, the incorporation of heavy-resistance exercises, including barbell squats, may prove beneficial in enhancing performance, although it is essential to exercise caution in managing fatigue. It is of the utmost importance to optimize rest intervals, as plyometric exercises tend to favor shorter rest periods, while repeated high-intensity techniques require longer durations of recovery to achieve the desired PAPE effect.

The specific type of exercise is also a significant factor to be considered. Sport-specific dynamic activities, such as roundhouse kicks, have the potential to enhance performance. However, if the protocol is not properly designed, there is a risk of fatigue accumulation and a subsequent deterioration in performance. It is incumbent upon coaches to exercise discernment in the selection and testing of CAs, to identify those that are most suited to their athletes. While the results of this study do not definitively indicate discipline-specific effects, positive responses have been consistently observed in taekwondo athletes. It is recommended that coaches in other combat sports, such as Muay Thai, boxing, and karate, investigate conditioning protocols that integrate both resistance training and plyometric exercises.

4.6. Future Directions

It is recommended that future research addresses the limitations identified above by incorporating several key areas. Firstly, studies utilizing larger, more diverse cohorts are required to enhance their statistical power and improve the generalizability of their findings. The development of standardized protocols for potentiation procedures, including the implementation of consistent rest intervals, effort-to-pause ratios, and CA intensity, will assist in reducing the variability observed across studies. A further avenue for research would be to investigate the differences in PAPE effects across competition levels, namely novice, trained, and elite athletes. This would enable a deeper understanding of the interplay between training experience, fitness, and potentiation responses.

Furthermore, combat sport-specific analyses should be expanded to explore the influence of multiple conditioning protocols on general indicators. Longitudinal studies examining the chronic effects of repeated potentiation sessions over extended training cycles will be crucial to determining their long-term impact on combat sports performance. To gain a comprehensive understanding of the effects of potentiation on combat sports performance, it is essential to incorporate a range of performance measures, including assessments of strength, power, reaction time, and endurance. This will enable researchers to capture the multidimensional nature of combat sports demands. Finally, future research should continue to investigate the balance between fatigue and potentiation, focusing on the physiological mechanisms that underlie the PAPE effect in various conditioning scenarios. Future research could also make an attempt to explore whether slightly higher loads—while carefully managing recovery—could further optimize the PAPE response without compromising performance, particularly in elite athletes whose training status might permit more aggressive loading strategies.

Author Contributions: Conceptualization, A.T. and K.S.; methodology, A.T. and M.K.; software, A.T.; validation, A.T., K.S. and M.K.; formal analysis, A.T. and K.S.; investigation, A.T. and K.S.; resources, A.T., J.C. and V.K.; data curation, A.T. and M.K.; writing—original draft preparation, A.T. and K.S.; writing—review and editing, A.T., M.K., J.C. and R.R.; visualization, A.T. and K.S.; supervision, A.T., J.C. and R.R.; project administration, A.T. and R.R. All authors have read and agreed to the published version of the manuscript.

Funding: This research received no external funding.

Data Availability Statement: The data supporting the findings of this study are available upon reasonable request from the corresponding author.

Conflicts of Interest: The authors declare no conflicts of interest.

Abbreviations

The following abbreviations are used in this manuscript:

PAPE	Post-activation performance enhancement
PAP	Post-activation potentiation
CMJ	Countermovement jump
MVIC	Maximum voluntary isometric contraction
MRIC	Myosin regulatory light chain
RCT	Randomized controlled trial
PEDro	Physiotherapy Evidence Database
1RM	One-repetition maximum
MMA	Mixed martial arts
RFD	Rate of force development
LSJ	Loaded squat jump
BP	Bench press
BPT	Bench press throw
BPU	Ballistic push-up
HS	Half-squat
ISOP	Isometric punch
ISR	Intra-set rest
SSR	Self-selected rest
TW	Taolu wushu
HRE	Heavy-resistance exercise
HPT	Hip power test
PBPT	Power bench press test
RAST	Running anaerobic sprint test
DBPT	Dumbbell press test

References

- Andreato, L.V.; Lara, F.J.D.; Andrade, A.; Branco, B.H.M. Physical and physiological profiles of Brazilian jiu-jitsu athletes: A systematic review. *Sports Med. Open* **2017**, *3*, 9. [\[CrossRef\]](#) [\[PubMed\]](#)
- Bouhlel, E.; Jouini, A.; Gmada, N.; Abdallah, K.B.; Tabka, Z. Heart rate and blood lactate responses during Taekwondo training and competition. *Sci. Sports* **2006**, *21*, 285–290. [\[CrossRef\]](#)
- Sobkiewicz, P.; Frank, R.H.; Biondo, A.E.; Pluchino, A.; Rapisarda, A. Inequalities, chance and success in sport competitions: Simulations vs empirical data. *Phys. A Stat. Mech. Appl.* **2020**, *557*, 124899. [\[CrossRef\]](#)
- Suchomel, T.J.; Nimphius, S.; Stone, M.H. The importance of muscular strength in athletic performance. *Sports Med.* **2016**, *46*, 1419–1449. [\[CrossRef\]](#) [\[PubMed\]](#)
- Sale, D.G. Postactivation potentiation: Role in human performance. *Exerc. Sport Sci. Rev.* **2002**, *30*, 138–143. [\[CrossRef\]](#)
- Blazevich, A.J.; Babault, N. Post-activation potentiation versus post-activation performance enhancement in humans: Historical perspective, underlying mechanisms, and current issues. *Front. Physiol.* **2019**, *10*, 1359. [\[CrossRef\]](#)
- Cuenca-Fernández, F.; Smith, I.C.; Jordan, M.J.; MacIntosh, B.R.; López-Contreras, G.; Arellano, R.; Herzog, W. Nonlocalized postactivation performance enhancement (PAPE) effects in trained athletes: A pilot study. *Appl. Physiol. Nutr. Metab.* **2017**, *42*, 1122–1125. [\[CrossRef\]](#)
- Rassier, D.E.; Macintosh, B.R. Coexistence of potentiation and fatigue in skeletal muscle. *Braz. J. Med. Biol. Res.* **2000**, *33*, 499–508. [\[CrossRef\]](#)
- Boullousa, D.; Beato, M.; Iacono, A.D.; Cuenca-Fernández, F.; Doma, K.; Schumann, M.; Zagatto, A.M.; Loturco, I.; Behm, D.G. A new taxonomy for postactivation potentiation in sport. *Int. J. Sports Physiol. Perform.* **2020**, *15*, 1197–1200. [\[CrossRef\]](#)
- James, L.P.; Haff, G.G.; Kelly, V.G.; Beckman, E.M. Towards a determination of the physiological characteristics distinguishing successful mixed martial arts athletes: A systematic review of combat sport literature. *Sports Med.* **2016**, *46*, 1525–1551. [\[CrossRef\]](#)

11. Gołaś, A.; Maszczyk, A.; Zajac, A.; Mikołajec, K.; Stastny, P. Optimizing postactivation potentiation for explosive activities in competitive sports. *J. Hum. Kinet.* **2016**, *52*, 95–106. [\[CrossRef\]](#) [\[PubMed\]](#)
12. Santos, J.; Herrera-Valenzuela, T.; Mota, G.; Franchini, E. Influence of half-squat intensity and volume on the subsequent countermovement jump and frequency speed of kick test performance in Taekwondo athletes. *Kinesiology* **2016**, *48*, 95–102. [\[CrossRef\]](#)
13. Ebben, W. Complex training: A brief review. *J. Sports Sci. Med.* **2002**, *1*, 42–46.
14. Duthie, G.; Young, W.; Aitken, D. The acute effects of heavy loads on jump squat performance: An evaluation of the complex and contrast methods of power development. *J. Strength. Cond. Res.* **2002**, *16*, 530–538. [\[CrossRef\]](#) [\[PubMed\]](#)
15. Kasicki, K.; Rydzik, Ł.; Ambroży, T.; Spieszny, M.; Koteja, P. The impact of post-activation performance enhancement protocols on vertical jumps: Systematic review. *Appl. Sci.* **2024**, *14*, 9664. [\[CrossRef\]](#)
16. Prieske, O.; Behrens, M.; Chaabene, H.; Granacher, U.; Maffiuletti, N.A. Time to differentiate postactivation “potentiation” from “performance enhancement” in the strength and conditioning community. *Sports Med.* **2020**, *50*, 1559–1565. [\[CrossRef\]](#)
17. Barley, O.R.; Harms, C.A. Profiling combat sports athletes: Competitive history and outcomes according to sports type and current level of competition. *Sports Med. Open* **2021**, *7*, 63. [\[CrossRef\]](#)
18. Ojeda-Aravena, A.; Herrera-Valenzuela, T.; Valdés-Badilla, P.; Martín, E.B.-S.; Thapa, R.K.; Ramirez-Campillo, R. A systematic review with meta-analysis on the effects of plyometric-jump training on the physical fitness of combat sport athletes. *Sports* **2023**, *11*, 33. [\[CrossRef\]](#)
19. Page, M.J.; McKenzie, J.E.; Bossuyt, P.M.; Boutron, I.; Hoffmann, T.C.; Mulrow, C.D.; Shamseer, L.; Tetzlaff, J.M.; Akl, E.A.; Brennan, S.E.; et al. The PRISMA 2020 statement: An updated guideline for reporting systematic reviews. *BMJ* **2021**, *372*, n71. [\[CrossRef\]](#)
20. Liberati, A.; Altman, D.G.; Tetzlaff, J.; Mulrow, C.; Gotzsche, P.C.; Ioannidis, J.P.; Clarke, M.; Devereaux, P.J.; Kleijnen, J.; Moher, D. The PRISMA statement for reporting systematic reviews and meta-analyses of studies that evaluate healthcare interventions: Explanation and elaboration. *BMJ* **2009**, *339*, b2700. [\[CrossRef\]](#)
21. Moher, D.; Liberati, A.; Tetzlaff, J.; Altman, D.G.; The PRISMA Group. Preferred reporting items for systematic reviews and meta-analyses: The PRISMA statement. *PLoS Med.* **2009**, *6*, e1000097. [\[CrossRef\]](#)
22. Maher, C.G.; Sherrington, C.; Herbert, R.D.; Moseley, A.M.; Elkins, M. Reliability of the PEDro scale for rating quality of randomized controlled trials. *Phys. Ther.* **2003**, *83*, 713–721. [\[CrossRef\]](#)
23. Hedges, L.V.; Olkin, I. *Statistical Methods for Meta-Analysis*; Hedges, L.V., Ed.; Academic Press: New York, NY, USA, 1985.
24. Zwierzchowska, A.; Gawel, E.; Maszczyk, A.; Rocznio, R. The importance of extrinsic and intrinsic compensatory mechanisms to body posture of competitive athletes: A systematic review and meta-analysis. *Sci. Rep.* **2022**, *12*, 8808. [\[CrossRef\]](#)
25. Ouergui, I.; Delleli, S.; Messaoudi, H.; Chtourou, H.; Bouassida, A.; Bouhlel, E.; Franchini, E.; Ardigò, L.P. Acute effects of different activity types and work-to-rest ratios on post-activation performance enhancement in young male and female Taekwondo athletes. *Int. J. Environ. Res. Public Health* **2022**, *19*, 1764. [\[CrossRef\]](#) [\[PubMed\]](#)
26. Santos, J.F.; Valenzuela, T.H.; Franchini, E. Can different conditioning activities and rest intervals affect the acute performance of Taekwondo turning kick? *J. Strength Cond. Res.* **2015**, *29*, 1640–1647. [\[CrossRef\]](#)
27. Pyun, S.; Kim, S.; Kim, J.; Lee, D.; Hong, J.-H.; Yu, J.-H.; Kim, J.-S.; Yang, H.S.; Kim, S.-G. Effect of post-activation potentiation according to sequence of velocity using isokinetic device on short-term performance of lower extremity: Taekwondo athletes and healthy adults. *J. Korean Phys. Ther.* **2022**, *34*, 298–303. [\[CrossRef\]](#)
28. Castro-Garrido, N.; Valderas-Maldonado, C.; Herrera-Valenzuela, T.; Da Silva, J.F.; Guzmán-Muñoz, E.; Vázquez-Gómez, J.; Branco, B.M.; Zapata-Bastias, J.; Valdés-Badilla, P.; López-Fuenzalida, A. Effects of post-activation potentiation exercises on kicking frequency, fatigue rate, and jump performance in Taekwondo athletes: A case study. *Retos* **2020**, *38*, 679–683. [\[CrossRef\]](#)
29. Oliveira, M.P.; Cochrane, D.; Drummond, M.D.M.; Albuquerque, M.R.; Almeida, P.A.S.; Couto, B.P. No acute effect of whole-body vibration on roundhouse kick and countermovement jump performance of competitive Taekwondo athletes. *Braz. J. Kinesiol. Hum. Perform.* **2019**, *20*, 576–584. [\[CrossRef\]](#)
30. Ouergui, I.; Delleli, S.; Messaoudi, H.; Bridge, C.A.; Chtourou, H.; Franchini, E.; Ardigò, L.P. Effects of conditioning activity mode, rest interval, and effort-to-pause ratio on post-activation performance enhancement in Taekwondo: A randomized study. *Front. Physiol.* **2023**, *14*, 1179309. [\[CrossRef\]](#)
31. Boyacı, A.; Kizile, T. Acute effects of cluster set and traditional set post-activation potentiation protocols on vertical jump performance. *Eur. J. Phys. Educ. Sport Sci.* **2023**, *9*, 38–49. [\[CrossRef\]](#)
32. Yi, W.; Chen, C.; Zhou, Z.; Cui, W.; Wang, D. Acute effects of ballistic versus heavy-resistance exercises on countermovement jump and rear-hand straight punch performance in amateur boxers. *BMC Sports Sci. Med. Rehabil.* **2022**, *14*, 161. [\[CrossRef\]](#) [\[PubMed\]](#)
33. Finlay, M.J.; Page, R.M.; Greig, M.; Bridge, C.A. The prevalence of pre-conditioning and recovery strategies in senior elite and non-elite amateur boxing. *Phys. Sportsmed.* **2022**, *50*, 323–331. [\[CrossRef\]](#) [\[PubMed\]](#)

34. Eroğlu, S. Acute effects of post-activation potentiation on explosive strength performance in wrestling athletes. *Pak. J. Med. Health Sci.* **2022**, *16*, 532. [\[CrossRef\]](#)
35. Lum, D. Effects of various warm-up protocol on special Judo fitness test performance. *J. Strength Cond. Res.* **2019**, *33*, 459–465. [\[CrossRef\]](#) [\[PubMed\]](#)
36. Langer, A.; Ignatieva, A.; Fischerova, P.; Nitychoruk, M.; Golas, A.; Maszczyk, A. Effect of post-activation potentiation on the force, power, and rate of power and force development of the upper limbs in mixed martial arts (MMA) fighters, taking into account training experience. *Balt. J. Health Phys. Act.* **2022**, *14*, 2. [\[CrossRef\]](#)
37. Margaritopoulos, S.; Theodorou, A.S.; Methenitis, S.; Zaras, N.; Donti, O.; Tsolakis, C. The effect of plyometric exercises on repeated strength and power performance in elite Karate athletes. *J. Phys. Educ. Sport* **2015**, *15*, 310.
38. Yilmaz, A.; Gurses, V.; Gulsen, M. The effect of combined preconditioning strategies on isokinetic strength in well-trained kickboxers. *Phys. Educ. Students* **2018**, *22*, 278–284. [\[CrossRef\]](#)
39. Cimadoro, G.; Mahaffey, R.; Babault, N. Acute neuromuscular responses to short and long roundhouse kick striking paces in professional Muay Thai fighters. *J. Sports Med. Phys. Fitness* **2019**, *59*, 204–209. [\[CrossRef\]](#)
40. Afonso, J.; Moradian, H.; Eslami, R.; Martins, A.; Parnow, A. Does post-activation potentiation protocols affect anaerobic performance in women Taolu Wushu athletes? *Preprint* **2021**. [\[CrossRef\]](#)
41. Ferreira, S.L.; Panissa, V.L.; Miarka, B.; Franchini, E. Postactivation potentiation: Effect of various recovery intervals on bench press power performance. *J. Strength. Cond. Res.* **2012**, *26*, 739–744. [\[CrossRef\]](#)
42. Liossis, L.D.; Forsyth, J.; Liossis, C.; Tsolakis, C. The acute effect of upper-body complex training on power output of martial art athletes as measured by the bench press throw exercise. *J. Hum. Kinet.* **2013**, *39*, 167–175. [\[CrossRef\]](#)
43. Turner, A.; Comfort, P. *Advanced Strength and Conditioning: An Evidence-Based Approach*; Routledge: Abingdon, Oxfordshire, UK, 2022.
44. Franchini, E.; Brito, C.J.; Fukuda, D.H.; Artioli, G.G. The physiology of Judo-specific training modalities. *J. Strength Cond. Res.* **2014**, *28*, 1474–1481. [\[CrossRef\]](#)
45. Loturco, I.; Pereira, L.A.; Zabalo, S.; Mercer, V.P.; Moura, T.B.M.A.; Freitas, T.T.; Boulosa, D. No Post-Activation Performance Enhancement Following a Single Set of Plyometric or Flywheel Exercises in National Team Rugby Players. *Appl. Sci.* **2024**, *14*, 9786. [\[CrossRef\]](#)
46. Genc, S.; Mancini, E.; Guducu, C.; Gunay, E. Post-Activation Performance Enhancement (PAPE) interventions at different loads may enhance sprint performance in well-trained athletes. *Turk. J. Sports Med.* **2024**, *59*, 88–93. [\[CrossRef\]](#)
47. 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. Meta-analysis of postactivation potentiation and power: Effects of conditioning activity, volume, gender, rest periods, and training status. *J. Strength Cond. Res.* **2013**, *27*, 854–859. [\[CrossRef\]](#)
48. Kendrick, I.P.; Harris, R.C.; Kim, H.J.; Kim, C.K.; Dang, V.H.; Lam, T.Q.; Bui, T.T.; Smith, M.; Wise, J.A. The effects of 10 weeks of resistance training combined with beta-alanine supplementation on whole body strength, force production, muscular endurance, and body composition. *Amino Acids* **2008**, *34*, 547–554. [\[CrossRef\]](#)
49. Skulachev, V.P. Biological role of carnosine in the functioning of excitable tissues: Centenary of Gulewitsch's discovery. *Biochemistry* **2000**, *65*, 749–750. [\[PubMed\]](#)
50. McHugh, M.P.; Connolly, D.A.; Eston, R.G.; Gleim, G.W. Exercise-induced muscle damage and potential mechanisms for the repeated bout effect. *Sports Med.* **1999**, *27*, 157–170. [\[CrossRef\]](#)
51. Hamada, T.; Sale, D.G.; MacDougall, J.D.; Tarnopolsky, M.A. Postactivation potentiation, fiber type, and twitch contraction time in human knee extensor muscles. *J. Appl. Physiol.* **2000**, *88*, 2131–2137. [\[CrossRef\]](#)
52. Tillin, N.A.; Bishop, D. Factors modulating post-activation potentiation and its effect on performance of subsequent explosive activities. *Sports Med.* **2009**, *39*, 147–166. [\[CrossRef\]](#)
53. Moore, R.L.; Stull, J.T. Myosin light chain phosphorylation in fast and slow skeletal muscles in situ. *Am. J. Physiol.* **1984**, *247*, 462–471. [\[CrossRef\]](#) [\[PubMed\]](#)
54. Gardetto, P.R.; Schluter, J.M.; Fitts, R.H. Contractile function of single muscle fibers after hindlimb suspension. *J. Appl. Physiol.* **1989**, *66*, 2739–2749. [\[CrossRef\]](#) [\[PubMed\]](#)
55. Metzger, J.M.; Moss, R.L. Calcium-sensitive cross-bridge transitions in mammalian fast and slow skeletal muscle fibers. *Science* **1990**, *247*, 1088–1090. [\[CrossRef\]](#)
56. Grange, R.W.; Vandenboom, R.; Houston, M.E. Physiological significance of myosin phosphorylation in skeletal muscle. *Can. J. Appl. Physiol.* **1993**, *18*, 229–242. [\[CrossRef\]](#)
57. Nederveen, J.P.; Ibrahim, G.; Fortino, S.A.; Snijders, T.; Kumbhare, D.; Parise, G. Variability in skeletal muscle fiber characteristics during repeated muscle biopsy sampling in human vastus lateralis. *Appl. Physiol. Nutr. Metab.* **2020**, *45*, 368–375. [\[CrossRef\]](#) [\[PubMed\]](#)
58. Čular, D.; Babić, M.; Zubac, D.; Kezić, A.; Macan, I.; Peyré-Tartaruga, L.A.; Ceccarini, F.; Padulo, J. Tensiomyography: From muscle assessment to talent identification tool. *Front. Physiol.* **2023**, *14*, 1163078. [\[CrossRef\]](#)

59. Šimunič, B.; Degens, H.; Rittweger, J.; Narici, M.; Mekjavić, I.B.; Pišot, R. Noninvasive estimation of myosin heavy chain composition in human skeletal muscle. *Med. Sci. Sports Exerc.* **2011**, *43*, 1619–1625. [\[CrossRef\]](#)
60. Haugen, T.A.; Breitschädel, F.; Wiig, H.; Seiler, S. Countermovement Jump Height in National-Team Athletes of Various Sports: A Framework for Practitioners and Scientists. *Int. J. Sports Physiol Perform.* **2021**, *16*, 184–189. [\[CrossRef\]](#)
61. Villalon-Gasch, L.; Penichet-Tomas, A.; Sebastia-Amat, S.; Pueo, B.; Jimenez-Olmedo, J.M. Postactivation performance enhancement (PAPE) increases vertical jump in elite female volleyball players. *Int. J. Environ. Res. Public Health* **2022**, *19*, 462. [\[CrossRef\]](#)
62. Seitz, L.B.; de Villarreal, E.S.; Haff, G.G. The temporal profile of postactivation potentiation is related to strength level. *J. Strength Cond. Res.* **2014**, *28*, 706–715. [\[CrossRef\]](#)

Disclaimer/Publisher's Note: The statements, opinions and data contained in all publications are solely those of the individual author(s) and contributor(s) and not of MDPI and/or the editor(s). MDPI and/or the editor(s) disclaim responsibility for any injury to people or property resulting from any ideas, methods, instructions or products referred to in the content.

RESEARCH

Open Access



Effects of overcoming isometric unilateral conditioning activity on subsequent single-leg drop jump in elite and amateur volleyball players: a randomized crossover trial

Artur Terbalyan¹, Kazimierz Mikołajec¹, Michał Krzysztofik^{1,2}, Robert Urbański³, Jakub Jarosz¹, Petr Stastny² and Michał Spieszny^{4*}

Abstract

Background The study aimed to assess the acute effects of overcoming isometric split squats on subsequent single-leg drop jump (DJ) performance and the contralateral effect in volleyball players, considering training status differences.

Methods Ten male elite (ELI) and ten amateur (AMA) volleyball players took part in two experimental sessions in which they performed conditioning activity (CA) consisted of 3 sets of overcoming isometric 3-second split squats, differing in the limb used: dominant (DL) or non-dominant (ND-L). Single-leg DJ was performed before and at the 4th and 8th minute post-CA for both limbs. The best post-CA attempt in terms of jump height (JH) was analyzed.

Results Results revealed a significant increase in jump height (JH) in the non-dominant limb (ND-L) from 13.7 ± 2.6 cm to 15.5 ± 2.7 cm after CA performed by the ND-L ($p = 0.001$; Hedge's $g = 0.65$). Similarly, the reactive strength index (RSI) of the ND-L improved from 0.40 ± 0.06 to 0.45 ± 0.08 ($p = 0.008$; $g = 0.58$). Additionally, contact time in the ND-L increased significantly from 342 ± 36 ms to 375 ± 42 ms after CA performed by the dominant limb ($p = 0.001$; $g = 0.66$). In the elite (ELI) group, JH significantly increased from 16.4 ± 2.4 cm to 18.3 ± 3.3 cm ($p < 0.001$; $g = 0.79$), while RSI in the dominant limb (DL) improved from 0.47 ± 0.06 to 0.53 ± 0.07 ($p = 0.011$; $g = 0.68$).

Conclusions Results suggest that the examined CA effectively induces the post-activation performance enhancement in DJ among elite volleyball players, with a predominantly local impact on the limb executing the CA.

Trial registration NCT06459050 (Retrospectively registered).

Keywords Post-activation potentiation, Neuromuscular performance, Explosive strength, Isometric exercise, Unilateral movement, Plyometric training

*Correspondence:

Michał Spieszny
michal.spieszny@awf.krakow.pl

¹Institute of Sport Sciences, The Jerzy Kukuczka Academy of Physical Education in Katowice, Katowice, Poland

²Department of Sport Games, Faculty of Physical Education and Sport, Charles University in Prague, Prague, Czech Republic

³Department of Biomechanics and Sports Engineering, Gdansk University of Physical Education and Sport, Gdańsk, Poland

⁴Institute of Sports Sciences, University of Physical Culture in Krakow, Kraków, Poland



© The Author(s) 2025. **Open Access** This article is licensed under a Creative Commons Attribution-NonCommercial-NoDerivatives 4.0 International License, which permits any non-commercial use, sharing, distribution and reproduction in any medium or format, as long as you give appropriate credit to the original author(s) and the source, provide a link to the Creative Commons licence, and indicate if you modified the licensed material. You do not have permission under this licence to share adapted material derived from this article or parts of it. The images or other third party material in this article are included in the article's Creative Commons licence, unless indicated otherwise in a credit line to the material. If material is not included in the article's Creative Commons licence and your intended use is not permitted by statutory regulation or exceeds the permitted use, you will need to obtain permission directly from the copyright holder. To view a copy of this licence, visit <http://creativecommons.org/licenses/by-nc-nd/4.0/>.

Introduction

Developing high levels of power output while performing specific movements is an essential component of many team sports [1], including volleyball [2]. Volleyball relies to a greater extent on jumping ability being a determinant of success in volleyball, directly influencing crucial game actions such as spiking, blocking, and serving [2]. Studies indicate that elite volleyball players exhibit superior jumping ability compared to lower-level athletes, and jump performance has been correlated with match outcomes and team rankings [3]. Given the unilateral and reactive nature of many volleyball-specific movements, optimizing single-leg jump mechanics is essential for enhancing overall athletic performance and reducing injury risk, therefore it has been suggested that athletes should be trained and tested using unilateral movements [3]. For instance, the single-leg drop jump (DJ) and split squat are often selected for training and testing purposes [4, 5].

It is generally agreed that designing the training program should aim for reliable methods to effectively facilitate the acquisition of specific motor abilities and neuromuscular adaptations [6]. The training exploiting the phenomenon of post-activation performance enhancement (PAPE) seems to be effective in achieving those adaptations and has been meticulously investigated in recent years [7–9]. This method refers to the pairing of high-effort exercise called conditioning activity (CA) with a biomechanically similar high-velocity power movement [7]. PAPE method of training proved to be beneficial in volleyball increasing countermovement jump [10], squat jump [11, 12], and many other jumping tests [13]. While there is ongoing debate regarding local and remote PAPE effect [14–16], specifically, does conditioning one limb enhance performance in the other [17, 18]?

The potential occurrence of the remote PAPE effect is supported by plausible physiological hypotheses, such as an elevation in neural drive [7, 19] or catecholamine secretion subsequent to high-intensity CA [20]. Studies predominantly fall into two categories: those evaluating the effects of upper CA on lower body exercises and vice versa [13, 15, 16, 21], and other investigating impact of CA in contralateral limb [14, 17, 18]. For example, Bartolomei et al. [21], demonstrated that a high-intensity bench press induces a PAPE effect in the lower limbs, but not the other way around. Another study by Bartolomei et al. [15], verified that a significant increase in countermovement jump (CMJ) power output after 5 sets of single repetitions with a load of 90% 1RM in the bench press but not after 30% 1RM. Similarly, a recent study by Kolinger et al. [22] revealed no changes during elbow flexion and extension after high-intensity squats, despite contributing to increased peak torque during isokinetic knee flexion and extension. Conversely, available studies

on the contralateral PAPE effect suggest a local manifestation of this phenomenon [14, 17, 18]. Wong and colleagues [18] observed a PAPE effect in the exercising arm following a CA performed by the elbow flexors of one arm. Interestingly, authors noted a performance decrease in the contralateral arm. In contrast, Power et al. [17] did not find a significant difference in DJ difference when the tested leg underwent activation through 4 repetitions of 5 s knee extension maximal voluntary isometric contractions. However, to the best of our knowledge only the protocol in study by Andrews et al. [14] has adopted a procedure closely mimicking training setting. Authors found that split squat exercise (5/2/1 repetition with 50%, 70% and 90%1RM; respectively) increased the CMJ height of the conditioned leg but provoked statistically significant CMJ height impairments in the contralateral leg with no effect in DJ height, contact time and reactive strength index (RSI). Probably, as stated by authors the PAPE effect in DJ was masked due to the high balance and coordination recruitment upon landing and taking of on one leg. Therefore, in addition to the strength level, training status, specifically the ability to perform certain exercises may determine the PAPE effect utilization.

Interestingly, to the best of the authors' knowledge, only the study protocol by Power et al. [17] assessed the effectiveness of CA performed by both the dominant and non-dominant leg. In the studies by Wong et al. [18] and Andrews et al. [14], the PAPE effect and its contralateral action were exclusively investigated through stimulation of the dominant limb. Hence, it remains unknown whether the magnitude of the PAPE effect is similar in the dominant and non-dominant limbs, and whether the potential transfer from dominant to non-dominant, and vice versa, is similar. Knowing the impact of unilateral CA on athletic performance and the contralateral effect might be useful for selecting the suitable PAPE parameters and its use in training settings appropriate to the athlete's training status. Considering inconsistent findings regarding impact of CA on contralateral effect, the purpose of this study is to evaluate the acute effects of overcoming isometric split squats on subsequent single-leg DJ performance in volleyball players. In parallel, additional factor such as training status will be considered. We assume a significant increase in DJ performance after CA performed by the same limb and a significantly higher PAPE effect in the elite athletes compared to amateurs.

Materials and methods

Experimental approach to the problem

The study was performed following CONSORT guidelines in a randomized, double-blind crossover design, where each athlete performed two experimental sessions to compare the acute effects of overcoming isometric

split squats on subsequent single-leg DJ performance. Each session involved performing 3 sets of 3-second overcoming isometric split squats with a 3-minute rest between sets as a CA. However, sessions differed in terms of the limb used, dominant vs. non-dominant. A single-leg DJ for both the dominant and non-dominant limbs was performed in random order 5 min before and at the 4th and 8th minutes after completing the CA (Fig. 1). This rest time frame has been determined by recent research to be sufficient to elicit a PAPE response in various levels of athletes [15, 19].

Participants

The required sample size was determined using G*Power (version 3.1., University of Düsseldorf, Germany) based on an expected effect size of $g=0.56$ [23], a statistical power of 0.8, and an alpha level of 0.05 for this study design (two-way repeated-measures ANOVA, within-between interaction), indicating a minimum of 20 participants. Ten male professional (EL; age: 28 ± 7 years; height: 198 ± 10 cm; body mass: 92 ± 9 kg; one-repetition maximum back squat: 1.63 ± 0.15 kg/body mass;

volleyball training experience: 15 ± 7 years) and ten amateur (AMA; age: 19 ± 1 years; height: 189 ± 5 cm; body mass: 87.7 ± 6.8 kg; one-repetition maximum back squat: 1.49 ± 0.21 kg/body mass; volleyball training experience: 6 ± 2 years) volleyball players participated in this study (Fig. 2). Recruitment was carried out through direct contact with professional and amateur volleyball teams in Poland. Elite players were identified and selected from teams competing in the highest Polish volleyball league, while amateur players were recruited from lower-division teams and university-level volleyball programs. Team coaches and strength and conditioning staff were approached to assist in identifying eligible athletes.

The study was conducted during the pre-season period with 48–72 h apart between sessions, ensuring that participants were in a structured training phase but not experiencing excessive fatigue from competitive play. Data collection took place at the Strength and Power Laboratory at the Academy of Physical Education in Katowice, Poland, where controlled conditions allowed for accurate and standardized assessments.

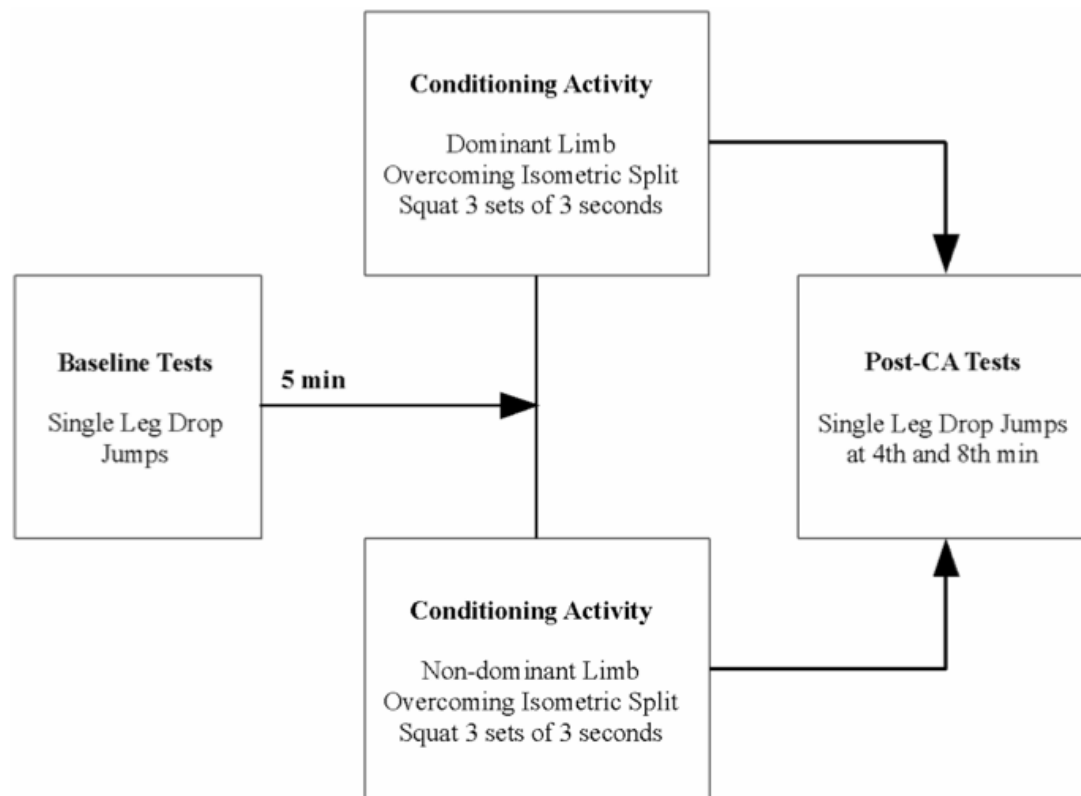


Fig. 1 Study design flowchart. CA= conditioning activity

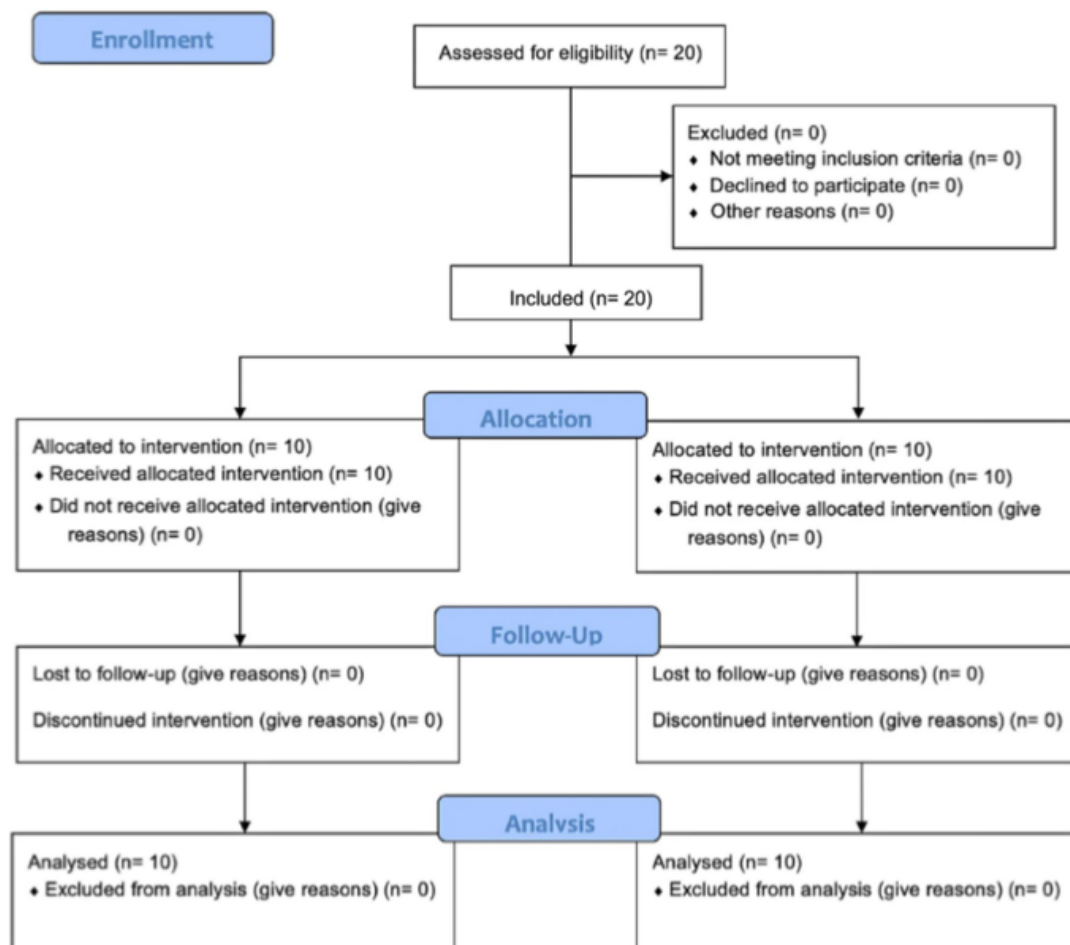


Fig. 2 CONSORT flow diagram

To ensure consistency and reliability in performance measurements, all participants wore standard volleyball training shoes meeting the following criteria: maximum sole height of 3 cm to minimize the effect of cushioning on ground reaction forces, a flat sole without excessive heel elevation to maintain natural ankle positioning. Shoes with high-impact absorption technologies (e.g., air cushions or spring systems) were not allowed to eliminate performance variability.

The inclusion criteria for both groups were as follows: (i) no lower-limb serious injury, including tendon or muscle tear, and (ii) participation in regular resistance training and competition. Additionally, to be included in the ELI group, athletes had to compete at the highest Polish volleyball league for at least two consecutive seasons.

Athletes in the AMA group had to compete in junior groups outside the highest league level. Athletes were instructed to maintain their sleep hygiene and dietary habits and refrain from taking stimulants throughout the study. Tests were scheduled at the same time of day (9:00–11:00) for all testing and training sessions to avoid the effects of the circadian rhythm. The randomization was performed with an online generator (randomization.org). Each participant received a number and sequence of the sessions. Athletes were asked not to perform any additional high-intensity exercises 48-h before testing to minimize fatigue. The athletes were informed about the study's benefits and potential risks before the experiment's commencement and gave their written consent to participate. However, the athletes and the supervisor

who was overseeing the training did not know about the potential result. The study protocol was approved by the Bioethics Committee for Scientific Research at the Academy of Physical Education in Katowice (3/2021) and performed according to the ethical standards of the Declaration of Helsinki 2013.

Experimental sessions

After the warm-up consisting of 5-minute cycling and dynamic exercises by 2 sets of 5 repetitions: backward lunge and reach, leg cradle, knee hug, inverted hamstring with knee drive, drop lunge and world greatest stretch, athletes performed baseline dominant and non-dominant DJ measurements in random order. Two trials of each jump from a 20 cm box with 30-second rest intervals were executed. After a 5-minute rest, athletes performed an overcoming isometric dominant or non-dominant split squat (on separate sessions) as a CA in randomized order. Limb dominance was determined based on self-report by answering a question "If you would shoot a ball on a target, which leg would you use to shoot the ball?" [24]. The overcoming isometric split squat was executed on an immovable barbell loaded with a load, preventing any concentric movement. Athletes were positioned under the individually adjusted barbell height to ensure approximately 90-degree knee extension (Fig. 3). They were instructed to "push the barbell as fast and forcefully as possible for 3 seconds". Each limb performed two DJ at the 4th and 8th minutes post-CA. The best attempt in terms of jump height from these trials was retained for further analysis to ensure a reliable measure of maximal performance.

Measurement of drop jump performance

Single leg DJ performance was assessed using dual force plates (Force Decks, Vald Performance, Australia), a validated system for measuring vertical jump kinematics and ground reaction forces with high reliability (ICC = 0.97–0.99 for jump height and 0.93–0.98 for contact time) [25]. Each athlete performed four single-leg DJ without arm swings at three time points: baseline (pre-CA) and at the 4th and 8th minutes post-CA. The single leg DJ test was performed under standardized conditions to minimize variability and ensure accurate assessment of neuromuscular performance. Athletes began each trial in a standing position on a designated box with their hands on their hips to eliminate the influence of arm swing. The drop was initiated by stepping off the box with one foot, ensuring minimal horizontal displacement during descent. Upon ground contact, athletes were instructed to rebound as quickly and explosively as possible, minimizing ground contact time while aiming for maximal jump height. The force plates recorded key jump metrics in real time, including jump height (JH), RSI, and contact

time (CT). A trial was considered invalid if the athlete lifted their feet during flight, landed outside the designated force plate area, failed to maintain a neutral body position, or demonstrated an excessive countermovement upon landing. To account for training status differences and maintain ecological validity, ELI performed single leg DJ from a 40 cm box, while AMA used a 20 cm box. These heights were chosen based on standard training practices for each group and aimed to replicate their typical jump mechanics. Each athlete completed four trials per testing condition, with a 30-second rest interval between attempts. The best trial in terms of jump height was retained for further analysis, ensuring that the most representative maximal performance was used for statistical comparisons. All jumps were performed under the supervision of trained researchers to ensure adherence to standardized protocols and to provide real-time feedback on technique and execution. The instruction given to the athlete was: "jump as high and as quick as you can."

Statistical analysis

All statistical analyses were performed using JASP software (JASP Team version 0.18.1; macOS Sonoma 14.2.1) and were shown as means with standard deviations ($\pm$ SD). Statistical significance was set at $p < 0.05$. The normality of data distribution was checked using Shapiro–Wilk tests, and Mauchly's test was used to test for the assumption of sphericity. Independent-sample t-tests were used to examine differences in basic characteristics between ELI and AMA. A single-rater intra-class correlation coefficient (ICC) and coefficient of variability (CV) were used to measure value reliability (calculated from the baseline measurements taken for each of the dependent variables) [13]. The three-way mixed ANOVAs with repeated measures (2 groups [ELI, AMA] $\times$ 2 sides [DOM, N-DOM] $\times$ 2 times [PRE, BEST]) were used to investigate the effects of each CA on the single leg DJ performance among elite and amateur volleyball players. When a significant main effect or interaction was found, the post-hoc tests with Tuckey correction were used to analyze the pairwise comparisons. The magnitude of mean differences was expressed with standardized effect sizes. Thresholds for qualitative descriptors of Hedge's g were interpreted as ≤ 0.20 "small", 0.21–0.79 "medium", and > 0.80 as "large" [26].

Results

A comparison of the basic anthropometric and strength characteristics between ELI and AMA volleyball players is presented in Table 1. Elite players were significantly older (28 ± 7 years vs. 19 ± 1 years, $p < 0.001$), taller (198 ± 10 cm vs. 189 ± 5 cm, $p = 0.004$), and heavier (92 ± 9 kg vs. 87.7 ± 6.8 kg, $p = 0.032$) than amateur players. Strength levels, as measured by the 1RM back squat



Fig. 3 Position during conditioning activity

relative to body mass, were also significantly higher in the ELI group (1.63 ± 0.15 kg/kg) compared to AMA players (1.49 ± 0.21 kg/kg, $p = 0.012$). In addition, volleyball training experience was significantly longer in elite players (15 ± 7 years vs. 6 ± 2 years, $p < 0.001$).

The measurement reliability was moderate to excellent for jump height ($ICC > 0.63$, $CV = 8\text{--}9\%$), relative peak power ($ICC > 0.55$, $CV = 4\text{--}6\%$), contact time ($ICC > 0.74$;

$CV = 3\text{--}5\%$), and RSI ($ICC > 0.75$; $CV = 2\text{--}3\%$). Interactions and main effect of ANOVA for dependent variables are presented in Table 1.

Post-hoc pairwise comparisons for the side $\times$ time interaction showed a significant increase in jump height ($p = 0.001$; $g = 0.65$) and RSI ($p = 0.008$; $g = 0.58$) from pre to best time point in the ND-L after CA performed by the non-dominant limb (Table 2). Moreover, a significant

Table 1 Basic characteristics of elite and amateur volleyball players

Characteristics	ELI (Mean $\pm$ SD)	AMA (Mean $\pm$ SD)
Age (years)	28 $\pm$ 7	19 $\pm$ 1
Height (cm)	198 $\pm$ 10	189 $\pm$ 5
Body Mass (kg)	92 $\pm$ 9	87.7 $\pm$ 6.8
1RM Back Squat (kg/kg body mass)	1.63 $\pm$ 0.15	1.49 $\pm$ 0.21
Volleyball Training Experience (years)	15 $\pm$ 7	6 $\pm$ 2

ELI– elite; AMA– amateur; 1RM– one-repetition maximum

increase in contact time in ND-L from pre to best time point ($p=0.001$; $g=0.66$) was found after CA performed by the dominant limb. Furthermore, in the ELI group, post-hoc pairwise comparisons for the group $\times$ time interaction indicated a significant increase in jump height ($p<0.001$; $g=0.79$) and a significant RSI increase in D-L ($p=0.011$; $g=0.68$), both observed from pre to the best time point after CA performed by the dominant limb.

Table 3 presents a comparison of single leg DJ performance metrics to examine the localized and potential contralateral effects of isometric conditioning activity. In ELI, a significant improvement in jump height was observed when the same limb was used for both CA and the subsequent single leg DJ. Specifically, after CA performed by the dominant limb, JH increased from 16.4 $\pm$ 2.4 cm to 18.3 $\pm$ 3.3 cm ($p<0.001$, $g=0.79$). Similarly, JH improved following non-dominant limb CA, increasing from 13.7 $\pm$ 2.6 cm to 15.5 $\pm$ 2.7 cm ($p=0.001$, $g=0.65$). In contrast, the contralateral effect was limited, as no statistically significant improvements in JH were observed in the non-conditioned limb post-CA.

For AMA, a different response pattern was noted. JH significantly increased only when CA was performed

by the non-dominant limb, rising from 11.0 $\pm$ 2.4 cm to 12.4 $\pm$ 2.4 cm ($p=0.008$, $g=0.58$). However, no significant changes in JH were observed following CA of the dominant limb.

Changes in CT further reinforce the differences between the two groups. In elite players, CT remained relatively stable following same-limb CA. However, after dominant-limb CA, CT significantly increased in the non-dominant limb ($p=0.001$, $g=0.66$). In the amateur group, CT exhibited greater variability, with no consistent patterns emerging across conditions.

Similarly, improvements RSI were more pronounced in elite players than in amateurs. In the ELI group, RSI significantly increased after dominant-limb CA, from 0.47 $\pm$ 0.06 to 0.53 $\pm$ 0.07 ($p=0.011$, $g=0.68$). The non-dominant limb also showed a significant RSI increase ($p=0.008$, $g=0.58$). Conversely, in the AMA group, RSI improved only when CA was performed with the non-dominant limb ($p=0.021$, $g=0.264$).

Discussion

The study aimed to assess the acute effects of overcoming isometric split squats on subsequent single-leg DJ performance in volleyball players, considering differences in training status. The results indicated that 3 sets of overcoming isometric 3-second split squats led to an improvement in single leg DJ height and RSI when CA and post-CA tasks were performed by the same limb in the ELI group. Additionally, a contralateral PAPE effect was observed in the ELI group, resulting in an increase in single leg DJ height performed by the limb that did not undergo the CA. However, in the AMA group, the response pattern of the PAPE effect differed, being

Table 2 Interactions and main effects of ANOVAs for all variables

Variable	Jump Height		Contact Time		RSI	
	Non-dominant CA	Dominant CA	Non-dominant CA	Dominant CA	Non-dominant CA	Dominant CA
Group	$F=0.497$; $p=0.49$; $\eta^2_p=0.027$	$F=3.669$; $p=0.071$; $\eta^2_p=0.169$	$F=0.37$; $p=0.551$; $\eta^2_p=0.02$	$F=0.576$; $p=0.458$; $\eta^2_p=0.031$	$F=0.132$; $p=0.721$; $\eta^2_p=0.007$	$F=4.428$; $p=0.05$; $\eta^2_p=0.197$
$\times$ Side $\times$ Time						
Side $\times$ Time	$F=17.078$; $p<0.001$; $\eta^2_p=0.487$	$F=0.448$; $p=0.512$; $\eta^2_p=0.024$	$F=2.222$; $p=0.153$; $\eta^2_p=0.11$	$F=13.3$; $p=0.002$; $\eta^2_p=0.425$	$F=6.454$; $p=0.021$; $\eta^2_p=0.264$	$F=1.446$; $p=0.245$; $\eta^2_p=0.074$
Group $\times$ Time	$F=1.142$; $p=0.299$; $\eta^2_p=0.06$	$F=5.738$; $p=0.028$; $\eta^2_p=0.242$	$F<0.001$; $p=1$; $\eta^2_p<0.001$	$F=0.053$; $p=0.82$; $\eta^2_p=0.003$	$F=1.217$; $p=0.284$; $\eta^2_p=0.063$	$F=5.315$; $p=0.033$; $\eta^2_p=0.228$
Group $\times$ Side	$F=0.024$; $p=0.877$; $\eta^2_p=0.001$	$F=8.519$; $p=0.009$; $\eta^2_p=0.321$	$F=0.802$; $p=0.382$; $\eta^2_p=0.043$	$F=0.349$; $p=0.562$; $\eta^2_p=0.019$	$F=0.161$; $p=0.693$; $\eta^2_p=0.009$	$F=6.034$; $p=0.024$; $\eta^2_p=0.251$
Time	$F=4.399$; $p=0.05$; $\eta^2_p=0.196$	$F=12.779$; $p=0.002$; $\eta^2_p=0.321$	$F=0.038$; $p=0.847$; $\eta^2_p=0.002$	$F=5.182$; $p=0.035$; $\eta^2_p=0.224$	$F=5.367$; $p=0.033$; $\eta^2_p=0.23$	$F=4.756$; $p=0.043$; $\eta^2_p=0.209$
Side	$F=10.964$; $p=0.004$; $\eta^2_p=0.379$	$F=39.503$; $p<0.001$; $\eta^2_p=0.687$	$F=0.63$; $p=0.438$; $\eta^2_p=0.034$	$F=1.378$; $p=0.256$; $\eta^2_p=0.071$	$F=10.547$; $p=0.004$; $\eta^2_p=0.369$	$F=31.592$; $p<0.001$; $\eta^2_p=0.637$
Group	$F=9.056$; $p=0.008$; $\eta^2_p=0.335$	$F=3.559$; $p=0.075$; $\eta^2_p=0.165$	$F=0.13$; $p=0.722$; $\eta^2_p=0.007$	$F=0.644$; $p=0.433$; $\eta^2_p=0.035$	$F=13.961$; $p=0.002$; $\eta^2_p=0.437$	$F=3.249$; $p=0.088$; $\eta^2_p=0.153$

RSI– reactive strength index; CA– conditioning activity

Table 3 Comparison of single leg drop jump performance pre- and post-conditioning activity

		Non-dominant CA		Dominant CA	
		Jump Height [cm]			
		Pre-CA	Best	Pre-CA	Best
ELI	D-L	15.8 ± 2.2 (14.1 to 17.4)	16 ± 1.7 (14.8 to 17.2)	16.4 ± 2.4 (14.7 to 18.0)	18.3 ± 3.3* (16 to 20.7)
	ND-L	13.7 ± 2.6 (11.9 to 15.6)	15.5 ± 2.7* (13.6 to 17.5)	13.8 ± 2.2 (12.2 to 15.4)	15 ± 2.6* (13.2 to 16.8)
AMA	D-L	13.5 ± 2.8 (11.5 to 15.6)	12.7 ± 2.8 (10.7 to 14.7)	13.8 ± 4.2 (10.8 to 16.8)	13.3 ± 4.7 (10 to 16.6)
	ND-L	11 ± 2.4 (9.3 to 12.7)	12.4 ± 2.4* (10.7 to 14.2)	11.9 ± 4.0 (9.0 to 14.7)	13 ± 4.5 (9.8 to 16.3)
Contact Time [ms]					
ELI	D-L	345 ± 28 (325 to 365)	343 ± 50 (307 to 379)	350 ± 29 (329 to 371)	345 ± 41 (315 to 374)
	ND-L	342 ± 36 (316 to 367)	345 ± 35 (320 to 370)	344 ± 37 (317 to 371)	375 ± 42* (345 to 405)
AMA	D-L	348 ± 29 (327 to 369)	342 ± 29 (321 to 362)	341 ± 31 (319 to 363)	339 ± 39 (311 to 367)
	ND-L	349 ± 41 (320 to 378)	357 ± 34 (333 to 381)	333 ± 37 (307 to 359)	355 ± 45* (323 to 387)
RSI					
ELI	D-L	0.47 ± 0.09 (0.41 to 0.54)	0.47 ± 0.07 (0.42 to 0.53)	0.47 ± 0.06 (0.42 to 0.51)	0.53 ± 0.07* (0.48 to 0.59)
	ND-L	0.40 ± 0.06 (0.36 to 0.45)	0.45 ± 0.08* (0.4 to 0.51)	0.40 ± 0.08 (0.35 to 0.46)	0.41 ± 0.08 (0.35 to 0.46)
AMA	D-L	0.39 ± 0.06 (0.34 to 0.43)	0.37 ± 0.08 (0.31 to 0.43)	0.40 ± 0.12 (0.32 to 0.49)	0.39 ± 0.13 (0.3 to 0.49)
	ND-L	0.31 ± 0.04 (0.28 to 0.34)	0.35 ± 0.07* (0.3 to 0.4)	0.36 ± 0.11 (0.28 to 0.43)	0.37 ± 0.11 (0.29 to 0.44)

* a significant difference in comparison to Pre-CA within condition, limb and group; ELI - elite; AMA - amateur; CA - conditioning activity; ND-CA - non-dominant limb conditioning activity; D-CA - dominant limb conditioning activity; D-L - dominant limb; ND-L - non-dominant limb; RSI - reactive strength index

evident only when the CA and post-CA single leg DJ were performed by the non-dominant limb.

Specifically, the results of the three-way mixed ANOVA highlight several key findings regarding the effects of overcoming isometric split squats on single-leg DJ performance. The side × time interaction ($p < 0.001$; $\eta^2 p = 0.487$) confirmed that PAPE effects were primarily local, improving single leg DJ height in the limb that performed the conditioning activity. This effect was more pronounced in elite players, who demonstrated improvements in both limbs, whereas amateur players only benefited when CA was performed on the non-dominant limb. This suggests that training experience influences the ability to utilize PAPE effectively, likely due to superior neuromuscular adaptations in elite athletes.

The group × side interaction ($p = 0.009$; $\eta^2 p = 0.321$) further supports this distinction, as ELI players consistently improved in both limbs following CA, while AMA players exhibited inconsistent responses. This may be attributed to differences in motor control and inter-limb coordination, which are more developed in experienced athletes. Additionally, the group × time interaction ($p = 0.028$; $\eta^2 p = 0.242$) revealed that jump height improvements were significantly greater in ELI

players, reinforcing previous findings that trained individuals are better suited to elicit PAPE responses due to heightened neuromuscular efficiency.

In terms of contact time, a significant increase was observed in the dominant limb after CA ($p = 0.001$; $\eta^2 p = 0.66$). This suggests that while jump height improved, the underlying mechanism may involve altered movement strategies, such as increased ground contact, rather than purely enhanced explosiveness. Similarly, RSI outcomes revealed a significant improvement in the ELI group ($p = 0.033$; $\eta^2 p = 0.228$), but not in the AMA group, indicating that elite athletes were able to maintain efficient force production post-CA, whereas amateurs did not exhibit the same level of neuromuscular readiness.

There is an ongoing debate regarding the existence of the nonlocalized PAPE effect, driven by reasonable physiological hypothesis, such as an increase in neural drive or catecholamine secretion following high-intensity CA [20]. However, available studies on the remote, specifically contralateral PAPE effect suggest a local manifestation of this phenomenon [14, 17, 18]. For instance, Wong et al. [18] demonstrated a significant increase in peak torque during isokinetic elbow flexion solely in the arm that underwent CA. Likewise, Andrews et al. [14]

showed an increase in unilateral countermovement jump height after split squats but only for the limb executing the CA. Consequently, in both studies a cross effect was not observed. Similarly, in the current study, an increase in DJ height and RSI was observed during a jump executed by the limb that underwent CA in both groups, except for CA and post-CA performed by the dominant limb in the AMA group. Interestingly, an increase in DJ height was also noted during a jump performed by the non-dominant limb after CA performed by the dominant limb. This outcome may suggest a contralateral PAPE effect; however, it is essential to consider that this coincided with an increase in ground contact time during DJ and, consequently, it did not significantly affect RSI. This implies that the increase in DJ height primarily resulted from a shift in jump strategy. Additionally, it is noteworthy that the CA applied in this study was performed in a unilateral fashion, differing from the monoarticular movements in the studies by Wong et al. [18] and Power et al. [17], where isometric elbow flexion and knee extension were employed, respectively. Furthermore, in this study, an isometric split squat was performed, involving the rear limb in force production during CA. As a result, the applied CA might unintentionally induce a certain degree of stimulation in the rear limb.

In our study, ELI demonstrated a higher relative strength level, as indicated by their 1RM back squat-to-body mass ratio (1.63 ± 0.15 kg/bm) compared to AMA (1.49 ± 0.21 kg/bm). This supports the assumption that elite athletes possess superior neuromuscular readiness, which may contribute to their ability to better exploit PAPE [27]. Prior research suggests that individuals with greater strength levels are more likely to experience enhanced neuromuscular responses following a CA due to greater motor unit recruitment, increased baseline muscle stiffness, and improved capacity to tolerate high-intensity potentiation-inducing stimuli [11,28]. The findings of our study align with these observations, as ELI exhibited a more pronounced PAPE effect, particularly when performing with their dominant limb. Conversely, the PAPE response in AMA was less consistent, particularly following CA performed with the dominant limb. This variability may be attributed to their lower relative strength levels, which could reduce their ability to generate optimal neuromuscular potentiation. Additionally, it is possible that for weaker individuals, the applied isometric CA functioned more as a fatiguing stimulus rather than an effective potentiating mechanism. This could explain why, in some conditions, single leg DJ height did not exhibit a significant improvement post-CA.

Previous studies indicate that elite volleyball players exhibit superior jump biomechanics, including greater impulse generation, higher take-off velocities, and shorter ground contact times, compared to amateur players [2,

3, 5]. Additionally, research from basketball, soccer, and track & field suggests that elite athletes have greater muscle cross-sectional areas and higher rate of force development, enabling them to respond more effectively to CA and optimize jump performance [28]. These neuromuscular differences likely explain why PAPE effects were more pronounced in the ELI, whereas AMA exhibited a more inconsistent response.

In the ELI group, the local PAPE effect was evident when both CA and post-CA were performed by the same limb, either dominant or non-dominant. Conversely, in the AMA group, it was observed only in the non-dominant limb PAPE procedure. It is consistently emphasized that the training status influences the occurrence and magnitude of induced PAPE effects [8, 29], and recent studies also highlight that the type of post-CA task may have an impact [14, 25]. For example, Andrews et al. [14] revealed a PAPE effect in countermovement jump but not in the DJ. The authors suggested that this discrepancy could be attributed to the fact that DJ is a more demanding task in terms of balance and coordination, potentially masking the PAPE effect. A recent study by Krzysztofik et al. [25] also suggested that the complexity of the post-CA task may influence the magnitude of the elicited PAPE effect. The authors demonstrated an increase in countermovement jump height performed without arm swing but not with arm swing following high-intensity CA. However, surprisingly, despite the dominant limb being more efficient in performing motor tasks the PAPE effect was observed in the AMA group only in the non-dominant limb procedure. Meanwhile, in the ELI group, a significant PAPE effect occurred locally in both the dominant and non-dominant limbs. The explanation for these contradictory results between the studied groups is unknown, but may be attributed to training experience and, in the case of non-dominant procedure, may be attributed to motor acquisition as a result of repetitive DJ.

Selection of the most suitable muscle contraction type for CA is still a matter of debate. Isometric potentiation stands out as a practical and effective option, easily implemented in training settings [28]. This method eliminates the potential challenge of selecting an inappropriate intensity level while providing relevant muscular stimuli to induce the PAPE effect. Wong et al. [18] demonstrated an increase in peak torque during elbow flexion after 3 sets of 6-second isometric contractions, while Power et al. [17] noted no impact of 4 sets of 5-second knee extension on DJ performance. Comparing the CAs used by Wong et al. [18] and Power et al. [17] to the one applied in this study, it seems that repeated isometric CAs with a short duration (such as in this study, 3 sets of 3-second isometric split squats) are sufficient to induce a significant PAPE effect.

Limitations

Analyzing the results of this study, several limitations need to be considered. The applied CA was not a pure unilateral exercise, and ground reaction forces were not measured during its execution, so there is uncertainty about whether the stimulus was similar each time and to what extent the rear limb was engaged in force production. Additionally, no physiological response measurements were taken, so it is unknown which mechanisms are responsible for the observed improvement in physical performance and whether any systemic reactions occurred. Furthermore, control conditions were not taken into account, so changes in performance cannot be entirely attributed to the CA. Moreover, the relatively small sample size ($n = 20$) may limit the generalizability of the findings, particularly when comparing elite and amateur athletes. A larger sample size could provide greater statistical power and allow for more robust conclusions regarding the variability of responses across different training backgrounds.

Practical implications

Although this study focused on volleyball players, the findings have broader implications for other sports that rely on explosive unilateral movements, such as basketball, handball, soccer, and track and field events like long jump and high jump. The observed local PAPE effect suggests that overcoming isometric split squats could be effectively incorporated into warm-up routines or training protocols to enhance jump performance in athletes across various disciplines.

For sports requiring repeated unilateral jumping, such as basketball layups, soccer headers, or high jump take-offs, this method may serve as an efficient pre-competition activation strategy. Given that the ELI athletes in this study exhibited greater PAPE effects, it is likely that experienced athletes in other sports would similarly benefit from incorporating short-duration, high-intensity isometric CA into their preparation.

Moreover, the finding that PAPE was primarily a local effect rather than a systemic one suggests that coaches and practitioners should apply CA specifically to the limb that will be engaged in explosive movements. In disciplines like track and field, where take-off asymmetry is common, targeting the take-off leg with overcoming isometric exercises might help optimize performance.

Conclusions

Overcoming isometric unilateral conditioning activity enhances single-leg DJ performance, with elite athletes demonstrating a stronger and more consistent PAPE response compared to amateurs. These findings underscore the role of training experience, neuromuscular efficiency, and movement proficiency in maximizing the

potentiation effect. The localized nature of the PAPE response suggests that unilateral CA can be an effective warm-up or activation strategy for explosive sports movements. These insights provide practical guidance for strength and conditioning coaches aiming to optimize jump performance in volleyball and other sports requiring unilateral explosive power.

Supplementary Information

The online version contains supplementary material available at <https://doi.org/10.1186/s13102-025-01083-9>.

Supplementary Material 1

Acknowledgements

Not applicable.

Author contributions

Conceptualization, MS, MK and PS; methodology, MK, KM and PS; formal analysis, MK; investigation, JJ, AT and RU; data curation, JJ, AT and RU; writing—original draft preparation, MS, KM, RU and AT; writing—review and editing, AT, MS, MK; supervision, PS and MS All authors have read and agreed to the published version of the manuscript.

Funding

This study was supported by Charles University, by project PRIMUS/22/HUM/019.

Data availability

The datasets analysed during the current study are available from the corresponding author on reasonable request.

Declarations

Ethics approval and consent to participate

The study was conducted in accordance with the Declaration of Helsinki and approved by the Institutional Review Board at the Academy of Physical Education in Katowice (3/2021). Informed consent to participate was obtained from all of the participants in the study.

Consent for publication

Informed consent for publication was obtained from all participant involved in the study.

Competing interests

The authors declare no competing interests.

Received: 29 May 2024 / Accepted: 14 February 2025

Published online: 28 February 2025

References

1. Gamble P. Periodization of training for team sports athletes. *Strength Cond J*. 2006;28:56–66.
2. Sheppard JM, Cronin JB, Gabbett TJ, McGuigan MR, Ettebarria N, Newton RU. Relative importance of strength, power, and anthropometric measures to jump performance of elite volleyball players. *J Strength Cond Res*. 2008;22:758–65.
3. Pleša J, Kozinc Ž, Šarabon N. Bilateral deficit in countermovement jump and its influence on linear sprinting, jumping, and change of direction ability in volleyball players. *Front Physiol*. 2022;13:768906.
4. Bishop C, Perez-Higueras Rubio M, Gullon IL, Maloney S, Balsalobre-Fernandez C. Jump and change of direction speed asymmetry using smartphone apps: Between-Session consistency and associations with physical performance. *J Strength Cond Res*. 2022;36:927–34.

5. McCurdy K. Technique, Variation, and progression of the Rear-Foot-Elevated split squat. *Strength Cond J*. 2017;39:93–7.
6. Bompa TO, Buzzichelli C. Periodization training for sports. Third Edition. Champaign: Human Kinetics; 2015.
7. Blazevich AJ, Babault N. Post-activation potentiation versus Post-activation performance enhancement in humans: historical perspective, underlying mechanisms, and current issues. *Front Physiol*. 2019;10:1359.
8. Boulosa D. Post-activation performance enhancement strategies in sport: a brief review for practitioners. *Hum Mov*. 2021;22:101–9.
9. Prieske O, Behrens M, Chaabene H, Granacher U, Maffiuletti NA. Time to differentiate postactivation potentiation from performance enhancement in the strength and conditioning community. *Sports Med*. 2020;50:1559–65.
10. Kalinowski R, Pisz A, Kolinger D, Wilk M, Stastny P, Krzysztofik M. Acute effects of combined isometric and plyometric conditioning activities on sports performance and tendon stiffness in female volleyball players. *Front Physiol*. 2022;13:1025839.
11. Masel S, Maciejczyk M. Effects of Post-Activation performance enhancement on jump performance in elite volleyball players. *Appl Sci*. 2022;12:9054.
12. Berriel P, Cardoso GS, Costa AR, Rosa RG, Oliveira RB, Fernando H, Kruehl M. Effects of postactivation performance enhancement on the vertical jump in High-Level volleyball athletes. *J Hum Kinet*. 2022;82:145–53.
13. Krzysztofik M, Kalinowski R, Filip-Stachnik A, Wilk M, Zajac A. The effects of plyometric conditioning exercises on volleyball performance with Self-Selected rest intervals. *Appl Sci*. 2021;11:8329.
14. Andrews SK, Horodyski JM, Macleod DA, Whitten J, Behm DG. The interaction of fatigue and potentiation following an acute bout of unilateral squats. *J Sports Sci Med*. 2016;15:625–32.
15. Bartolomei S, De Luca R, Marcora SM. May a nonlocalized postactivation performance enhancement exist between the upper and lower body in trained men? *J Strength Cond Res*. 2023;37:68–73.
16. Cuenca-Fernández F, Smith IC, Jordan MJ, MacIntosh BR, López-Contreras G, Arellano R, et al. Nonlocalized postactivation performance enhancement (PAPE) effects in trained athletes: a pilot study. *Appl Physiol Nutr Metab*. 2017;42:1122–5.
17. Power GMJ, Colwell E, Saeterbakken AH, Drinkwater EJ, Behm DG. Lack of evidence for Non-Local muscle fatigue and performance enhancement in young adults. *J Sports Sci Med*. 2021;20:339–48.
18. Wong V, Yamada Y, Bell ZW, Spitz RW, Viana RB, Chatakondi RN, et al. Postactivation performance enhancement: does conditioning one arm augment performance in the other? *Clin Physiol Funct Imaging*. 2020;40:407–14.
19. Tillin NA, Bishop D. Factors modulating Post-Activation potentiation and its effect on performance of subsequent explosive activities. *Sports Med*. 2009;39:147–66.
20. Cairns SP, Borrani F. β -Adrenergic modulation of skeletal muscle contraction: key role of excitation-contraction coupling. *J Physiol*. 2015;593:4713–27.
21. Bartolomei S, Lanzoni IM, Fantozzi S, Cortesi M. A comparison between Non-Localized Post-Activation performance enhancements following resistance exercise for the upper and the lower body. *Appl Sci*. 2022;12:1639.
22. Kolinger D, Stastny P, Pisz A, Krzysztofik M, Wilk M, Tsoukos A, et al. High-Intensity conditioning activity causes localized postactivation performance enhancement and nonlocalized performance reduction. *J Strength Cond Res*. 2024;38:e1–7.
23. Krzysztofik M, Spieszny M, Trybulski R, Wilk M, Pisz A, Kolinger D, et al. Acute effects of isometric conditioning activity on the viscoelastic properties of muscles and sprint and jumping performance in handball players. *J Strength Cond Res*. 2023;37:1486–94.
24. Van Melick N, Meddeler BM, Hoogeboom TJ, Nijhuis-van Der Sanden MWG, Van Cingel REH. How to determine leg dominance: the agreement between self-reported and observed performance in healthy adults. *PLoS ONE*. 2017;12:e0189876.
25. Krzysztofik M, Wilk M, Pisz A, Kolinger D, Bichowska M, Zajac A, et al. Acute effects of High-Load vs. Plyometric conditioning activity on jumping performance and the Muscle-Tendon mechanical properties. *J Strength Cond Res*. 2023;37:1397–403.
26. Cohen J. *Statistical Power Analysis for the Behavioral Sciences*; Elsevier Science: Burlington, VT, USA, 2013; ISBN 978-1-483-2764-89.
27. Chiu LZF, Fry AC, Weiss LW, Schilling BK, Brown LE, Smith SL. Postactivation potentiation response in athletic and recreationally trained individuals. *J Strength Cond Res*. 2003;17:671–7.
28. Lim JH, Kong PW. Effects of isometric and dynamic postactivation potentiation protocols on maximal sprint performance. *J Strength Cond Res*. 2013;27:2730–6.
29. Seitz LB, Haff GG. Factors modulating Post-Activation potentiation of jump, sprint, throw, and Upper-Body ballistic performances: A systematic review with Meta-Analysis. *Sports Med*. 2016;46:231–40.

Publisher's note

Springer Nature remains neutral with regard to jurisdictional claims in published maps and institutional affiliations.



Article

No Evidence of PAPE-Induced Jumping Performance Enhancement Following Isometric and Treadmill Warm-Ups in Team Sport Athletes

Artur Terbalyan ^{1*}, Anna Ścisłowska-Czarnecka ², Adam Maszczyk ^{3*} and Robert Roczniok ⁴

¹ Institute of Sport Science, The Jerzy Kukuczka Academy of Physical Education, 40-065 Katowice, Poland; ORCID: 0000-0002-3628-8849

² Gdańsk University of Physical Education and Sport, Gdansk, Poland; ORCID: 0000-0001-8398-8912

³ Gdańsk University of Physical Education and Sport, Faculty of Physical Culture, Gdansk, Poland; ORCID: 0000-0001-9139-9747

⁴ Institute of Sport Science, The Jerzy Kukuczka Academy of Physical Education, 40-065 Katowice, Poland; ORCID: 0000-0001-6551-9151

* Correspondence: a.terbalyan@awf.katowice.pl; a.maszczyk@awf.katowice.pl

Abstract: Background: This study aimed to determine whether an isometric PAPE-based warm-up could enhance jumping performance compared to a traditional treadmill jogging warm-up in team sport athletes. The primary focus was on assessing neuromuscular activation and performance indicators such as jump height and force asymmetry. Materials and Methods: Fifty-three athletes from basketball, volleyball, handball, and soccer participated in a controlled, parallel-group experiment. Participants performed either a unilateral isometric warm-up protocol – comprising two sets of four exercises per leg – or a 5-minute treadmill jogging session, with jump performance assessed via countermovement jump tests on dual force plates. A split-plot ANOVA was employed to analyze key variables including jump height, concentric mean force asymmetry, and rate of force development. Results: Analysis revealed no significant differences in performance outcomes between the isometric and treadmill warm-up conditions. While a main effect of sex was observed on jump height, neither warm-up modality produced significant improvements in force asymmetry or rate of force development. Conclusions: Under the conditions tested, the isometric PAPE-based warm-up did not offer a performance advantage over traditional treadmill jogging. Further research is warranted to explore variations in intensity, duration, and protocol design to optimize acute neuromuscular responses.

Keywords: Post-Activation Performance Enhancement; Isometric Warm-Up; Jumping Performance; Neuromuscular Activation; Team Sport Athletes

Citation: Lastname F, Lastname F, Lastname F. Title. Balt J Health Phys Act. 2022;14(x):p-p. <https://doi.org/10.29359/BJHPA.xxxxx>

Academic Editor:
Firstname Lastname

Received: Month Year
Accepted: Month Year
Published: Month Year

Publisher's Note: Balt J Health Phys Act stays neutral with regard to jurisdictional claims in published maps and institutional affiliations.



Copyright: © 2022 by Gdansk University of Physical Activity and Sport. Submitted for possible open access publication under the terms and conditions of the Creative Commons Attribution (CC-BY-NC-ND) license (<https://creativecommons.org/licenses/by/4.0/>).

1. Introduction

Warm-up routines are an essential aspect of athletic preparation, aiming to enhance muscle temperature, neuromuscular efficiency, and overall performance while minimizing injury risk [1]. Traditional warm-ups typically include dynamic activities such as stretching and light aerobic exercise to increase blood flow and muscle elasticity. However, recent research has investigated alternative warm-up strategies, including isometric and unilateral exercises, which may provide additional benefits by optimizing neuromuscular performance and strength development [2,3].

Isometric exercises have emerged as an effective alternative to traditional warm-ups due to their ability to enhance strength, neuromuscular adaptations, and performance with minimal fatigue and injury risk. Unlike dynamic exercises, isometric contractions

involve maintaining a static position, which facilitates maximal muscle engagement without movement. A notable advantage of isometric maximal voluntary contractions (MVICs) is that they do not require prior determination of the one-repetition maximum (1RM), simplifying the warm-up process and reducing the time needed for preparation. These exercises can be tailored to specific sports and individual needs, making them highly versatile for athletic training regimens [4].

The concept of Post-Activation Performance Enhancement (PAPE) refers to the acute improvement in muscular performance following a conditioning activity, attributed to increased muscle temperature, phosphorylation of myosin regulatory light chains, and enhanced neural activation. PAPE has been shown to positively influence explosive movements, such as jumping performance, and may contribute to improved athletic outcomes [5]. Research suggests that isometric exercises, such as maximal isometric squats, can effectively induce PAPE and lead to enhancements in jump height and sprint speed [2,6].

Isometric PAPE protocols, such as maximal voluntary isometric contractions, have been demonstrated to enhance performance indicators, including peak velocities and impulse, in exercises such as the bench press [3]. This suggests that isometric PAPE has the potential to augment the velocity of lifts and optimize performance in strength exercises. Isometric training is associated with various forms of implementation. Overcoming isometrics (OI) can be defined as a specific type of isometric exercise that involves the exertion of force against an immovable object and has been shown to improve jumping performance [7]. However, there is a lack of research on the effect of overcoming isometrics on acute improvements in physical performance.

Unilateral training, which involves exercising one limb at a time, has gained prominence as a valuable tool for identifying and correcting muscular imbalances, improving stability, and enhancing coordination [8]. Unilateral exercises such as single-leg squats, lunges, and step-ups provide targeted strength development and have been shown to increase muscle activation compared to bilateral exercises [9].

One of the key benefits of unilateral training is its specificity to athletic movements, many of which, such as running and cutting, are predominantly unilateral. Research suggests that unilateral exercises improve neuromuscular adaptations by recruiting stabilizing muscles that are often under-utilized in bilateral exercises, leading to improved proprioception and balance [10]. Furthermore, unilateral training can support injury prevention by addressing asymmetries that may contribute to overuse injuries or compensatory movement patterns [11].

Incorporating unilateral exercises into warm-up protocols can improve functional strength, movement efficiency, and overall athletic performance. When combined with isometric training, these exercises may further enhance neuromuscular control and readiness for sport-specific activities. Indeed, previous research indicates that isometric and unilateral protocols represent a promising strategy for optimizing strength, neuromuscular adaptations, and stability. Consequently, this study aimed to evaluate whether a unilateral isometric PAPE-based warm-up could serve as a viable alternative 'inset' before training sessions, comparing its impact on key jumping performance indicators against a standard treadmill warm-up.

2. Materials and Methods

2.1. Participants

A total of 53 participants, comprising both male ($n=32$) and female ($n=21$) athletes, were drawn from four primary team sports: basketball ($n=12$), volleyball ($n=14$), handball ($n=12$), and soccer ($n=12$). Their mean age was 22.3 ± 1.92 years, with an average body mass of 74.99 ± 13.10 kg, height of 176.85 ± 9.01 cm, and body fat percentage of $17.49 \pm 8.91\%$ (Table 1). All participants abstained from resistance training for 48 hours before

testing to minimize confounding fatigue effects. Each individual received a detailed explanation of the study protocol, including potential benefits and risks, and provided written informed consent prior to participation.

Table 1. Essential characteristics of study precipitants by group (n = 53)

Variable	Total n = 53 (M ± SD; R)	Control n = 22 (M ± SD; R)	Experimental n = 31 (M ± SD; R)
Age (year)	22.3 ± 1.92; R: 19 - 25	22.01 ± 1.80; R: 18 - 25	22.16 ± 1.81; R: 19 - 25
Height (cm)	176.85 ± 9.01; R: 173 - 192	174.30 ± 8.22; R: 159 - 193	178.84 ± 8.80; R: 166 - 201
Weight (kg)	74.99 ± 13.10; R: 47 - 111	76.66 ± 12.77; R: 40 - 95	76.62 ± 14.00; R: 55 - 125
Lean body mass (kg)	34.72 ± 8.32; R: 19.9 - 56.6	33.01 ± 6.42; R: 18 - 47	34.93 ± 8.90; R: 17 - 53
Fat (%)	17.49 ± 8.91; R: 3.1 - 39	19.05 ± 9.47; R: 0 - 39	16.58 ± 10.18; R: -11 - 36

M – mean; SD – standard deviation; R – range

All testing was conducted in a controlled indoor environment, with ambient temperature maintained at $22 \pm 1^\circ\text{C}$ to minimize external influences on performance. To ensure consistency and reliability in performance measurements, all participants wore standard training shoes meeting the following criteria: maximum sole height of 3 cm to minimize the effect of cushioning on ground reaction forces, and a flat sole without excessive heel elevation to maintain natural ankle positioning. Shoes with high-impact absorption technologies (e.g., air cushions or spring systems) were not allowed to eliminate performance variability. Hydration and nutritional status were standardized, with participants instructed to follow predefined dietary guidelines in the 24 hours preceding testing. All performance assessments were conducted at the same time of day (± 1 hour) to control for potential circadian variations in neuromuscular function.

The subjects expressed their written consent to participate in the study. The study protocol was approved by the Bioethics Committee for Scientific Research of the Academy of Physical Education (03/2021), and all procedures were in accordance with the parameters of the ethics standard of the Declaration of Helsinki, 2013. All collected data were kept confidential and accessible only to the investigators, with anonymization applied to all documentation except consent forms.

2.2. Study design

The study employed a parallel-group, pre-post experimental design to examine the acute effects of isometric PAPE-based warm-up and treadmill jogging warm-up on jump performance in trained athletes. 53 participants were randomly assigned to one of the two warm-up conditions (Control vs Experimental; 22 vs 31). All testing was conducted in a controlled indoor environment, with ambient temperature maintained at $22 \pm 1^\circ\text{C}$ to minimize external influences on performance.

2.3. Experimental protocol

Participants performed two sets of four unilateral isometric exercises in a predetermined order to ensure consistent neuromuscular activation across trials. Each exercise followed a standardized protocol to control execution variability and maximize post-activation performance enhancement (PAPE) effects. Participants were instructed to exert maximal voluntary effort against immovable resistance, maintaining proper body alignment

and joint positioning. All exercises were executed unilaterally, with two repetitions per limb and two sets per exercise. Each contraction lasted 5 seconds, with 10 seconds of rest between repetitions and 1 minute between sets. This protocol was based on previous findings indicating its effectiveness in eliciting PAPE responses [12]. Verbal encouragement was consistently provided to ensure participants achieved maximal force output during each contraction.

All exercises were performed in a power rack, where the barbell was securely mounted at an adjustable height using inverted J-hooks to prevent any movement or against a rack in the vertical direction. The positioning of the barbell was individualized for each participant to ensure an optimal joint angle, before starting, participants were instructed to engage their core muscles and maintain an upright posture to ensure stability and minimize compensatory movements. A forceful isometric contraction was performed against the fixed barbell with the instruction to "push/pull as fast and hard as possible". After completion of the isometric warm-up, a five-minute passive rest period was observed prior to the jumping performance tests to minimize fatigue effects.

Following the completion of the warm-up, participants remained seated for a five-minute passive recovery period to allow for sufficient recovery while minimizing residual fatigue effects before performing the jump performance tests. This rest period was implemented based on prior research [13,14].

2.3.1. Isometric split squat push

Participants assumed a split stance position, ensuring a hip-width distance between their feet to maintain stability and minimize balance-related compensations. The front knee was flexed to approximately 90 degrees, aligning directly over the midfoot to ensure optimal joint alignment and force transmission. The back knee was positioned just above the ground with a slight bend, allowing for equal weight distribution between both lower limbs. Participants were instructed to keep their torso upright with a neutral lumbar spine position, avoiding any anterior pelvic tilt or excessive forward trunk lean. The barbell height was customized to ensure that the front thigh remained parallel to the ground (Figure 1A).

2.3.2. Isometric hip push

Participants assumed a supine position on the floor with their upper back and shoulders resting against a weight bench. The knees were flexed to approximately 90 degrees, with feet placed hip-width apart and flat on the ground. The torso remained in a neutral position, with the ribcage depressed to prevent excessive lumbar extension. Participants were instructed to engage their core and gluteal muscles to maintain proper spinal alignment and pelvic stability throughout the movement. A fixed barbell was positioned over the pelvic region at an individually adjusted height inside a power rack (Figure 1B).

2.3.3. Isometric hamstring pull

Participants assumed a standing position in front of a power rack. The working leg was flexed in the knee joint to approximately 90 degrees, while the contralateral leg remained extended and firmly planted on the ground for support. The ankle was dorsiflexed to enhance hamstring activation and prevent excessive involvement of the calf muscles. The torso remained upright, with the spine in a neutral position to avoid compensatory hip or lower-back movement (Figure 1C).

2.3.4. Isometric ankle push

Participants stood in a single-leg stance, with their forefoot placed on a stable platform while the heel remained slightly elevated, mimicking the plantar flexion phase of jumping. The contralateral leg was kept off the ground and the hip was flexed to ensure

isolated unilateral loading. The knee was slightly flexed to reduce strain on the Achilles tendon while maintaining optimal engagement of the gastrocnemius and soleus muscles. A fixed barbell was positioned above the forefoot at an individually determined height inside a power rack, restricting any visible movement (Figure 1D).



Figure 1. Isometric PAPE based warm-up. A) Split squat push; B) Hip push; C) Hamstring pull; D) Ankle push

2.4. Countermovement jump assessment

The Countermovement Jump (CMJ) assessment was performed using dual force plates (Force Decks, Vald Performance, Australia), a validated system for measuring vertical jump performance [15]. Prior to the first jump trial, participants stood on the plates for 3 seconds to measure body mass and establish a baseline posture, keeping the trunk upright, knees fully extended, feet shoulder-width apart, and hands resting on the hips. Before jump initiating, participants were instructed to descend to a self-selected depth and then explosively extend the hips, knees, and ankles to achieve maximal height. Three CMJ trials were performed in total. The highest CMJ was recorded for subsequent analysis. In addition to jump height, other performance variables were collected through the force plate software.

2.4.1. Justification of selected variables for jumping performance assessment

2.4.1.1. Jump height assessment

Jump height was estimated using the impulse-momentum (Imp-Mom) method. Force plate data were collected and integrated over time to calculate the vertical impulse, which was subsequently converted to jump height [16]. This method was selected because it robustly captures both the magnitude and temporal characteristics of force production, making it sensitive to neuromuscular enhancements such as those induced by isometric contractions [17].

2.4.1.2. Peak landing force asymmetry

Peak landing force was measured during the landing phase of the jump, and asymmetry was determined by comparing the forces generated by the left and right limbs. The selected metric provides a quantitative assessment of inter-limb imbalances, which have been linked to compensatory movement patterns and an increased risk of injury [18]. Moreover, unilateral isometric interventions have been shown to reduce such asymmetries, supporting their inclusion as a performance measure [19,20].

2.4.1.3. Concentric rate of force development (RFD)

The concentric RFD was calculated during the propulsive phase of the jump by determining the slope of the force-time curve. Literature suggests that an over-emphasis on isometric training may preferentially enhance maximal force output while not optimally improving rapid force generation [21].

2.4.1.4. Concentric mean force asymmetry

Concentric mean force asymmetry was computed by evaluating the bilateral differences in force output during the propulsive phase. Similar to the landing phase, asymmetries during the concentric phase can contribute to uneven joint loading and are considered important predictors of injury risk [18].

2.5. Control group

The treadmill jogging warm-up was individually adjusted based on heart rate responses to ensure that participants remained in a moderate-intensity aerobic zone for a fixed duration of 5 minutes. Real-time heart rate monitoring was carried out using the Polar H10 heart rate sensor (Polar Electro, Kempele, Finland). Participants' jogging intensity was continuously adjusted to maintain heart rate levels within 60-70% of their age-predicted maximal heart rate (HR_{max}), calculated using the Tanaka equation: $HR_{max} = 208 - 0.7 \times \text{age}$ (Tanaka et al., 2001). The warm-up was performed on a Technogym Skillrun TX 500 treadmill (Technogym, Cesena, Italy). The session lasted 5 minutes, and participants were instructed to maintain their heart rate within the specified range throughout the warm-up.

2.6. Statistical analysis

All analyses were conducted using Jamovi (2.3.21; The Jamovi project, Sydney, Australia) software. The normality of the data distributions was assessed using the Shapiro-Wilk test and the Levene test was utilized to evaluate the homogeneity of variances. The results are presented as means, standard deviations (SD), and 95% confidence intervals (CI). Given the study's design, a split-plot ANOVA was used to analyze the effects of time (pre vs. post, within-subject), warm-up type (isometric vs. treadmill, between-subject), and sex (male vs. female, between-subject) on performance outcomes. The analysis also included interaction terms: Time [2] × Group [2] to assess whether performance changes over time differed between warm-up conditions; Time [2] × Sex [2] to determine if males and females responded differently to warm-up interventions; Time [2] × Group [2] × Sex [2] to explore potential sex differences in warm-up effectiveness. All results are reported as means ± standard deviations (SD) and 95% confidence intervals (CI) where applicable. Given the lack of significant effects, post-hoc pairwise comparisons were not

required. Effect sizes (η^2) were computed and interpreted using Cohen's guidelines [22] (small = 0.01–0.059, moderate = 0.06–0.137, large > 0.137). Data outliers were assessed using box plots and Cook's distance, with no extreme values detected. Statistical significance was set at $p < 0.05$ for all analyses. The level of significance was interpreted as follows: $p < 0.05$ indicating moderate evidence against the null hypothesis; $p < 0.01$ providing strong evidence against the null hypothesis; $p < 0.001$ demonstrating very strong evidence against the null hypothesis.

3. Results

A parametric analysis of variance was selected for the analysis as the Shapiro–Wilk test indicated p -values > 0.05 for all variables, confirming the normality of the distributions. Additionally, Levene's test for homogeneity of variances also yielded p -values > 0.05 across all variables, supporting the assumption of homogeneity. Since the repeated measures design included only two levels, the assumption of sphericity was inherently satisfied in this case. Basic descriptive statistics and data normality is presented in table 2 below.

Table 2. Basic descriptive statistics

Parameter	Group	Sex	PRE		POST	
			Mean $\pm$ SD (95 % CI)	W (p)	Mean $\pm$ SD (95 % CI)	W (p)
Concentric Mean Force	CON	F	-1.18 $\pm$ 11.62 (-13.38; 11.01)	0.912 (0.449)	2.07 $\pm$ 8.24 (-6.58; 10.72)	0.920 (0.503)
		M	0.32 $\pm$ 6.51 (-3.61; 4.26)	0.864 (0.044)	2.13 $\pm$ 7.72 (-2.53; 6.80)	0.983 (0.992)
Asymmetry [% L,R]	EXP	F	4.03 $\pm$ 10.61 (-1.85; 9.90)	0.929 (0.261)	2.55 $\pm$ 9.72 (-2.83; 7.93)	0.929 (0.259)
		M	1.15 $\pm$ 10.47 (-3.90; 6.19)	0.949 (0.380)	1.64 $\pm$ 11.44 (-3.88; 7.15)	0.896 (0.041)
Jump Height (Imp-Mom) [cm]	CON	F	29.15 $\pm$ 12.20 (16.35; 41.95)	0.796 (0.054)	33.05 $\pm$ 9.64 (22.94; 43.16)	0.917 (0.481)
		M	40.24 $\pm$ 11.60 (33.23; 47.25)	0.946 (0.545)	38.38 $\pm$ 12.1 (31.05; 45.70)	0.962 (0.778)
	EXP	F	28.51 $\pm$ 10.46 (22.72; 34.30)	0.888 (0.062)	27.02 $\pm$ 8.77 (22.16; 31.87)	0.916 (0.170)
		M	37.77 $\pm$ 8.26 (33.79; 41.76)	0.986 (0.991)	38.33 $\pm$ 9.95 (33.54; 43.12)	0.925 (0.140)
Peak Landing Force Asymmetry [% L,R]	CON	F	-7.60 $\pm$ 46.52 (-56.42; 41.22)	0.932 (0.597)	0.53 $\pm$ 16.6 (-16.89; 17.95)	0.931 (0.590)
		M	2.30 $\pm$ 37.53 (-20.38; 24.98)	0.950 (0.604)	-0.34 $\pm$ 26.8 (-16.5; 15.90)	0.867 (0.048)
	EXP	F	1.82 $\pm$ 20.99 (-9.81; 13.45)	0.968 (0.829)	7.13 $\pm$ 25.08 (-6.76; 21.02)	0.937 (0.341)
		M	15.31 $\pm$ 22.75 (4.34; 26.28)	0.921 (0.117)	8.17 $\pm$ 19.64 (-1.30; 17.63)	0.948 (0.372)
	CON	F	1853.7 $\pm$ 950.1 (856.6; 2850.8)	0.924 (0.533)	1712. $\pm$ 1092.6 (565; 2858)	0.832 (0.112)

Concentric RFD [N/s]	EXP	M	1791.1 ± 1293.9 (1009; 2572)	0.927 (0.314)	1479 ± 1119 (802.8; 2155)	0.885 (0.084)
		F	980.3 ± 648.9 (620.9 – 1339.6)	0.932 (0.294)	1542 ± 572 (1225.6; 1859)	0.928 (0.257)
		M	3043.0 ± 2505.3 (1835; 4250)	0.882 (0.023)	2261 ± 1739 (1423.1; 3099)	0.855 (0.008)

M – male; F – female; CI – confidence interval; W – Shapiro wilk statistic value; p – statistical probability; SD – standard deviation

The results of the analysis of variance for concentric peak force asymmetry revealed no significant differences across the main effects or interactions (Figure 2). Specifically, the main effect of the time point (pre vs. post) was not statistically significant ($F = 0.146$; $p = 0.704$). Similarly, the interaction between time point and the group did not show significant differences ($F = 2.546$; $p = 0.117$), nor did the interaction between time point and sex ($F = 0.626$; $p = 0.432$). Additionally, the three-way interaction among time point, group, and sex was not significant ($F = 0.860$; $p = 0.358$). For the between-subjects effects, no significant differences were identified for the main effect of the group ($F = 1.201$; $p = 0.278$) or for the main effect of sex ($F = 0.001$; $p = 0.972$). Furthermore, the interaction between group and sex did not yield significant results ($F = 0.194$; $p = 0.662$).

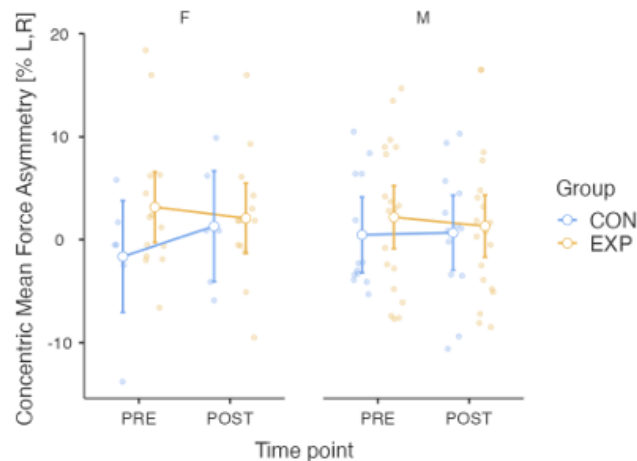


Figure 2. Concentric mean force asymmetry variation analysis

The analysis of variance for jump height impulse revealed no significant main effects or interactions for within-subjects effects (Figure 3). Specifically, the main effect of the time point (pre vs. post) was not statistically significant ($F = 0.028$; $p = 0.868$). Similarly, no significant interaction was observed between time point and group ($F = 0.203$; $p = 0.654$), time point and sex ($F = 0.317$; $p = 0.576$) or the three-way interaction among time point, group, and sex ($F = 1.402$; $p = 0.242$). For between-subjects effects, a significant main effect of sex was observed ($F = 12.717$; $p < 0.001$; $\eta^2 = 0.070$). However, the main effect of the group was not significant ($F = 0.784$; $p = 0.380$), nor was the interaction between group and sex ($F = 0.161$; $p = 0.690$).

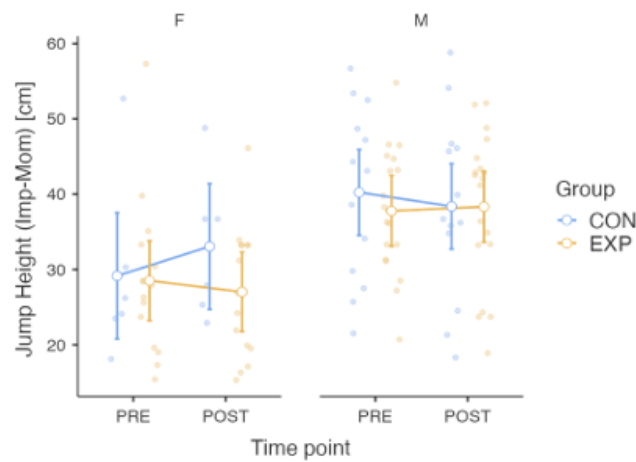


Figure 3. Jump height variation analysis

The analysis of variance for peak landing asymmetry revealed no significant main effects or interactions for within-subjects effects (Figure 4). The main effect of the time point (pre vs. post) was not statistically significant ($F = 0.026$; $p = 0.873$). Similarly, no significant interactions were observed between time point and group ($F = 0.104$; $p = 0.749$), time point and sex ($F = 1.043$; $p = 0.312$), or the three-way interaction among time point, group, and sex ($F = 0.006$; $p = 0.941$). For between-subjects effects, no significant main effect of the group was detected ($F = 2.791$; $p = 0.101$). Similarly, the main effect of sex did not reach statistical significance ($F = 1.100$; $p = 0.300$). Additionally, the interaction between group and sex was not significant ($F = 0.060$; $p = 0.808$).

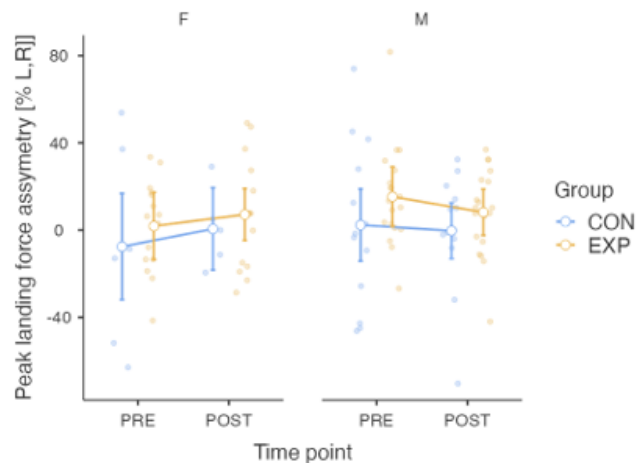


Figure 4. Peak landing force asymmetry variation analysis

The analysis of variance for the concentric rate of force development (RFD) revealed no significant main effects or interactions for within-subjects effects (Figure 5). The main effect of the time point (pre vs. post) was not statistically significant ($F = 0.758$; $p = 0.388$). Similarly, no significant interaction was observed between time point and group ($F = 0.092$; $p = 0.763$). While the interaction between time point and sex approached significance ($F = 3.841$; $p = 0.056$; $\eta^2 = 0.005$), it did not reach the threshold for statistical significance. Additionally, the three-way interaction among time point, group, and sex was not significant ($F = 2.306$; $p = 0.135$). For between-subjects effects, no significant main effect of the group was found ($F = 0.362$; $p = 0.550$). Similarly, the main effect of sex did not reach statistical significance ($F = 2.277$; $p = 0.138$). The interaction between group and sex also did not reach significance but was closer to the threshold ($F = 3.490$; $p = 0.068$; $\eta^2 = 0.021$).

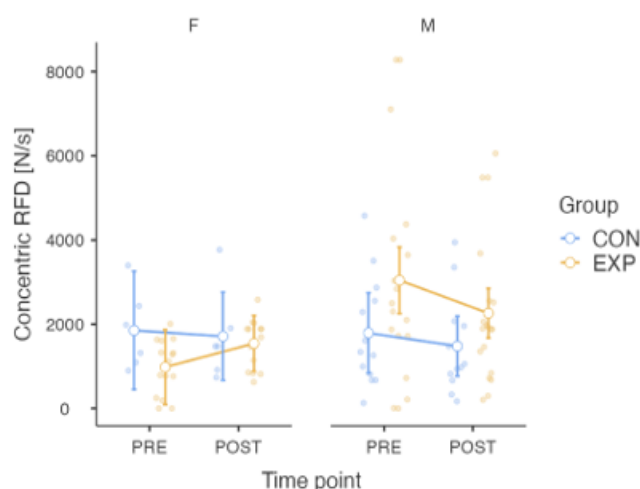


Figure 5. Concentric RFD variation analysis

4. Discussion

The present study investigated the effects of PAPE-based isometric warm-up compared to traditional treadmill jogging on jumping performance in trained and untrained individuals. The findings suggest that neither warm-up protocol significantly altered performance outcomes in countermovement jump (CMJ), despite the theoretical benefits of PAPE in performance improvement or neuromuscular benefits.

Previous studies have demonstrated that PAPE can enhance explosive performance by improving muscle stiffness, and calcium ion sensitivity [4]. However, our findings align with those of Vargas-Molina et al. [5], who reported inconsistent effects of isometric contractions on vertical jump height, suggesting that interindividual variability and the timing of PAPE effects may play a critical role. Furthermore, isometric exercises are often considered superior to traditional dynamic warm-ups due to their time efficiency and reduced fatigue accumulation [6]. However, in this study, no significant improvements were observed, which may be attributed to the relatively short rest intervals or insufficient stimulus intensity.

Moreover, unilateral exercises have been proposed to address strength imbalances and improve motor unit recruitment in sport-specific movements [8]. Despite their theoretical advantages, our results did not show a significant benefit of unilateral isometric warm-up over bilateral dynamic jogging in improving force asymmetry or enhancing rate

of force development (RFD). This finding aligns with the work of Zhang et al. [11], highlighting that while unilateral training can improve specific strength aspects, its impact on acute performance enhancement remains unclear.

One possible explanation for the lack of significant improvements is the insufficient duration and intensity of the isometric warm-up. As Lim et al. [3] suggest, the effectiveness of isometric contractions in eliciting PAPE may depend on the load intensity and the duration of muscle activation. In the current study, the participants performed two repetitions of 5-second contractions per leg, which may not have provided an adequate stimulus for meaningful neuromuscular potentiation.

Furthermore, treadmill jogging as a warm-up modality has been shown to effectively elevate muscle temperature and increase blood flow [1], which are critical factors for optimizing performance. The lack of a significant difference between jogging and isometric warm-up may indicate that the former provides an equally effective means of physiological preparation without the added complexity of isometric contractions. In contrast was study by Paris et al. [23] reported that traditional aerobic warm-ups by itself are effective in maintaining performance levels across a range of athletic tasks.

Research has indicated that isometric exercises, particularly maximal voluntary isometric contractions (MVIC), can effectively induce PAPE and enhance performance in exercises such as the power clean and vertical jump [6,24]. Short-duration maximal isometric contractions have been shown to improve lift velocity, thereby enhancing performance in strength exercises [3]. Different protocols of isometric exercises can lead to varying degrees of performance enhancement. Brief-duration continuous and repetitive maximal voluntary contraction (MVC) protocols are particularly effective for PAPE.

PAPE protocols can enhance specific aspects of athletic performance, such as sprinting and jumping, under certain conditions. However, the effectiveness of PAPE varies widely depending on the sport, the specific protocol used, and the athlete's training background [25]. While some studies show benefits, others suggest that PAPE effects may not exceed those of traditional warm-ups. For example, PAPE can enhance vertical jump performance, as seen in high-level volleyball athletes where PAPE increased countermovement jump height by proximately 15% [26,27]. However, other studies indicate that PAPE does not significantly enhance jumping performance beyond warm-up effects [28].

There may be sex-specific trends in how individuals respond to an isometric PAPE-based warm-up versus a treadmill warm-up. One possibility is that isometric stimuli could have provided a stronger neuromuscular impetus—especially in certain subgroups—thereby “almost” enhancing the rate of force development (RFD) in one sex more than the other ($p = 0.068$). For example, Arabatzi et al. [29] found that the PAPE effect on squat jump performance was sex-dependent and occurred only in men. Nevertheless, Evetovich et al. [30] found that there is a phenomenon of “non-responders” after a PAP-inducing protocol which may be sex-independent.

4.1. Limitations

Several limitations of this study should be acknowledged. First, the sample size, although moderately sufficient for preliminary analysis, may have been too small to detect subtle sex-specific or group-by-sex interactions, especially given the borderline significance in certain variables. Second, the duration and intensity of the isometric warm-up may not have provided an optimal stimulus to elicit robust post-activation performance enhancement (PAPE). Future research could investigate whether longer contraction times, additional sets, or different joint angles might yield stronger neuromuscular potentiation. Third, only two warm-up modalities (isometric and treadmill-based) were compared; thus, these findings may not extend to other widely used methods, such as dynamic stretching or plyometric-based warm-ups. Moreover, participants had heterogeneous backgrounds (basketball, volleyball, handball, soccer), and subtle sport-specific demands

might have influenced the warm-up responses. Finally, the data were collected simultaneously, limiting insights into potential cumulative or longitudinal effects on performance.

4.2. Future research directions

Building on these findings, larger cohort studies with more homogeneous athlete populations could help clarify whether specific subgroups (e.g., predominantly fast-twitch, higher training age) or one sex might benefit more from isometric PAPE protocols. Adjustments in isometric dosage—including force magnitudes, rest intervals, and exercise volume—could be explored to identify an optimal “dose-response” relationship for consistently eliciting PAPE. Further, combined warm-up strategies, merging isometric and traditional aerobic components, deserve attention to determine whether adding an isometric component to a standard jogging protocol can amplify performance benefits when time constraints are minimal. Finally, longitudinal studies investigating how repeated exposure to isometric warm-ups might influence chronic adaptations—such as strength gains, injury rates, and muscular asymmetries—would provide valuable insights for coaches and practitioners seeking evidence-based methods to optimize athlete preparation.

4.3. Practical implications

The findings of this study indicate that neither the isometric PAPE-based warm-up nor the traditional treadmill jogging elicited meaningful improvements in jumping performance metrics under the tested conditions. While both warm-up strategies appear feasible and safe, no clear performance advantage was observed for either method. Consequently, the choice between isometric and treadmill-based warm-ups may be guided primarily by logistical factors—such as equipment availability, training environment, and athlete preferences—rather than by evidence of superior performance gains.

In settings where time or space is limited, short-duration isometric exercises can still serve as an alternative pre-training warm-up, whereas traditional jogging remains a standard option for elevating muscle temperature and promoting aerobic readiness. Conversely, when time is not a constraint, practitioners may consider combining both isometric and treadmill activities to capture the unique benefits of each method—namely, the neuromuscular engagement of isometrics and the enhanced blood flow of treadmill running. Nevertheless, to optimize explosive outputs such as jump height or rate of force development, it may be necessary to supplement these approaches with longer rest intervals, higher intensities, or additional targeted interventions.

5. Conclusions

The primary objective of this study was to assess whether a unilateral isometric PAPE-based warm-up protocol could serve as a viable alternative to a traditional treadmill jogging warm-up in enhancing key jumping performance indicators among trained athletes. The results demonstrated no statistically significant differences between the two warm-up modalities across variables such as jump height, force asymmetry, and concentric rate of force development. These findings suggest that, under the specific conditions and stimulus parameters employed in this study, the isometric warm-up did not elicit a superior neuromuscular potentiation compared to the conventional treadmill protocol. Given that both warm-up strategies produced comparable acute outcomes, the data imply that the efficacy of isometric PAPE may be highly sensitive to factors such as contraction intensity, duration, and exercise volume. It is plausible that modifications to these parameters could yield more pronounced performance enhancements. However, any new hypotheses or recommendations for protocol adjustments must be considered tentative until substantiated by further targeted research. In summary, while both warm-up methods are feasible and safe for pre-training application, the present evidence does not unequivocally

support the superiority of a unilateral isometric PAPE-based warm-up over a traditional treadmill jogging protocol for enhancing acute jumping performance

Author Contributions: Study Design, AT; Data Collection, AT; Statistical Analysis, AT; Data Interpretation, AT, AŚC and AM; Manuscript Preparation, AŚC and AT; Literature Search, RR; Funding Acquisition, AM. All authors have read and agreed to the published version of the manuscript.

Funding: This research received no external funding

Institutional Review Board Statement: The study was conducted in accordance with the Declaration of Helsinki and approved by the Institutional Review Board of the Academy of Physical Education (03/2021, date of approval: 09/03/2021).

Informed Consent Statement: Informed consent was obtained from all subjects involved in the study. Written informed consent has been obtained from the participants to publish this paper.

Data Availability Statement: The data supporting the reported results are available upon reasonable request from the corresponding author. Due to ethical restrictions and participant confidentiality, the dataset is not publicly available.

Acknowledgments: The authors would like to acknowledge the support of Institute of Sport Science for providing access to facilities and equipment used in this study. We also extend our gratitude to the athletes and coaches who participated in the research.

Conflicts of Interest: The authors declare no conflict of interest. The funders had no role in the design of the study, in the collection, analyses, or interpretation of data, in the writing of the manuscript, or in the decision to publish the results.

References

1. Racinais S, Cocking S, Périard JD. Muscle temperature and performance. *Sports Med.* 2017;47(4):669-678.
2. Spieszny M, Trybulski R, Biel P, Zajac A, Krzysztofik M. Post-isometric back squat performance enhancement of squat and countermovement jump. *Int J Environ Res Public Health.* 2022;19(19):12720.
3. Lima LC, Oliveira FB, Oliveira TP, Assumpção Cde O, Greco CC, Cardozo AC, Denadai BS. Postactivation potentiation biases maximal isometric strength assessment. *Biomed Res Int.* 2014;126961.
4. Blazevich AJ, Babault N. Post-activation potentiation versus post-activation performance enhancement in humans: Historical perspective, underlying mechanisms, and current issues. *Front Physiol.* 2019;10:1359.
5. Vargas-Molina S, García-Santana S, Álvarez-Fernández E, Agaña M, Marín-Pagán C, Roche E. Comparison of post-activation performance enhancement (PAPE) after isometric and isotonic exercise on vertical jump performance. *PLoS One.* 2021;16(12).
6. Lum D, Tan F, Pang J, Barbosa TM. The effectiveness of maximal voluntary isometric contractions on strength performance. *Strength Cond J.* 2023;45(3):78-89.
7. Persson J, Persson H. Overcoming isometrics and its effects on strength, power and jump height: An interventional study on young elite female football players. Dissertation. 2024.
8. McCurdy K, Conner C. Unilateral support resistance training incorporating the hip and knee. *Strength Cond J.* 2003;25:45-51.
9. Behm DG, Power KE, Drinkwater EJ. Muscle activation is enhanced with multi- and uni-articular bilateral versus unilateral contractions. *Can J Appl Physiol.* 2003;28(1):38-52.
10. Helme M, Emmonds S, Low C. Is the rear foot elevated split squat unilateral? An investigation into the kinetic and kinematic demands. *J Strength Cond Res.* 2022;36(7):1781-1787.
11. Zhang W, Chen X, Xu K, Xie H, Li D, Ding S and Sun J. Effect of unilateral training and bilateral training on physical performance: A meta-analysis. *Front. Physiol.* 2023;14:1128250
12. Skurvydas A, Jurgelaitienė G, Kamandulis S, Mickevičienė D, Brazaitis M, Valančienė D, et al. What are the best isometric exercises of muscle potentiation? *Eur J Appl Physiol.* 2019;119:1029-1039.
13. Dobbs WC, Toluoso DV, Fedewa MV, Esco MR. Effect of postactivation potentiation on explosive vertical jump: A systematic review and meta-analysis. *J Strength Cond Res.* 2019;33(7):2009-2018.
14. Wilson JM, Duncan NM, Marin PJ, Brown LE, Loenneke JP, Wilson SM. Meta-analysis of postactivation potentiation and power: Effects of conditioning activity, volume, gender, rest periods, and training status. *J Strength Cond Res.* 2013;27(3):854-859.

15. Heishman AD, Daub BD, Miller RM, Freitas ED, Frantz BA, Bemben MG. Influence of countermovement jump protocol on reactive strength index-modified and flight time to contraction time: Reliability and minimal detectable change values. *Meas Phys Educ Exerc Sci*. 2020;24(2):101-109.
16. Marković G, Dizdār D, Jukić I, Cardinale M. Reliability and factorial validity of squat and countermovement jump tests. *J Strength Cond Res*. 2004;18(3):551-555.
17. Behm DG, Sale DG. Intended rather than actual movement velocity determines velocity-specific training response. *J Appl Physiol*. 1993;74(1):359-368.
18. Hewett TE, Myer GD, Ford KR. Prevention of anterior cruciate ligament injuries. *Curr Womens Health Rep*. 2001;1(3):218-224.
19. Myer GD, Ford KR, Hewett TE. Rationale and clinical techniques for an effective asymmetry reduction program in athletic training and rehabilitation. *Int J Sports Phys Ther*. 2013;8(2):262-270.
20. Fox KT, Pearson LT, Hicks KM. The effect of lower inter-limb asymmetries on athletic performance: A systematic review and meta-analysis. *PLoS One*. 2023;18(6)
21. Aagaard P, Simonsen EB, Andersen JL, Magnusson P, Dyhre-Poulsen P. Increased rate of force development and neural drive of human skeletal muscle following resistance training. *J Appl Physiol*. 2002;93(4):1318-1326.
22. Cohen J. Statistical power analysis for the behavioral sciences. 2nd ed. Lawrence Erlbaum Associates; 1988.
23. Paris, H. L., Sinai, E. C., Leist, M. A., Crain, C. M., Keller, A. M., Malysa, W., & Renzullo, S. C. Warm up intensity influences running performance despite prolonged recovery. *International Journal of Sports Science & Coaching*, 2021;16(5):1196-1203.
24. Koźlenia D, Domaradzki J. Effects of isometric warm-ups on strength performance. *Strength Cond J*. 2023;45(3):78-89.
25. Fischerova P, Krosta R, Gołaś A, Terbalyan A, Nitychoruk M, Maszczyk A. Effect of power on agility, linear speed and change of direction deficit in female soccer players. *Physical Activity Review*. 2021;9(1):109-116.
26. Berriel GP, Cardoso AS, Costa RR, Rosa RG, Oliveira HB, Kruel LFM, Peyré-Tartaruga LA. Effects of Postactivation Performance Enhancement on The Vertical Jump in High-Level Volleyball Athletes. *J Hum Kinet*. 2022 Apr 26;82:145-153.
27. Terbalyan A, Mikołajec K, Krzysztofik M, Urbański R, Jarosz J, Stastny P, Spieszny M. Effects of overcoming isometric unilateral conditioning activity on subsequent single-leg drop jump in elite and amateur volleyball players: a randomized crossover trial. *BMC Sports Sci Med Rehabil*. 2025, 28;17(1):30.
28. Rappelt N, Seidel G, Frosch K, Döring L, Pfeiffer M. Comparing traditional warm-ups and PAPE protocols in elite athletes. *Int J Sports Sci Coach*. 2024;19(2):112-124.
29. Arabatzi F, Patikas D, Zafeiridis A, Giavroudis K, Kannas T, Gourgoulis V, et al. The post-activation potentiation effect on squat jump performance: Age and sex effect. *Pediatr Exerc Sci*. 2014;26(2):187-194.
30. Evetovich TK, Conley DS, McCawley PF. Postactivation potentiation enhances upper- and lower-body athletic performance in collegiate male and female athletes. *J Strength Cond Res*. 2015;29(2):336-342.

Uchwała Nr 3/2021
Uczelnianej Komisji Bioetycznej ds. Badań Naukowych przy Akademii Wychowania
Fizycznego im. Jerzego Kukuczki w Katowicach
z dnia 17 czerwca 2021 roku
ws. opinii o projekcie eksperymentu medycznego.

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

§ 1.

Uczelniana Komisja Bioetyczna ds. Badań Naukowych przy Akademii Wychowania Fizycznego im. Jerzego Kukuczki w Katowicach po przeanalizowaniu wniosku zgłoszonego przez dr Michała Krzysztofika nt. „Analiza struktury wewnętrznej i zewnętrznej zdolności szybkościowo-siłowych z uwzględnieniem umiejętności zmiany kierunku biegu oraz ocena wpływu ukierunkowanego treningu na bezpośrednie i długofalowe zmiany adaptacyjne” oraz wysłuchaniu dodatkowych informacji i w wyniku przeprowadzonej dyskusji oraz głosowania

podjęła uchwałę o pozytywnym zaopiniowaniu wniosku

§ 2.

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

§ 3.

Komisja oczekuje raportu z badania po jego zakończeniu.

Do wiadomości:

1. dr Michał Krzysztofik;
2. aa

PRZEWODNICZĄCY
Komisji Bioetycznej ds. Badań Naukowych
Akademii Wychowania Fizycznego
im. Jerzego Kukuczki w Katowicach

dr hab. Krzysztof Ficek, prof. AWF Katowice

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

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

Ja, niżej podpisany/a ARTUR TERBAŁYAN..... oświadczam, że
Imię i nazwisko autora rozprawy

podczas przygotowania rozprawy doktorskiej mojego autorstwa pod tytułem: OCENA ZJAWISKA

POSTAKTYWACyjNEJ POPRAWY SPRAWNOŚCI FIZYCZNYCH W KONTEKSTACH WYBRANYCH
tytuł rozprawy

WSKAZUJĄC WYDOLNOŚĆ NERWOWO-MIĘŚNIOWĄ KOŃCZYN DOŁNYCH

☒ Nie korzystałem/am z narzędzi sztucznej inteligencji.

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

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

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

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

Data i Podpis Doktoranta:



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