SVEUČILIŠTE U SPLITU
KINEZIOLOŠKI FAKULTET
DOKTORSKI STUDIJ

Giuseppe Penna

MEHANIČKI INTENZITET UDARCA U BOKSU: POVEZANOST S BIOLOŠKIM UKAZATELJIMA TIJEKOM BOKSAČKI SPECIFIČNE INTERVALNE VJEŽBE

DOKTORSKA DISERTACIJA

Split, 2026.

Sadržaj

1 Uvod ... 11

1.1 Model sportske izvedbe u boksu ... 11

1.2 Mehanički intenzitet udarca i sportska izvedba ... 13

1.3 Fiziološki odgovori i mehanički intenzitet udarca ... 15

1.4 Neuromuskularne karakteristike donjih ekstremiteta i mehanički intenzitet udarca 17

1.5 Prethodne znanstvene spoznaje ... 19

2 Problem i obrazloženje istraživanja ... 20

3 Ciljevi i hipoteze istraživanja ... 23

3.1 Ciljevi istraživanja ... 23

3.2 Hipoteze istraživanja ... 24

4 Metode ... 25

4.1 Opći dizajn i faze istraživanja ... 25

4.1.1 Faza 1 – Sustavni pregled ... 27

4.1.2 Faza 2 – Pilot - istraživanje ... 28

4.1.3 Faza 3 – Glavno eksperimentalno istraživanje ... 29

4.2 Sudionici ... 30

4.3 Uzorak varijabli i mjerni instrumenti ... 31

4.4 Eksperimentalni postupak ... 35

4.5 Statističke analize ... 40

5 Rezultati ... 46

5.1 Faza 1 – Sustavni pregled ... 46

5.2 Faza 2 – Pilot - istraživanje ... 49

5.2.1 Rezultati RPAT-a ... 50

5.2.2 Preliminarna metodološka karakterizacija RPAT-a ... 51

5.3 Faza 3 – Glavno eksperimentalno istraživanje ... 52

5.3.1 Karakteristike uzorka ... 52

5.3.2 H1 – Tijek mehaničkog intenziteta uzastopnih udaraca i fizioloških odgovora tijekom rundi RPAT-a ... 53

5.3.3 H2 – Odnosi između mehaničkog intenziteta uzastopnih udaraca i fizioloških odgovora ... 56

5.3.4 H3 – Razlike s obzirom na natjecateljsku razinu i spol ... 58

5.3.5 Metodološka karakterizacija RPAT-a u ukupnom uzorku ... 59

5.3.6 Pouzdanost mišićno-tetivne krutosti u statičkim uvjetima dominantnog donjeg ekstremiteta ... 61

5.3.7 H4 – Odnosi između neuromuskularnih karakteristika donjih ekstremiteta i mehaničkog intenziteta pojedinačnog udarca ... 61

5.3.8 H5 – Razlike s obzirom na spol i natjecateljsku razinu u neuromuskularnim karakteristikama donjih ekstremiteta i mehaničkom intenzitetu pojedinačnog udarca . 65

6 Rasprava ... 69

6.1 Sažetak glavnih rezultata ... 69

6.2 RPAT: mehanički intenzitet uzastopnih udaraca i fiziološki odgovori ... 71

6.3 Metodološka karakterizacija RPAT-a ... 77

6.4 Neuromuskularne karakteristike donjih ekstremiteta i mehanički intenzitet pojedinačnog udarca ... 79

6.5 Integracija triju faza istraživanja: Sustavni pregled → Pilot istraživanje → Glavno eksperimentalno istraživanje ... 86

7 Znanstveni i praktični značaj te ograničenja istraživanja ... 88

7.1 Znanstveni doprinos ... 88

7.2 Praktične implikacije ... 89

7.3 Ograničenja istraživanja ... 91

8 Zaključci ... 94

9 Bibliografija ... 95

Sažetak

Boks je intervalni borilački sport visokog intenziteta u kojem sportska izvedba ovisi o interakciji tehničkih, taktičkih i kondicijskih komponenti te o sposobnosti izvođenja i održavanja učinkovitih napadačkih i obrambenih akcija tijekom vremena. U tom kontekstu, sposobnost izvođenja brzih i snažnih udaraca te održavanja njihova intenziteta tijekom ponavljanih napora predstavlja središnji aspekt sportske izvedbe u boksu. Nadalje, fiziološki odgovori i neuromuskularne karakteristike donjih ekstremiteta predstavljaju dodatne relevantne aspekte za razumijevanje sportske izvedbe u boksu i mogućih varijabli povezanih s mehaničkim intenzitetom udarca. Unatoč važnosti tih komponenti, dostupni znanstveni dokazi obilježeni su izraženom metodološkom heterogenošću te su pokazatelji mehaničkog intenziteta udarca, fiziološki odgovori i neuromuskularne karakteristike donjih ekstremiteta pretežno analizirani odvojeno. Također, spoznaje o mogućim razlikama povezanima sa spolom i natjecateljskom razinom još su uvijek ograničene.

Cilj ovog istraživanja bio je integrirano istražiti mehaničke, fiziološke i neuromuskularne komponente povezane sa sportskom izvedbom u boksu. Konkretno, analizirani su mehanički intenzitet uzastopnih udaraca, srednja srčana frekvencija (HRmean) i srednja potrošnja kisika (VO_2mean) tijekom izvođenja testa sposobnosti ponavljanja udaraca (engl. *Repeated Punch Ability Test*, RPAT). Također su analizirani kretanje tih varijabli tijekom različitih rundi protokola, odnosi između mehaničkog intenziteta uzastopnih udaraca i fizioloških odgovora te razlike povezane sa spolom i natjecateljskom razinom. Istraživanje je dodatno obuhvatilo metodološku karakterizaciju RPAT-a te je prošireno na mišićno-tetivnu krutost u statičkim uvjetima specifičnih anatomskih regija dominantnog donjeg ekstremiteta, eksplozivnu snagu donjih ekstremiteta i mehanički intenzitet pojedinačnog udarca, pri ćemu su analizirani mogući odnose između tih varijabli i razlike povezane sa spolom i natjecateljskom razinom.

Istraživanje je bilo strukturirano u tri uzastopne faze. Prva faza obuhvatila je sustavni pregled literature s kvalitativnom sintezom, proveden prema smjernicama PRISMA 2020 i strukturiran prema modelu PICOS. Sustavni pregled obuhvatio je opservacijska i eksperimentalna istraživanja boksača aktivno uključenih u trening ili natjecanje te je

analizirao pokazatelje izvedbe udarca, fiziološke odgovore i neuromuskularne karakteristike donjih ekstremiteta. Identificirani dokazi pokazali su izraženu heterogenost u karakteristikama uzoraka, eksperimentalnim protokolima, mjernim instrumentima i razmatranim ishodima. Pokazatelji izvedbe udarca i fiziološki odgovori pretežno su analizirani odvojeno, dok su neuromuskularne karakteristike donjih ekstremiteta još uvijek bile istražene u ograničenoj mjeri, pretežno putem parametara eksplozivne snage. Konkretno, nijedno od uključenih istraživanja nije izvijestilo o izravnim mjerenjima mišićno-tetivne krutosti donjih ekstremiteta u boksu. Sustavni pregled također je pokazao ograničenu zastupljenost sportašica i potrebu za detaljnijim istraživanjem mogućih razlika povezanih sa spolom i natjecateljskom razinom. Ti su dokazi definirali znanstveni okvir za razvoj sljedećih eksperimentalnih faza.

Druga faza obuhvatila je pilot-istraživanje provedeno na 20 boksača, uključujući 10 elitnih i 10 neelitnih sportaša, ravnomjerno raspoređenih prema spolu. Istraživanje je predstavljalo prvu eksperimentalnu primjenu RPAT-a usmjerenu na analizu mehaničkog intenziteta uzastopnih udaraca i fizioloških odgovora tijekom različitih rundi protokola. Mehanički intenzitet uzastopnih udaraca opisan je srednjim Intensity Scoreom (ISmean), kompozitnim indeksom koji sustav Hykso generira iz inercijskih podataka zabilježenih tijekom izvođenja udaraca, dok su vrijednosti HRmean i VO_2mean korištene za opis fizioloških odgovora. RPAT je također ponovljen kod istih sudionika u standardiziranim eksperimentalnim uvjetima, što je omogućilo preliminarnu metodološku karakterizaciju analizom test–retest pouzdanosti, pogreške mjerenja i osjetljivosti. Rezultati pilot-faze pružili su prve pokazatelje kretanja mehaničkih i fizioloških varijabli tijekom protokola i njihovih mogućih odnosa, istodobno ukazujući na potrebu za opreznom interpretacijom usporedbi povezanih sa spolom i natjecateljskom razinom zbog male veličine podskupina. Dvadeset sudionika uključenih u pilot-istraživanje naknadno je uključeno u glavno eksperimentalno istraživanje.

Treća faza obuhvatila je glavno eksperimentalno istraživanje, u kojem je uzorak proširen na 40 boksača, uključujući 20 elitnih i 20 neelitnih sportaša, s ukupno 20 muškaraca i 20 žena te četiri podskupine svaka po 10 sudionika. U ukupnom uzorku analizirani su ISmean, HRmean i VO_2mean tijekom svake od tri runde RPAT-a. Metodološka karakterizacija protokola, započeta u pilot-istraživanju, proširena je na ukupni uzorak procjenom test–retest pouzdanosti, pogreške mjerenja i osjetljivosti, uz razmatranje preliminarnih dokaza koji se

odnose na sadržajnu valjanost i diskriminativnu konstruktnu valjanost. Istodobno je istraživanje prošireno na neuromuskularne karakteristike donjih ekstremiteta. Mišićno-tetivna krutost u statičkim uvjetima procijenjena je na razini Ahilove tetive, lateralnog gastroknemijusa, patelarne tetive, ravnog bedrenog mišića i lateralnog širokog mišića dominantnog donjeg ekstremiteta, uz dodatnu provjeru test–retest pouzdanosti. Eksplozivna snaga donjih ekstremiteta analizirana je testovima ponavljanih vertikalnih skokova, dok su tijekom izvođenja maksimalnih pojedinačnih udaraca zabilježeni pokazatelji brzine i Intensity Scorea.

Statističkim analizama ispitane su promjene mehaničkog intenziteta uzastopnih udaraca i fizioloških odgovora tijekom različitih rundi RPAT-a, odnosi između tih varijabli te razlike između muškaraca i žena i između elitnih i neelitnih boksača. Za odnose između ISmean i HRmean te između ISmean i VO_2mean zasebno su razmatrane povezanosti opažene tijekom triju rundi, uz primjenu Holmove korekcije na dvije korelacije obuhvaćene svakom pojedinom rundom; kao konzervativnija analiza osjetljivosti, korekcija je dodatno primijenjena zajedničkim razmatranjem svih šest korelacija obuhvaćenih hipotezom H2. Uz nekorigirane korelacije izračunane su parcijalne Spearmanove korelacije uz kontrolu za spol i natjecateljsku razinu; robusnost povezanosti dodatno je provjerena analizama osjetljivosti s dodatnom prilagodbom, zasebno za dob ili trenažni staž. Naposljetku, eksploriran je odnos između individualnih srednjih vrijednosti ISmean i dvaju razmatranih fizioloških odgovora. Test–retest pouzdanost i pogreška mjerenja procijenjene su za RPAT i mjere krutosti; za RPAT je dodatno ispitana osjetljivost provjerom omogućuje li pogreška mjerenja razlikovanje dovoljno malih promjena da bi se smatrale relevantnima. Mogući odnosi između mišićno-tetivne krutosti, eksplozivne snage donjih ekstremiteta i mehaničkog intenziteta pojedinačnog udarca analizirani su eksplorativno, uz provjeru ostaju li opažene povezanosti prisutne nakon uzimanja u obzir spola i natjecateljske razine te uz kontrolu velikog broja provedenih usporedbi. Naposljetku su analizirane razlike između muškaraca i žena te između elitnih i neelitnih boksača u neuromuskularnim varijablama i pokazateljima mehaničkog intenziteta pojedinačnog udarca.

U ukupnom uzorku glavnog eksperimentalnog istraživanja ISmean pokazao je progresivno i značajno smanjenje tijekom RPAT-a, s izraženim smanjenjem od prve do druge runde i daljnjim smanjenjem od druge do treće runde. Nasuprot tome, vrijednosti HRmean i

VO_2mean su se značajno povećale od prve do druge runde, bez daljnjih značajnih promjena između druge i treće runde. Ovi su rezultati pokazali različita kretanja mehaničkog intenziteta uzastopnih udaraca i fizioloških odgovora tijekom protokola, uz progresivno smanjenje mehaničkog intenziteta uzastopnih udaraca, dok su fiziološki odgovori ostajali povišeni tijekom sljedećih rundi.

Odnosi između mehaničkog intenziteta uzastopnih udaraca i fizioloških odgovora pokazali su različite obrasce tijekom triju rundi i ovisno o prilagodbi za potencijalne zbunjujuće čimbenike. U nekorigiranim analizama ISmean bio je pozitivno povezan s VO_2mean u prvoj i trećoj rundi. U drugoj rundi povezanosti utvrđene prema inferencijalnoj obitelji definiranoj na razini pojedine runde nisu zadržale značajnost u konzervativnijoj analizi osjetljivosti, u kojoj je svih šest korelacija obuhvaćenih hipotezom H2 zajednički razmatrano pri Holmovoj korekciji. Nakon kontrole za spol i natjecateljsku razinu utvrđene su pozitivne povezanosti između ispitanika (engl. *between-subject*) između ISmean i VO_2mean u prvoj (parcijalni $\rho = 0{,}503$) i trećoj rundi (parcijalni $\rho = 0{,}541$) te negativne povezanosti između ISmean i HRmean u istim rundama (parcijalni $\rho = -0{,}486$ odnosno $-0{,}403$); te su povezanosti ostale statistički značajne i kada je svih šest parcijalnih korelacija zajednički razmatrano pri Holmovoj korekciji. Suprotno navedenom, u drugoj rundi, nijedna povezanost nije zadržala značajnost nakon korekcije. Dodatna prilagodba, zasebno za dob ili trenažni staž, nije bitno promijenila smjer ni veličinu povezanosti glavnog modela. Ove korelacije opisuju povezanosti između ispitanika unutar pojedinačnih rundi i ne omogućuju zaključivanje o odnosima između promjena fizioloških odgovora unutar ispitanika (engl. *within-subject*) i promjena ISmean kroz runde. Kada su, nasuprot tome, za svakog sudionika razmatrane srednje vrijednosti triju rundi, viša vrijednost VO_2mean bila je povezana s višim ISmean, dok analogan odnos između HRmean i ISmean nije utvrđen. U cjelini, ovi rezultati pokazuju da povezanosti između fizioloških odgovora i mehaničkog intenziteta uzastopnih udaraca nisu ujednačene između rundi i da djelomično ovise o prilagodbi za spol i natjecateljsku razinu. Povezanosti s VO_2mean bile su pozitivne u prvoj i trećoj rundi i nakon prilagodbe, dok su za HRmean negativne povezanosti identificirane tek nakon kontrole tih čimbenika. Stoga se ti obrasci trebaju interpretirati kao povezanosti između ispitanika specifične za pojedine runde, a ne kao dokaz povezanih fizioloških i izvedbenih promjena unutar ispitanika tijekom RPAT-a.

Analiza razlika povezanih sa spolom i natjecateljskom razinom tijekom RPAT-a pokazala je značajne razlike u ISmean i između muškaraca i žena i između elitnih i neelitnih boksača. Muškarci su pokazali više vrijednosti ISmean nego žene, pri čemu su razlike bile izraženije u početnim rundama, dok su elitni sportaši ukupno pokazali više vrijednosti od neelitnih sportaša. Za HRmean nisu utvrđene ukupne značajne razlike između muškaraca i žena ni između elitnih i neelitnih sportaša; međutim, kretanje srčane frekvencije tijekom različitih rundi razlikovalo se između dviju natjecateljskih razina. Za VO_2mean utvrđene su razlike povezane s natjecateljskom razinom, pri čemu su elitni sportaši pokazali više vrijednosti nego neelitni sportaši u drugoj i trećoj rundi. Ovi rezultati pokazuju da spol i natjecateljska razina predstavljaju relevantne elemente pri interpretaciji pojedinih varijabli zabilježenih tijekom protokola, uz potrebu za oprezom zbog veličine podskupina.

Metodološka karakterizacija RPAT-a u ukupnom uzorku pokazala je visoku test–retest pouzdanost za devet varijabli razmatranih u pojedinačnim rundama, s koeficijentima intraklasne korelacije u rasponu 0,909 do 0,980. Nisu utvrđene značajne sustavne razlike između testa i retesta. Usporedba pogreške mjerenja i najmanje relevantne promjene (*smallest worthwhile change*, SWC) pokazala je da je za ISmean u sve tri runde i za HRmean u prvoj rundi pogreška mjerenja bila dovoljno mala u odnosu na promjenu koja se smatrala relevantnom. Za HRmean u sljedećim rundama i za VO_2mean, nasuprot tome, pogreška mjerenja bila je veća nego SWC, što ukazuje na manju sposobnost razlikovanja promjena malog opsega. Zajedno s preliminarnim dokazima koji se odnose na sadržajnu valjanost i diskriminativnu konstruktnu valjanost, ovi rezultati pridonose progresivnoj metodološkoj karakterizaciji RPAT-a; međutim, dostupni dokazi ne omogućavaju da RPAT smatramo potpuno validiranim protokolom.

Test–retest pouzdanost mišićno-tetivne krutosti u statičkim uvjetima dominantnog donjeg ekstremiteta bila je visoka u pet razmatranih anatomskih regija, s koeficijentima intraklasne korelacije u rasponu 0,869 do 0,985 i vrijednostima postotne pogreške u rasponu 2,14% do 6,60%. Eksplorativna analiza odnosa između mišićno-tetivne krutosti, eksplozivne snage donjih ekstremiteta i mehaničkog intenziteta pojedinačnog udarca pokazala je složen obrazac. Od ukupno 222 moguća odnosa ispitana između varijabli koje pripadaju tim različitim područjima, 28 ih je ostalo statistički značajno nakon uzimanja u obzir velikog broja provedenih usporedbi. Kada su isti odnosi ponovno analizirani uzimajući u obzir i spol

i natjecateljsku razinu sudionika, pet ih je ostalo značajno nakon korekcije za višestruke usporedbe. Konkretno, utvrđene su selektivne povezanosti između maksimalne sile zabilježene u testovima skokova i brzine lijevog krošea te negativna povezanost između krutosti patelarne tetive i srednjeg Intensity Scorea desnog krošea. Povezanosti između krutosti i parametara testova skokova koje su prvotno bile utvrđene nisu ostale značajne kada su uzeti u obzir i spol i natjecateljska razina. U cjelini ovi rezultati ne podupiru opću povezanost između razmatranih neuromuskularnih karakteristika i mehaničkog intenziteta pojedinačnog udarca, nego ukazuju na prisutnost specifičnih povezanosti koje zahtijevaju dodatnu provjeru.

Eksplorativne analize spola i natjecateljske razine u neuromuskularnim karakteristikama donjih ekstremiteta i mehaničkom intenzitetu pojedinačnog udarca pokazale su ponajprije razlike između muškaraca i žena. Za mišićno-tetivnu krutost utvrđene su više vrijednosti kod muškaraca na razini lateralnog gastroknemijusa, ravnog bedrenog mišića i lateralnog širokog mišića. Razlike povezane sa spolom utvrđene su i za više parametara testova skokova te za pokazatelje mehaničkog intenziteta pojedinačnog udarca. Razlike između elitnih i neelitnih boksača bile su, nasuprot tome, ograničenije, a razlike između muškaraca i žena nisu pokazale značajne promjene između dviju natjecateljskih razina u 27 razmatranih ishoda. S obzirom na eksplorativnu prirodu tih analiza i veličinu podskupina, ove rezultate treba smatrati preliminarnima.

Progresija od sustavnog pregleda preko pilot-istraživanja do glavnog eksperimentalnog istraživanja omogućila je detaljnije istraživanje nekih od glavnih nedostataka utvrđenih u literaturi. Istraživanje je omogućilo zajedničku analizu mehaničkog intenziteta uzastopnih udaraca i fizioloških odgovora tijekom intervalnog opterećenja specifičnog za boks, proširenje metodološke karakterizacije RPAT-a te proširenje istraživanja na neuromuskularne karakteristike donjih ekstremiteta i mehanički intenzitet pojedinačnog udarca. Rezultati pokazuju da mehanički intenzitet uzastopnih udaraca i fiziološki odgovori imaju različita kretanja i odnose tijekom RPAT-a te da su povezanosti između neuromuskularnih karakteristika donjih ekstremiteta i mehaničkog intenziteta pojedinačnog udarca selektivne, a ne opće. Utvrđene razlike također su omogućile detaljnije razmatranje uloge spola i natjecateljske razine pri interpretaciji razmatranih varijabli. U cjelini, ovi dokazi pridonose širem i integriranijem razumijevanju sportske izvedbe u boksu te pružaju

osnovu za budući razvoj postupaka procjene i praćenja sportske izvedbe i za daljnja istraživanja usmjerena na individualizaciju programiranja treninga.

Ključne riječi: *boks; mehanički intenzitet udarca; Repeated Punch Ability Test; fiziološki odgovori; neuromuskularne karakteristike.*

1 Uvod

1.1 Model sportske izvedbe u boksu

Boks je borilački sport u kojem natjecateljski uspjeh ovisi o interakciji između tehničkih, taktičkih i kondicijskih komponenti, kao i o sposobnosti izvođenja učinkovitih ofenzivnih i defenzivnih akcija tijekom meča (Chaabène et al., 2015; Slimani et al., 2017). U tom kontekstu, sportska je izvedba usko povezana sa sposobnošću održavanja visokog ritma borbe te ponavljanog izvođenja brzih i snažnih udaraca tijekom cijelog trajanja meča (Chaabène et al., 2015; Finlay et al., 2023; Wilson et al., 2020). Nadalje, znanstvena istraživanja ukazuju na to uspjeh u boksu povezan s frekvencijom tehničkih akcija, frekvencijom korištenja ofenzivnih kombinacija te ofenzivnom i defenzivnom učinkovitošću, što su čimbenici koji doprinose ishodu meča i razlikuju boksače različite razine natjecateljske uspješnosti (Slimani et al., 2017).

Boks se uobičajeno opisuje kao intervalni sport visokog intenziteta, dodatno karakteriziran izmjenom eksplozivnih akcija i razdoblja nepotpunog oporavka ili smanjene aktivnosti (Franchini, 2020; Slimani et al., 2017; Thomson & Lamb, 2017b). Znanstvena istraživanja na simuliranim mečevima pokazuju da borba zahtijeva ponavljanje ofenzivnih i defenzivnih akcija visokog intenziteta, brza kretanja i visoku frekvenciju akcija tijekom cijelog trajanja meča, uz varijacije opterećenja između rundi (Finlay et al., 2018; Thomson & Lamb, 2017a, 2017b). Nadalje, recentna istraživanja pokazuju da su akcije visokog intenziteta u boksu uglavnom vrlo kratkog trajanja, često kraće od 10 s, te su također isprekidane kratkim i često nepotpunim oporavkom, koji je često kraći od 30 s (Xu et al., 2025a, 2025b). Dokazi prikupljeni tijekom sparinga, rada na fokuserima i vreći dodatno potvrđuju da boksač ne mora samo generirati vrlo intenzivne akcije, već i održavati ponavljane napore tijekom vremena uz održavanje odgovarajuće razine tehničke učinkovitosti (Ghosh, 2010; Usher et al., 2024; Venckunas et al., 2022).

S obzirom na isprekidanu prirodu boksačkog meča, najutjecajnije tehničke akcije, poput ofenzivnih razmjena, promjena ritma i sekvenci udaraca, ovise o sposobnosti izražavanja visokih razina sile i snage u vrlo kratkom vremenu, kao i o integriranom djelovanju različitih sposobnosti potrebnih za održavanje visokog intenziteta borbe i očuvanje visoke kvalitete

tehničke izvedbe tijekom cijelog meča (Chaabène et al., 2015; Finlay et al., 2023; Ruddock et al., 2021; Venckunas et al., 2022; Xu et al., 2025b; Yue et al., 2025). U tom kontekstu literatura o borilačkim sportovima naglašava da adekvatno razvijene aerobne i anaerobne sposobnosti imaju ključnu ulogu kako u održavanju akcija visokog intenziteta, tako i u oporavku između ponavljanih napora, čime doprinose održavanju sportske izvedbe tijekom meča (Ruddock et al., 2021; Yue et al., 2025).

U okviru ovog modela, tehničke akcije u boksu imaju izraženu eksplozivnu prirodu. Udarci se opisuju kao kratki, izrazito dinamični pokreti izvedeni velikom brzinom, čija učinkovitost ovisi o sposobnosti brzog razvoja sile i brzine izvedbe (Chaabène et al., 2015; Söyler et al., 2025; Turner et al., 2011). U toj perspektivi, sposobnost izvođenja brzih i snažnih udaraca predstavlja važan čimbenik sportske izvedbe, jer utječe na kvalitetu ofenzivne akcije te posljedično na mogućnost izvođenja učinkovitih udaraca u ključnim trenucima borbe (Loturco et al., 2016).

U skladu s ovim modelom, udarna sila u literaturi se ističe kao jedna od varijabli najuže povezanih s razinom sportaša i ukupnom sportskom izvedbom te se smatra ključnim pokazateljem uspješnosti u boksu (Lenetsky et al., 2013; Loturco et al., 2016; Pinto et al., 2025). Brojna istraživanja pokazuju da boksači s višim razinama mišićne sile i snage proizvode veće udarne sile, što sugerira da učinkovitost udarca ne ovisi isključivo o tehničkoj izvedbi, već i o sposobnosti generiranja visokih razina sile i snage tijekom izvođenja udarca (Beattie & Ruddock, 2022; Dunn et al., 2022a).

Iako se boks često smatra sportom u kojem dominiraju gornji ekstremiteti, znanstveni dokazi ukazuju na to da ga je potrebno promatrati kao multisegmentalni sport koji uključuje cijelo tijelo (Stanley et al., 2018; Stewart et al., 2025). Konkretno, učinkovitost udarca ne ovisi isključivo o gornjim ekstremitetima, već je rezultat koordiniranog prijenosa energije kroz različite segmente tijela (Kacprzak et al., 2025; Lenetsky et al., 2015). Ovaj proces uključuje proksimalno-distalnu sekvencu segmenata tijela, kroz koju se sila prenosi s proksimalnih na distalnije segmente, doprinoseći učinkovitosti udarca (Stanley et al., 2018; Tajibaev et al., 2026). U tom kontekstu donji ekstremiteti imaju važnu ulogu u generiranju sile udarca, budući da sposobnost generiranja sile od tla doprinosi prijenosu energije kroz kinetički lanac i povezana je s udarnom silom (Loturco et al., 2016). Nadalje, pokazano je da zamor donjih

ekstremiteta i trupa dovodi do značajnog smanjenja sile udarca, naglašavajući ključni doprinos ovih segmenata u izvođenju udarca (Dunn et al., 2022b; Satkunskiene et al., 2024). Također, snaga ekstenzora koljena i sposobnost generiranja reakcijskih sila tla povezane su s produkcijom sile udarca, potvrđujući važnost donjih ekstremiteta u određivanju učinkovitosti ofenzivne akcije (Satkunskiene et al., 2024; Zhou et al., 2023).

U cjelini se model sportske izvedbe u boksu može opisati kao integracija isprekidanih akcija visokog intenziteta, obilježenih eksplozivnim pokretima i usmjerenih na generiranje učinkovitih udaraca. U tom kontekstu sposobnost održavanja visokog ritma borbe, očuvanja kvalitete tehničke izvedbe te izvođenja brzih i snažnih udaraca predstavlja središnji aspekt sportske izvedbe u boksu. Ovi elementi čine temelj za daljnju analizu mehaničkog intenziteta udarca, fizioloških odgovora i neuromuskularnih karakteristika donjih ekstremiteta povezanih sa specifičnom izvedbom u boksu.

1.2 Mehanički intenzitet udarca i sportska izvedba

U boksu su ofenzivne akcije usko povezane sa sposobnošću izvođenja učinkovitih udaraca, zbog čega je literatura postupno pridavala sve veću važnost proučavanju mehaničkog intenziteta udarca (Lenetsky et al., 2013; Loturco et al., 2016). U tom kontekstu varijable poput udarne sile, brzine i snage udarca, kao i pokazatelja dobivenih iz mjernih uređaja korištene su za objektivno opisivanje mehaničkog intenziteta udarca i njegove relevantnosti za specifičnu sportsku izvedbu (Dunn et al., 2022a; Lenetsky et al., 2013; Loturco et al., 2016; Pinto et al., 2025). Iz ove perspektive, mehanički intenzitet udarca može se smatrati mjerljivim izrazom učinkovitosti tehničkog pokreta, jer odražava sposobnost boksača da proizvede potencijalno učinkovitije udarce u pogledu izvedbe (Dunn et al., 2022a; Lenetsky et al., 2013).

Međutim, literatura pokazuje da se mehanički intenzitet udarca ne može tumačiti kao jednoznačno određena varijabla. Dostupne studije koriste različite pokazatelje za opisivanje mehaničkog intenziteta udarca, uključujući udarnu silu, brzinu i snagu udarca, kao i kompozitne pokazatelje dobivene iz sustava za prikupljanje podataka (Dunn et al., 2022a; Lenetsky et al., 2013; Pinto et al., 2025). Nadalje, opis mehaničkog intenziteta udarca ovisi

i o prirodi zadatka, koja uključuje tip udarca, način izvođenja i uvjete testiranja, kao i o korištenom mjernom instrumentu (Dunn et al., 2022a; Lenetsky et al., 2013). Ova metodološka heterogenost upućuje na to da se mehanički intenzitet udarca treba tumačiti kao relevantan pokazatelj izvedbe u boksu, sposoban sintetizirati učinkovitost ofenzivne akcije (Loturco et al., 2016; Pinto et al., 2025).

Nadalje, s obzirom na intervalnu prirodu boksa, prvi ključni aspekt odnosi se na sposobnost održavanja visokih razina mehaničkog intenziteta udaraca tijekom intervalnih akcija visokog intenziteta. Studije na simuliranim mečevima i specifičnim protokolima pokazuju da je tijekom borbe boksač suočen s ponavljanjem sekvenci udaraca i eksplozivnih akcija, uz kratke i često nepotpune oporavke, u uvjetima u kojima zamor progresivno smanjuje kvalitetu i intenzitet izvedbe (Finlay et al., 2018; Thomson & Lamb, 2017a, 2017b; Xu et al., 2025b). U toj perspektivi opisivanje mehaničkog intenziteta udarca tijekom intervalnih akcija posebno je relevantno, jer omogućuje procjenu ne samo učinkovitosti udaraca, već i sposobnosti održavanja intenziteta udaraca tijekom ponavljanih napora (Dunn et al., 2022b; Finlay et al., 2018).

Drugi aspekt odnosi se na sposobnost izražavanja maksimalnog mehaničkog intenziteta udarca tijekom izvođenja pojedinačnih udaraca maksimalnim intenzitetom. Brojna istraživanja koja koriste pojedinačne udarce na vreći ili na instrumentiranim uređajima pokazuju da mjerenje maksimalnog intenziteta udarca predstavlja relevantan pokazatelj izvedbe u boksu (Beattie & Ruddock, 2022; Dunn et al., 2022a; Lenetsky et al., 2018; Loturco et al., 2016). U tom kontekstu procjena pojedinačnog udarca također je važna kao varijabla koja se može povezati s drugim aspektima izvedbe, posebno s neuromuskularnim karakteristikama donjih ekstremiteta koje doprinose generiranju udarne sile (Dunn et al., 2022a; Loturco et al., 2016).

Recentna literatura također je uvela uporabu prijenosnih uređaja i nosivih senzora za praćenje izvedbe udarca u primijenjenijim uvjetima, pružajući mogućnost provođenja procjena u ekološki validnijim uvjetima u odnosu na laboratorijske sustave (Omcirk et al., 2023).

Dodatni relevantan element odnosi se na varijabilnost mehaničkog intenziteta udarca u odnosu na natjecateljsku razinu i spol. Literatura pokazuje da sposobnost proizvodnje i

održavanja visokih razina mehaničkog intenziteta udarca može razlikovati sportaše različitih razina te da spolne razlike predstavljaju dodatnu varijablu koju treba uzeti u obzir pri interpretaciji mehaničkog intenziteta udarca i mogućih varijabli povezanih s njime (Loturco et al., 2016; Wilson et al., 2020; Pinto et al., 2025).

U cjelini znanstvena istraživanja ukazuju na to da mehanički intenzitet udarca predstavlja ključni pokazatelj izvedbe u boksu. U tom smislu, integrirana interpretacija mehaničkog intenziteta udarca, u njegovim različitim oblicima, posebno je relevantna za razumijevanje izvedbe u boksu kao i za usmjeravanje analize odnosa s fiziološkim odgovorima i neuromuskularnim karakteristikama donjih ekstremiteta koje će biti detaljnije razmotrene u sljedećim poglavljima.

1.3 Fiziološki odgovori i mehanički intenzitet udarca

Isprekidana priroda boksačke borbe određuje visoke fiziološke zahtjeve, koji se očituju kroz značajne akutne odgovore tijekom izvođenja ofenzivnih i defenzivnih akcija (Franchini, 2020; Slimani et al., 2017). U tom kontekstu sposobnost održavanja visokog ritma tijekom vremena predstavlja ključni čimbenik sportske izvedbe (Franchini, 2020; Slimani et al., 2017). U skladu s tim, analiza fizioloških odgovora ima središnju ulogu u razumijevanju mehanizama koji su u osnovi izvedbe u boksu (Ghosh, 2010; Venckunas et al., 2022).

Brojna istraživanja pokazala su da je boks karakteriziran visokim vrijednostima srčane frekvencije tijekom borbe i simulacija meča (El-Ashker et al., 2012; Ghosh, 2010). Konkretno, srčana frekvencija može doseći vrijednosti bliske maksimalnima i ostati povišena tijekom većeg dijela meča, što odražava visoki intenzitet potrebnog napora (El-Ashker et al., 2012; El-Ashker et al., 2018; Ghosh, 2010). Slično tome, potrošnja kisika (VO_2) značajno je povišena tijekom specifičnih boksačkih opterećenja, što ukazuje na izražen angažman fizioloških mehanizama odgovornih za održavanje aktivnosti tijekom intervalnih napora (Arseneau et al., 2011; de Lira et al., 2013; Venckunas et al., 2022). Ovi nalazi sugeriraju da boks nameće visoko fiziološko opterećenje koje se mora održavati tijekom cijelog trajanja meča.

Razina fizioloških odgovora u boksu usko je povezana s intenzitetom izvedenih akcija. Studije na simuliranim mečevima, specifičnim vježbama i trenažnim sesijama pokazale su da promjene u intenzitetu opterećenja uzrokuju proporcionalne promjene srčane frekvencije i potrošnje kisika (Finlay et al., 2018; Thomson & Lamb, 2017b; Usher et al., 2024). U tom smislu povećanje intenziteta ofenzivnih i defenzivnih akcija, uključujući sekvence udaraca, povezano je s povećanjem fiziološkog opterećenja, što ukazuje na usku povezanost između intenziteta akcije i fiziološkog odgovora (Finlay et al., 2018; Thomson & Lamb, 2017b; Usher et al., 2024). Ovaj je odnos posebno relevantan u boksu, gdje se akcije visokog intenziteta izmjenjuju na isprekidan način tijekom cijelog trajanja meča (Franchini, 2020; Venckunas et al., 2022).

U toj perspektivi sposobnost održavanja visokih razina srčane frekvencije i potrošnje kisika tijekom vremena predstavlja ključni čimbenik sportske izvedbe (Ruddock et al., 2021; Venckunas et al., 2022). Literatura sugerira da su boksači s većom tolerancijom na fiziološko opterećenje sposobni dulje održavati učinkovitost tehničkih akcija i kvalitetu izvedbe tijekom borbe (Ruddock et al., 2021; Venckunas et al., 2022). Isto tako, boksači s većom sposobnošću održavanja napora i odgađanja pojave zamora mogli bi biti sposobni ograničiti smanjenje mehaničkog intenziteta udarca tijekom ponavljanih akcija visokog intenziteta.

U tom smislu pokazano je da nakupljanje zamora tijekom specifičnih intervalnih opterećenja ili simuliranih mečeva dovodi do smanjenja sposobnosti izvođenja učinkovitih akcija i održavanja visokih razina izlaznih vrijednosti udarca (Finlay et al., 2018; Finlay et al., 2023). Međutim, ovi su nalazi uglavnom analizirani u odnosu na ukupnu izvedbu, bez specifične analize mehaničkog intenziteta udarca. U skladu s tim razumno je pretpostaviti da zamor može utjecati i na sposobnost održavanja visokog intenziteta udaraca tijekom meča.

Dodatni relevantan element odnosi se na varijabilnost fizioloških odgovora u odnosu na natjecateljsku razinu i spol. Literatura pokazuje da odgovori srčane frekvencije i potrošnje kisika tijekom intervalnih napora visokog intenziteta mogu razlikovati sportaše različitih razina te da spolne razlike predstavljaju dodatni čimbenik koji treba uzeti u obzir pri interpretaciji fizioloških odgovora i njihove moguće povezanosti s mehaničkim intenzitetom udarca (Ruddock et al., 2021; Slimani et al., 2017; Venckunas et al., 2022; Wilson et al., 2020).

U cjelini literatura ukazuje na to da fiziološki odgovori u boksu, osobito srčana frekvencija i potrošnja kisika, predstavljaju relevantne pokazatelje opterećenja koje aktivnost nameće te sposobnosti sportaša da tijekom vremena održava intervalne napore visokog intenziteta (Ghosh, 2010; Venckunas et al., 2022). Posljedično, zajednička analiza mehaničkog intenziteta udarca i fizioloških odgovora posebno je važna za pružanje cjelovitijeg uvida i dublje razumijevanje izvedbe u boksu.

1.4 Neuromuskularne karakteristike donjih ekstremiteta i mehanički intenzitet udarca

U boksu sposobnost izražavanja visokih razina sile i snage u kratkom vremenu predstavlja važan čimbenik u izvođenju učinkovitih udaraca (Loturco et al., 2016; Turner et al., 2011). Posljedično, neuromuskularne karakteristike donjih ekstremiteta imaju važnu ulogu u određivanju mehaničkog intenziteta udarca.

Iako se boks često povezuje s korištenjem gornjih ekstremiteta, znanstveni dokazi ukazuju na to da učinkovitost udarca uključuje mišićni sustav u cjelini, uz značajan doprinos donjih ekstremiteta (Lenetsky et al., 2015; Stanley et al., 2018). Konkretno, sposobnost generiranja sile od tla doprinosi prijenosu energije s donjih na gornje ekstremitete i povezana je s udarnom silom, naglašavajući doprinos donjih ekstremiteta u izvođenju udarca (Dunn et al., 2022b; Loturco et al., 2016; Satkunskiene et al., 2024; Zhou et al., 2023).

Među neuromuskularnim karakteristikama donjih ekstremiteta, eksplozivna snaga predstavlja jedan od najviše istraživanih aspekata u odnosu na sportsku izvedbu. Sposobnost razvoja sile u kratkom vremenu ključna je za izvođenje brzih akcija visokog intenziteta, poput onih koje se zahtijevaju u boksu (Loturco et al., 2016; Pereira et al., 2023). Nadalje, dostupni dokazi naglašavaju povezanost između eksplozivnih sposobnosti i izvedbe u boksu (Dunn et al., 2022a; Loturco et al., 2016).

Paralelno s eksplozivnom snagom donjih ekstremiteta, sve veći interes usmjeren je na mišićno-tetivnu krutost donjih ekstremiteta. Literatura razlikuje krutost procijenjenu u statičkim ili pasivnim uvjetima od dinamičke ili funkcionalne krutosti izražene tijekom

aktivnosti temeljenih na ciklusu istezanja-skraćivanja (SSC) (Pruyn et al., 2014). Međutim, nekoliko istraživanja sugerira da krutost procijenjena u statičkim ili pasivnim uvjetima može biti povezana sa sposobnošću brze proizvodnje sile (Ando & Suzuki, 2019) i izvedbom skokova (Gervasi et al., 2022; Pruyn et al., 2014; Wdowski et al., 2023). Paralelno s tim, mjere dinamičke ili funkcionalne krutosti povezane su s izvedbom u aktivnostima temeljenima na ciklusu istezanja-skraćivanja (SSC) i eksplozivnom snagom donjih ekstremiteta (Brazier et al., 2019; Pruyn et al., 2014; Secomb et al., 2015). Međutim, dokazi o ulozi krutosti u boksu još su uvijek ograničeni i pretežno neizravni, pri čemu je jedno istraživanje analiziralo dinamičku krutost donjih ekstremiteta tijekom countermovement jumpa, sugerirajući mogući doprinos mišićno-tetivne krutosti donjih ekstremiteta specifičnoj izvedbi u boksu (Chottidao et al., 2022). Iz te perspektive od posebnog je interesa detaljnije istražiti ulogu mišićno-tetivne krutosti donjih ekstremiteta i njezine moguće odnose s eksplozivnom snagom donjih ekstremiteta i mehaničkim intenzitetom udarca.

Dodatni relevantan element odnosi se na varijabilnost neuromuskularnih karakteristika donjih ekstremiteta u odnosu na natjecateljsku razinu i spol. Literatura pokazuje da varijable poput mišićno-tetivne krutosti i eksplozivne snage donjih ekstremiteta mogu pokazivati razlike kako između sportaša različitih natjecateljskih razina tako i između sportaša muškog i ženskog spola te da te razlike predstavljaju aspekt koji treba uzeti u obzir pri interpretaciji neuromuskularnih karakteristika donjih ekstremiteta i njihove moguće povezanosti s mehaničkim intenzitetom udarca (Loturco et al., 2016; Pereira et al., 2023; Pruyn et al., 2015; Wang et al., 2017).

U cjelini dostupni dokazi sugeriraju da neuromuskularne karakteristike donjih ekstremiteta, osobito mišićno-tetivna krutost i eksplozivna snaga, mogu doprinijeti specifičnoj izvedbi u boksu. U skladu s tim, analiza odnosa između neuromuskularnih karakteristika donjih ekstremiteta i mehaničkog intenziteta udarca posebno je relevantna za dublje razumijevanje doprinosa tih karakteristika mehaničkom intenzitetu udarca.

1.5 Prethodne znanstvene spoznaje

Dostupna znanstvena istraživanja o boksu uglavnom su analizirala sportsku izvedbu putem pokazatelja mehaničkog intenziteta udarca i fizioloških odgovora tijekom specifičnih protokola. Konkretno, brojna istraživanja analizirala su varijable poput udarne sile, brzine i snage udarca, kao i pokazatelje dobivene različitim mjernim instrumentima, s ciljem objektivnog opisivanja mehaničkog intenziteta udarca i njegove relevantnosti za specifičnu sportsku izvedbu (Dunn et al., 2022a; Lenetsky et al., 2013; Loturco et al., 2016; Pinto et al., 2025). Paralelno s tim, varijable poput srčane frekvencije i potrošnje kisika opsežno su istraživane, pri čemu je utvrđen izražen angažman fizioloških mehanizama odgovornih za održavanje aktivnosti tijekom intervalnih napora visokog intenziteta (Arseneau et al., 2011; Chaabène et al., 2015; de Lira et al., 2013; Finlay et al., 2018; Ghosh, 2010; Usher & Babraj, 2024; Venckunas et al., 2022).

Unatoč relevantnosti tih spoznaja, dostupnu literaturu još uvijek obilježava izražena metodološka heterogenost u pogledu razmatranih varijabli, primijenjenih protokola i korištenih mjernih instrumenata. Nadalje, pokazatelji mehaničkog intenziteta udarca i fiziološki odgovori uglavnom su analizirani kao neovisne varijable, čime je ograničena mogućnost razvoja cjelovitijeg i integriranijeg razumijevanja glavnih komponenti povezanih s izvedbom u boksu i njihovih mogućih međusobnih odnosa.

Posljednjih godina sve se veća pozornost posvećuje i mogućem doprinosu neuromuskularnih karakteristika donjih ekstremiteta izvedbi u boksu. Iako se boks često povezuje s korištenjem gornjih ekstremiteta, različiti dokazi upućuju na to da učinkovitost udarca ovisi i o uključenosti donjih ekstremiteta (Lenetsky et al., 2015; Loturco et al., 2016; Stanley et al., 2018). Konkretno, u nekim su istraživanjima parametri eksplozivne snage donjih ekstremiteta, kao što su visina skoka, sila, snaga, procijenjeni rate of force development (RFD) i sila reakcije podloge (GRF), bili povezani s pokazateljima mehaničkog intenziteta udarca (Chottidao et al., 2022; Dunn et al., 2022a; Finlay et al., 2024; Loturco et al., 2016; Loturco et al., 2021). Paralelno s tim, sve se veći interes pridaje mišićno-tetivnoj krutosti donjih ekstremiteta. Iako literatura razlikuje krutost procijenjenu u statičkim ili pasivnim uvjetima od dinamičke ili funkcionalne krutosti izražene tijekom aktivnosti temeljenih na ciklusu istezanja-skraćivanja (SSC) (Pruyn et al., 2014), nekoliko je istraživanja povezalo

krutost procijenjenu u statičkim ili pasivnim uvjetima sa sposobnošću brze proizvodnje sile (Ando & Suzuki, 2019) i izvedbom skokova (Gervasi et al., 2022; Pruyn et al., 2014; Wdowski et al., 2023). Paralelno s tim, mjere dinamičke ili funkcionalne krutosti povezane su s izvedbom skokova, sprinta, promjena smjera i eksplozivnom snagom donjih ekstremiteta (Brazier et al., 2019; Pruyn et al., 2014; Secomb et al., 2015). Međutim, prema trenutačno dostupnim spoznajama, mišićno-tetivna krutost donjih ekstremiteta još je uvijek nedovoljno istražena u boksu te, prema saznanjima autora, nijedno prethodno istraživanje nije izravno analiziralo odnose između mišićno-tetivne krutosti, eksplozivne snage donjih ekstremiteta i mehaničkog intenziteta udarca.

U cjelini dostupni dokazi upućuju na potrebu nadilaženja pristupa temeljenih na izoliranoj analizi pojedinačnih varijabli izvedbe u boksu, potičući razvoj integriranih metodoloških modela koji mogu istodobno obuhvatiti pokazatelje mehaničkog intenziteta udarca, fiziološke odgovore i neuromuskularne karakteristike donjih ekstremiteta. U toj perspektivi izvedba u boksu mogla bi se tumačiti kao rezultat interakcije između sposobnosti izražavanja visokih razina mehaničkog outputa udarca, sposobnosti podnošenja fiziološkog opterećenja nametnutog aktivnošću i neuromuskularnih karakteristika donjih ekstremiteta uključenih u proizvodnju i održavanje specifične izvedbe u boksu.

2 Problem i obrazloženje istraživanja

Boks je borilački sport karakteriziran intervalnim akcijama visokog intenziteta, u kojem sportska izvedba ovisi o sposobnosti izvođenja i održavanja učinkovitih ofenzivnih i defenzivnih akcija tijekom vremena (Franchini, 2020; Slimani et al., 2017). U tom kontekstu, sposobnost izvođenja brzih i snažnih udaraca te održavanja njihova intenziteta tijekom cijelog trajanja meča predstavlja jedan od središnjih elemenata izvedbe u boksu (Chaabène et al., 2015; Loturco et al., 2016).

Posljednjih godina sve se veća pozornost posvećuje proučavanju mehaničkog intenziteta udarca, shvaćenog kao objektivan izraz učinkovitosti tehničkog pokreta, putem varijabli kao što su udarna sila, brzina udarca i kompozitni pokazatelji dobiveni iz mjernih uređaja (Dunn et al., 2022a; Lenetsky et al., 2013; Loturco et al., 2016; Pinto et al., 2025). Dostupni dokazi sugeriraju da su te varijable povezane s razinom sportaša i ukupnom sportskom izvedbom te predstavljaju relevantne pokazatelje izvedbe u boksu (Loturco et al., 2016; Pinto et al., 2025). Međutim, postojeću literaturu obilježava izražena metodološka heterogenost, kako u pogledu korištenih instrumenata tako i u pogledu prirode analiziranih protokola, što otežava integrirano razumijevanje mehaničkog intenziteta udarca i mogućih varijabli povezanih s njime.

Prvi kritični aspekt odnosi se na ograničenu dostupnost istraživanja koja analiziraju mehanički intenzitet udarca u intervalnim uvjetima visokog intenziteta, koji predstavljaju najspecifičniji kontekst izvedbe u boksu. Iako su neka istraživanja opisala ponašanje izvedbe tijekom simuliranih mečeva ili specifičnih vježbi, analiza mehaničkog intenziteta udarca tijekom ponavljanih sekvenci akcija visokog intenziteta još je uvijek ograničena (Finlay et al., 2018; Thomson & Lamb, 2017a, 2017b). Konkretno, promjene mehaničkog intenziteta udarca tijekom vremena još su uvijek nedovoljno istražene, iako predstavljaju važan aspekt sposobnosti održavanja visokih razina izvedbe i ofenzivne učinkovitosti tijekom cijelog trajanja meča.

Paralelno s tim, literatura je pokazala da boks nameće visoko fiziološko opterećenje, karakterizirano visokim vrijednostima srčane frekvencije i potrošnje kisika tijekom borbe i simulacija meča (Ghosh, 2010; Venckunas et al., 2022). Također je pokazano da su fiziološki odgovori usko povezani s intenzitetom izvedenih akcija, što sugerira odnos između fiziološkog opterećenja i specifične sportske izvedbe (Finlay et al., 2018; Thomson & Lamb, 2017b). Unatoč tim dokazima, integracija analize fizioloških odgovora i mehaničkog intenziteta udarca tijekom specifičnih intervalnih opterećenja još je uvijek ograničena. U tom smislu još uvijek nije u potpunosti jasno u kojoj su mjeri fiziološki odgovori povezani s outputom udarca tijekom ponavljanih akcija visokog intenziteta.

Dodatno ograničenje literature odnosi se na nedovoljnu integraciju analize mehaničkog intenziteta udarca i neuromuskularnih karakteristika donjih ekstremiteta. Iako je nekoliko

istraživanja istaknulo ulogu mišićne sile i snage donjih ekstremiteta u generiranju udarne sile (Dunn et al., 2022a; Loturco et al., 2016), odnosi između mehaničkog intenziteta udarca i neuromuskularnih karakteristika donjih ekstremiteta još su uvijek nedovoljno istraženi. Konkretno, dok eksplozivna snaga donjih ekstremiteta predstavlja jedan od najviše istraživanih aspekata povezanih s izvedbom u boksu, uloga mišićno-tetivne krutosti donjih ekstremiteta u boksu još je uvijek nedovoljno istražena, uz ograničene i pretežno neizravne dokaze (Chottidao et al., 2022; Wdowski et al., 2023). S obzirom na moguću ulogu mišićno-tetivne krutosti donjih ekstremiteta u izvedbi dinamičkih i eksplozivnih akcija, relevantno je detaljnije istražiti njezin mogući doprinos izvedbi u boksu.

Nadalje, još uvijek nedovoljno istražen aspekt odnosi se na varijabilnost izvedbe u odnosu na natjecateljsku razinu i spol. Literatura sugerira da sposobnost proizvodnje i održavanja visokih razina mehaničkog intenziteta udarca može razlikovati sportaše različitih natjecateljskih razina i spola (Loturco et al., 2016; Pinto et al., 2025; Wilson et al., 2020). Paralelno s tim, fiziološki odgovori, poput srčane frekvencije i potrošnje kisika, također mogu razlikovati sportaše različitih natjecateljskih razina i spola (Ruddock et al., 2021; Slimani et al., 2017; Venckunas et al., 2022; Wilson et al., 2020). Literatura također pokazuje da se varijable poput mišićno-tetivne krutosti i eksplozivne snage donjih ekstremiteta mogu razlikovati kako između sportaša različitih natjecateljskih razina tako i između sportaša muškog i ženskog spola, što je relevantno za interpretaciju neuromuskularnih karakteristika donjih ekstremiteta i njihove moguće povezanosti s mehaničkim intenzitetom udarca (Loturco et al., 2016; Pereira et al., 2023; Pruyn et al., 2015; Wang et al., 2017). Međutim, istraživanja koja integriraju te varijable u jedinstveni eksperimentalni dizajn nisu dostupna, osobito u kontekstu specifičnog intervalnog opterećenja u boksu i zajedničke analize mehaničkih, fizioloških i neuromuskularnih varijabli.

U svjetlu ovih razmatranja javlja se potreba za integriranim istraživanjem uloge mehaničkog intenziteta udarca u odnosu na fiziološke odgovore i neuromuskularne karakteristike donjih ekstremiteta. Posebno je važno uzeti u obzir razlike povezane s natjecateljskom razinom i spolom, također s obzirom na činjenicu da je većina dostupnih istraživanja provedena na uzorcima koji su se pretežno sastojali od boksača muškog spola, uz ograničenu zastupljenost sportašica ili mješovitih uzoraka. Integrirani pristup koji uzima u obzir navedene varijable stoga je potreban kako bi se popunile postojeće praznine u literaturi i unaprijedilo

razumijevanje mehaničkih, fizioloških i neuromuskularnih komponenti povezanih s izvedbom u boksu.

3 Ciljevi i hipoteze istraživanja

3.1 Ciljevi istraživanja

Cilj ovog istraživanja bio je analizirati mehaničke, fiziološke i neuromuskularne komponente povezane sa sportskom izvedbom u boksu. Konkretno, istraživanje je imalo za cilj analizirati, kod elitnih i neelitnih boksača muškog i ženskog spola, mehanički intenzitet uzastopnih udaraca, srednju srčanu frekvenciju (HRmean) i srednju potrošnju kisika (VO_2mean) zabilježene tijekom svake runde, kao i njihove promjene između rundi, tijekom specifičnog intervalnog protokola za boks (engl. Repeated Punch Ability Test, RPAT), koji je nedavno razvijen i trenutačno je u fazi progresivne metodološke karakterizacije te je osmišljen za ekološki valjanu reprodukciju mehaničkih i fizioloških zahtjeva tipičnih za sportsku izvedbu u boksu u standardiziranim, kontroliranim i relevantnim uvjetima. Nadalje, analizirani su odnosi između mehaničkog intenziteta uzastopnih udaraca i fizioloških odgovora zabilježenih tijekom rundi istog protokola. Konačno, analizirane su razlike između

spolova unutar svake natjecateljske razine te između elitnih i neelitnih boksača unutar svakog spola u odnosu na mehanički intenzitet uzastopnih udaraca i fiziološke odgovore tijekom RPAT-a.

Dodatni cilj istraživanja bio je procijeniti, kod elitnih i neelitnih boksača muškog i ženskog spola mišićno-tetivnu krutost u statičkim uvjetima specifičnih anatomskih regija dominantnog donjeg ekstremiteta, glavne parametre eksplozivne snage donjih ekstremiteta i mehanički intenzitet pojedinačnog udarca, s ciljem analize odnosa između neuromuskularnih karakteristika donjih ekstremiteta i mehaničkog intenziteta pojedinačnog udarca. Nadalje, analizirane su razlike između spolova unutar svake natjecateljske razine te između elitnih i neelitnih boksača unutar svakog spola u neuromuskularnim karakteristikama donjih ekstremiteta i mehaničkom intenzitetu pojedinačnog udarca.

3.2 Hipoteze istraživanja

Na temelju ciljeva istraživanja i primijenjenog metodološkog dizajna, ovim se istraživanjem namjerava provjeriti skup hipoteza formuliranih u skladu s razmatranim varijablama i predviđenim statističkim postupcima.

H1: Pretpostavlja se postojanje statistički značajnih razlika u srednjem Intensity Scoreu uzastopnih udaraca, srednjoj srčanoj frekvenciji (HRmean) i srednjoj potrošnji kisika (VO_2mean) između rundi RPAT protokola.

H2: Pretpostavlja se postojanje statistički značajnih odnosa između srednjeg Intensity Scorea uzastopnih udaraca i fizioloških varijabli (HRmean i VO_2mean) tijekom RPAT protokola.

H3: Eksplorativno će se ispitati moguće razlike između elitnih i neelitnih boksača te između boksača muškog i ženskog spola u srednjem Intensity Scoreu uzastopnih udaraca, srednjoj srčanoj frekvenciji (HRmean) i srednjoj potrošnji kisika (VO_2mean) tijekom RPAT protokola.

H4: Eksplorativno će se ispitati mogući odnosi između mišićno-tetivne krutosti u statičkim uvjetima specifičnih anatomskih regija dominantnog donjeg ekstremiteta, glavnih parametara eksplozivne snage donjih ekstremiteta i pokazatelja mehaničkog intenziteta

pojedinačnog udarca (srednje i maksimalne vršne brzine te srednjeg i maksimalnog Intensity Scorea) kod elitnih i neelitnih boksača muškog i ženskog spola.

H5: Eksplorativno će se ispitati moguće razlike između elitnih i neelitnih boksača te između boksača muškog i ženskog spola u mišićno-tetivnoj krutosti u statičkim uvjetima specifičnih anatomskih regija dominantnog donjeg ekstremiteta, glavnim parametrima eksplozivne snage donjih ekstremiteta i pokazateljima mehaničkog intenziteta pojedinačnog udarca (srednjoj i maksimalnoj vršnoj brzini te srednjem i maksimalnom Intensity Scoreu).

4 Metode

4.1 Opći dizajn i faze istraživanja

Istraživački projekt bio je strukturiran u tri uzastopne faze.

Prva faza sastojala se od sustavnog pregleda literature, provedenog u skladu sa smjernicama PRISMA 2020 (Page et al., 2021) i strukturiranog prema modelu PICOS, s ciljem identificiranja i analize dostupnih znanstvenih dokaza povezanih s pokazateljima mehaničkog intenziteta udarca, fiziološkim odgovorima i neuromuskularnim karakteristikama donjih ekstremiteta u odnosu na sportsku izvedbu u boksu. Pregled literature također je imao za cilj istaknuti glavne metodološke nedostatke, s posebnim naglaskom na karakteristike uzorka, razmatrane varijable, primijenjene protokole i korištene mjerne instrumente. Rezultati ove prve faze doprinijeli su identifikaciji glavnih istraživačkih praznina, podržavajući metodološko planiranje sljedećih faza istraživanja, usmjerenih na integriranu analizu mehaničkih, fizioloških i neuromuskularnih komponenti povezanih sa sportskom izvedbom u boksu.

Druga faza istraživanja uključivala je pilot-istraživanje provedeno na 20 boksača, 10 elitnih i 10 neelitnih, ravnomjerno raspoređenih prema spolu (10 muškaraca i 10 žena). Svaka podskupina, (elitne žene, elitni muškarci, neelitne žene i neelitni muškarci), uključivala je po 5 sudionika. Pilot-istraživanje bilo je usmjereno na istraživanje mehaničkih i fizioloških odgovora tijekom Repeated Punch Ability Testa (RPAT). Dvadeset sudionika pilot-

istraživanja naknadno je uključeno u ukupni uzorak glavnog eksperimentalnog istraživanja. U okviru pilot-istraživanja RPAT je također ponovljen u jednakim standardiziranim eksperimentalnim uvjetima. Ponavljanje protokola omogućilo je preliminarnu metodološku karakterizaciju, uključujući procjenu test–retest pouzdanosti, pogreške mjerenja i osjetljivosti. Konkretno, ova faza bila je usmjerena na preliminarnu analizu mehaničkog intenziteta uzastopnih udaraca i fizioloških odgovora tijekom izvođenja RPAT protokola, kao i na procjenu mogućih razlika povezanih sa spolom i natjecateljskom razinom. Pilot-istraživanje također je omogućilo detaljniju procjenu primjenjivosti RPAT protokola u okviru integrirane procjene mehaničkih i fizioloških zahtjeva sportske izvedbe u boksu, pridonoseći definiranju sljedeće eksperimentalne faze istraživanja.

Treća faza istraživanja uključivala je glavno eksperimentalno istraživanje, u kojem je 20 novih sudionika pridruženo 20 sudionika koji su već sudjelovali u pilot-istraživanju, čime je ukupni uzorak povećan na 40 boksača. Uzorak je uključivao 20 elitnih i 20 neelitnih boksača te je bio ravnomjerno raspoređen prema spolu (20 muškaraca i 20 žena). Svaka podskupina, (elitne žene, elitni muškarci, neelitne žene i neelitni muškarci) uključivala je po 10 sudionika. Konkretno, u cjelokupnom uzorku analizirani su mehanički intenzitet uzastopnih udaraca i fiziološki odgovori tijekom izvođenja Repeated Punch Ability Testa (RPAT). Također su analizirane promjene mehaničkog intenziteta uzastopnih udaraca i fizioloških odgovora tijekom različitih rundi, odnosi između tih varijabli te moguće razlike povezane sa spolom i natjecateljskom razinom. Preliminarna metodološka karakterizacija RPAT-a, već započeta u pilot-istraživanju, dodatno je proširena na ukupni uzorak glavnog eksperimentalnog istraživanja te je također uključivala procjenu test–retest pouzdanosti, pogreške mjerenja, osjetljivosti i preliminarnih dokaza o valjanosti. Paralelno su analizirani mišićno-tetivna krutost u statičkim uvjetima specifičnih anatomskih regija dominantnog donjeg ekstremiteta, glavni parametri eksplozivne snage donjih ekstremiteta i pokazatelji mehaničkog intenziteta pojedinačnog udarca. Za mjere mišićno-tetivne krutosti u statičkim uvjetima također je procijenjena test–retest pouzdanost putem ponovljenih mjerenja u standardiziranim eksperimentalnim uvjetima. Zatim su ispitani odnosi između mišićno-tetivne krutosti u statičkim uvjetima specifičnih anatomskih regija dominantnog donjeg ekstremiteta, glavnih parametara eksplozivne snage donjih ekstremiteta i mehaničkog intenziteta pojedinačnog udarca. Također su analizirane moguće razlike povezane sa spolom i natjecateljskom razinom u razmatranim varijablama. Eksperimentalna faza omogućila je integrirano i

detaljnije istraživanje glavnih mehaničkih, fizioloških i neuromuskularnih komponenti povezanih sa sportskom izvedbom u boksu te mogućih odnosa između analiziranih varijabli.

4.1.1 Faza 1 – Sustavni pregled

Prva faza istraživanja provedena je sustavnim pregledom literature s kvalitativnom sintezom, razvijenim u skladu sa smjernicama PRISMA 2020 (Page et al., 2021). Istraživačko pitanje definirano je a priori prema modelu PICOS (engl. *Population, Intervention/Exposure, Comparator, Outcomes and Study design*).

Pretraživanje literature provedeno je u bazama podataka PubMed i Google Scholar, uzimajući u obzir istraživanja objavljena između siječnja 2010. i siječnja 2026. U bazi PubMed korištene su kombinacije ključnih riječi relevantnih za ciljeve sustavnog pregleda, povezane Booleovim operatorima „AND“ i „OR“. U bazi Google Scholar korištene su kombinacije ključnih riječi u skladu s istim ciljevima te je za svaku kombinaciju pregledano prvih 100 rezultata.

Prihvatljivima su smatrana opservacijska i eksperimentalna istraživanja koja su izvještavala o izvornim podacima koji se odnose na boksače aktivno uključene u trening ili natjecanje, bez ograničenja s obzirom na spol, natjecateljsku razinu ili dob. Razmatrani protokoli uključivali su testove maksimalnog pojedinačnog udarca, specifične boksačke protokole karakterizirane ponavljanim ili uzastopnim udarcima, uključujući simulirane mečeve, sparing, rad na fokuserima i vreći, protokole strukturirane u rundama ili prema intervalnom načinu rada te specifične progresivne testove za boks. Ishodi od interesa uključivali su pokazatelje izvedbe udarca, fiziološke odgovore i neuromuskularne karakteristike donjih ekstremiteta. Razmatrane usporedbe uključivale su usporedbe između skupina i intraindividualne usporedbe između različitih eksperimentalnih uvjeta.

Isključena su istraživanja za koja nije bio dostupan cjeloviti tekst, ona koja su izvještavala o ishodima koji nisu bili specifični za boks ili nisu bili relevantni za ciljeve sustavnog pregleda te radovi koji nisu sadržavali izvorne podatke, poput preglednih radova, uvodnika i kongresnih sažetaka.

Identificirani zapisi uvezeni su u softver za upravljanje bibliografijom Zotero, putem kojeg su identificirani i uklonjeni duplikati prije faze probira. Odabir istraživanja potom je proveden pregledom naslova i sažetaka te procjenom cjelovitih tekstova radi utvrđivanja prihvatljivosti.

Za uključena istraživanja podaci su sustavno izdvojeni uzimajući u obzir opće karakteristike istraživanja, karakteristike uzorka, vrstu, strukturu i kontekst primjene korištenih protokola, pokazatelje izvedbe udarca, fiziološke odgovore i neuromuskularne karakteristike donjih ekstremiteta.

S obzirom na heterogenost dizajna istraživanja, eksperimentalnih protokola i prikazanih varijabli, metaanaliza nije provedena. Podaci su stoga organizirani putem strukturirane kvalitativne sinteze, s posebnim naglaskom na karakteristike uzoraka, korištene protokole i glavne razmatrane domene ishoda. Sinteza je bila usmjerena na identificiranje podudarnosti, razlika i glavnih nedostataka u postojećoj literaturi.

4.1.2 Faza 2 – Pilot - istraživanje

Pilot-istraživanje bilo je usmjereno na preliminarnu analizu mehaničkog intenziteta uzastopnih udaraca i fizioloških odgovora tijekom izvođenja Repeated Punch Ability Testa (RPAT). Konkretno, analizirani su srednji Intensity Score uzastopnih udaraca, srednja srčana frekvencija (HRmean) i srednja potrošnja kisika (VO_2mean) zabilježeni tijekom različitih rundi protokola. Također su analizirane promjene mehaničkog intenziteta uzastopnih udaraca i fizioloških odgovora tijekom različitih rundi, odnosi između tih varijabli te moguće razlike povezane sa spolom i natjecateljskom razinom.

U okviru pilot-istraživanja RPAT je također ponovljen kod istih 20 sudionika u jednakim standardiziranim eksperimentalnim uvjetima. Ponavljanje protokola omogućilo je preliminarnu metodološku karakterizaciju RPAT-a, uključujući procjenu test–retest pouzdanosti, pogreške mjerenja i osjetljivosti.

Dvadeset sudionika uključenih u pilot-istraživanje naknadno je uključeno u glavno eksperimentalno istraživanje, u kojem su analiza RPAT-a i njegova metodološka karakterizacija proširene na cjelokupni uzorak.

4.1.3 Faza 3 – Glavno eksperimentalno istraživanje

Treća faza istraživanja uključivala je glavno eksperimentalno istraživanje provedeno na ukupnom uzorku od 40 boksača, koji je obuhvaćao 20 sudionika prethodno uključenih u pilot-istraživanje i dodatnih 20 sudionika s jednakom raspodjelom prema natjecateljskoj razini i spolu. Uzorak je stoga uključivao 20 elitnih i 20 neelitnih boksača, od kojih 20 muškaraca i 20 žena.

U cjelokupnom uzorku analizirani su mehanički intenzitet uzastopnih udaraca i fiziološki odgovori tijekom izvođenja Repeated Punch Ability Testa (RPAT). U kontinuitetu s pilot-istraživanjem, analizirane su promjene mehaničkog intenziteta uzastopnih udaraca i fizioloških odgovora tijekom različitih rundi protokola, njihovi mogući odnosi te razlike povezane sa spolom i natjecateljskom razinom. Metodološka karakterizacija RPAT-a, započeta u pilot-fazi, također je nastavljena na cjelokupnom uzorku procjenom test–retest pouzdanosti, pogreške mjerenja i osjetljivosti, uz razmatranje i preliminarnih dokaza o valjanosti protokola.

Glavno eksperimentalno istraživanje također je proširilo područje istraživanja na neuromuskularne karakteristike donjih ekstremiteta i mehanički intenzitet pojedinačnog udarca. Konkretno, procijenjeni su mišićno-tetivna krutost u statičkim uvjetima specifičnih anatomskih regija dominantnog donjeg ekstremiteta i pripadajuća test–retest pouzdanost, glavni parametri eksplozivne snage donjih ekstremiteta te pokazatelji mehaničkog intenziteta pojedinačnog udarca. Zatim su ispitani mogući odnosi između neuromuskularnih karakteristika donjih ekstremiteta i mehaničkog intenziteta pojedinačnog udarca, kao i razlike povezane sa spolom i natjecateljskom razinom u analiziranim varijablama.

Ova faza je zaključno omogućila proširenje nalaza dobivenih u pilot-istraživanju te je analizi mehaničkog intenziteta uzastopnih udaraca i fizioloških odgovora tijekom RPAT-a

pridružila procjenu neuromuskularnih karakteristika donjih ekstremiteta i mehaničkog intenziteta pojedinačnog udarca.

4.2 Sudionici

Uzorak istraživanja činili su boksači muškog i ženskog spola koji su pripadali dvjema različitim natjecateljskim razinama: elitnoj i neelitnoj. Konkretno, skupinu elitnih boksača činili su isključivo sportaši koji su bili članovi talijanske reprezentacije Talijanskog boksačkog saveza (FPI) i sudjelovali u službenim natjecanjima s punim kontaktom, dok su skupinu neelitnih boksača činili isključivo sportaši koji nisu bili članovi talijanske reprezentacije Talijanskog boksačkog saveza, a sudjelovali su u službenim natjecanjima s punim kontaktom na regionalnoj i/ili međuregionalnoj razini.

U pilot-fazi istraživanja sudjelovalo je 20 sportaša (10 elitnih i 10 neelitnih boksača), ravnomjerno raspoređenih prema spolu. Ukupni uzorak glavnog eksperimentalnog istraživanja činilo je 40 sportaša, uključujući 20 sudionika iz pilot-faze i dodatnih 20 sportaša, s jednakom raspodjelom prema natjecateljskoj razini i spolu. Ukupni uzorak stoga je uključivao 20 elitnih i 20 neelitnih boksača, 20 sudionika muškog i 20 sudionika ženskog spola.

Svi sudionici bili su u dobi između 19 i 32 godine.

U istraživanje su uključeni zdravi ispitanici koji su redovito sudjelovali u strukturiranom programu treninga, nalazili se u prednatjecateljskoj ili natjecateljskoj fazi sportske sezone te imali najmanje pet uzastopnih godina iskustva u boksačkom treningu.

Prije početka eksperimentalnih procedura svi su sudionici dobili detaljne informacije o ciljevima istraživanja i načinu provedbe testnih sesija te su dali pisani informirani pristanak za sudjelovanje. Istraživanje je provedeno u okviru istraživačkog projekta „*Psychophysical perception and body awareness in school and sports contexts through observational and non-invasive tools*”, koji je odobrilo Etičko povjerenstvo Sveučilišta Telematica Pegaso (Prot./E 004726 od 15. srpnja 2025.), u skladu s etičkim načelima Helsinške deklaracije (World Medical Association, 2013). Pripadajuća dokumentacija čuvana je u skladu s važećim propisima.

Iz istraživanja su isključeni ispitanici koji su imali mišićno-koštane ozljede ili bolesti bilo koje vrste koje su ograničavale bavljenje tjelesnom aktivnošću tijekom dvanaest mjeseci prije prikupljanja podataka, kako bi se izbjeglo moguće ometanje izvođenja eksperimentalnih testova i interpretacije rezultata.

4.3 Uzorak varijabli i mjerni instrumenti

Uzorak varijabli obuhvaćao je mehaničke, fiziološke i neuromuskularne pokazatelje odabrane u skladu s ciljevima istraživanja i njihovom relevantnošću za specifičnu sportsku izvedbu u boksu.

U skladu s obrazloženjem istraživanja, varijable su organizirane na sljedeći način: (i) srednji Intensity Score, srednja srčana frekvencija (HRmean) i srednja potrošnja kisika (VO_2mean) tijekom Repeated Punch Ability Testa (RPAT); (ii) mišićno-tetivna krutost u statičkim uvjetima specifičnih anatomskih regija dominantnog donjeg ekstremiteta; (iii) glavni parametri eksplozivne snage donjih ekstremiteta dobiveni testovima ponavljanih vertikalnih skokova; (iv) srednja i maksimalna vršna brzina te srednji i maksimalni Intensity Score zabilježeni tijekom testova pojedinačnih maksimalnih udaraca u vreću. Ovakva organizacija omogućila je integriranu analizu mehaničkih, fizioloških i neuromuskularnih pokazatelja razmatranih u istraživanju (Franchini et al., 2019; Loturco et al., 2016; Ruddock et al., 2021).

Mehanički intenzitet uzastopnih udaraca procijenjen je bilježenjem srednjeg Intensity Scorea, koji je korišten kao pokazatelj mehaničkog intenziteta uzastopnih udaraca tijekom Repeated Punch Ability Testa (RPAT).

Srednji Intensity Score uzastopnih udaraca zabilježen je pomoću inercijskih senzora Hykso Punch Tracker postavljenih na oba zapešća sportaša (Omcirk et al., 2021, 2023). Intensity Score predstavlja kompozitni indeks koji generira sustav Hykso Punch Tracker, dobiven obradom inercijskih podataka zabilježenih tijekom izvođenja udaraca. Stoga ovaj parametar ne predstavlja izravnu mjeru udarne sile ili snage udarca, već relativni pokazatelj mehaničkog intenziteta udarca koji bilježi uređaj.

Razmatrane varijable bile su:

- **srednji *Intensity Score* po rundi (ISmean),** izračunat kao aritmetička sredina Intensity Scoreova zabilježenih tijekom šest serija udaraca u trajanju od 5 s koje su činile svaku rundu;
- **promjena srednjeg *Intensity Score*-a između rundi**, izračunata kao razlika između rundi (ΔR1–R2, ΔR2–R3 i ΔR1–R3).

Ove su varijable korištene za opisivanje srednje vrijednosti mehaničkog intenziteta uzastopnih udaraca za svaku rundu i njegovih promjena između rundi protokola. Iste su varijable također korištene za analizu odnosa između mehaničkog intenziteta uzastopnih udaraca, srednje srčane frekvencije (HRmean) i srednje potrošnje kisika (VO_2mean) tijekom različitih rundi protokola.

Fiziološki odgovori procijenjeni su bilježenjem srednje srčane frekvencije (HRmean) i srednje potrošnje kisika (VO_2mean) tijekom Repeated Punch Ability Testa (RPAT).

Srednja srčana frekvencija (HRmean) praćena je pomoću prsnog remena Polar H10 (Schaffarczyk et al., 2022), dok je srednja potrošnja kisika (VO_2mean) mjerena prijenosnim metaboličkim analizatorom VO_2 Master Pro (Thiessen et al., 2025).

Razmatrane varijable bile su:

- **srednja srčana frekvencija po rundi (HRmean)**, koja predstavlja srednju vrijednost srčane frekvencije zabilježenu tijekom svake runde protokola;
- **promjene srednje srčane frekvencije između rundi**, izračunate kao razlika između rundi (ΔR1–R2, ΔR2–R3 i ΔR1–R3);
- **srednja potrošnja kisika po rundi (VO_2mean)**, koja predstavlja srednju vrijednost potrošnje kisika zabilježenu tijekom svake runde protokola;
- **promjene srednje potrošnje kisika između rundi**, izračunate kao razlika između rundi (ΔR1–R2, ΔR2–R3 i ΔR1–R3).

Ove su varijable korištene za opisivanje srednje srčane frekvencije (HRmean) i srednje potrošnje kisika (VO_2mean) za svaku rundu te njihovih promjena između rundi protokola.

Iste su varijable također korištene za analizu odnosa između mehaničkog intenziteta uzastopnih udaraca, srednje srčane frekvencije (HRmean) i srednje potrošnje kisika (VO_2mean) tijekom različitih rundi protokola.

Mišićno-tetivna krutost procijenjena je u statičkim uvjetima na specifičnim anatomskim regijama dominantnog donjeg ekstremiteta pomoću uređaja MyotonPRO (Lettner et al., 2024). Mjerne točke identificirane su pomoću anatomskih orijentira opisanih u literaturi za miotonometrijsku procjenu mišića i tetiva (Duarte et al., 2026).

Konkretno, procijenjene su:

- **krutost Ahilove tetive [N/m]** – 15% duljine između petne kvrge i poplitealne jame;
- **krutost lateralnog gastroknemijusa [N/m]** – 33% duljine između glave fibule i petne kvrge;
- **krutost patelarne tetive [N/m]** – 50% duljine između donjeg ruba patele i tibijalne kvrge;
- **krutost ravnog bedrenog mišića [N/m]** – 50% duljine između prednje gornje ilijačne bodlje i gornjeg ruba patele;
- **krutost lateralnog širokog mišića [N/m]** – 66% duljine između prednje gornje ilijačne bodlje i lateralnog ruba patele.

Ove su varijable korištene za opisivanje mišićno-tetivne krutosti u statičkim uvjetima specifičnih anatomskih regija dominantnog donjeg ekstremiteta. Iste su varijable također korištene za analizu odnosa između neuromuskularnih karakteristika donjih ekstremiteta i mehaničkog intenziteta pojedinačnog udarca.

Glavni parametri eksplozivne snage donjih ekstremiteta procijenjeni su testovima ponavljanih vertikalnih skokova (rCMJ – rJ). Optoelektronički sustav Optojump korišten je za prikupljanje vremenskih parametara skoka (vrijeme kontakta, vrijeme leta i ritam), dok je inercijski senzor Gyko bilježio inercijske signale, koje je potom obradio softver sustava radi dobivanja dinamičkih parametara skoka (trajanje koncentrične faze, trajanje ekscentrične faze, procijenjena relativna vršna sila i procijenjeni rate of force development). Inercijski senzor Gyko postavljen je posteriorno u razini zdjelice i pričvršćen odgovarajućim

elastičnim pojasom, u skladu s uputama iz priručnika integriranog u softver sustava (Microgate Srl, Italija; 2019, 2021).

Razmatrani parametri uključivali su:

- **vrijeme kontakta [s];**
- **vrijeme leta [s];**
- **ritam [**p/**s],** ritam izražen u skokovima (ili koracima) u sekundi;
- **trajanje koncentrične faze [s],** trajanje od trenutka kada brzina postane > 0 do trenutka odvajanja od tla;
- **trajanje ekscentrične faze [s],** trajanje od početka pokreta do trenutka prije nego što brzina postane > 0;
- **procijenjena relativna vršna sila (Fmax) [N/kg],** vršna sila prije odraza od tla;
- **procijenjeni rate of force development (RFD) [N/kg/s],** parametar koji daje softver Gyko za opisivanje stope razvoja sile tijekom koncentrične faze.

Ove su mjere korištene za opisivanje glavnih parametara eksplozivne snage donjih ekstremiteta. Iste su varijable također korištene za analizu odnosa između neuromuskularnih karakteristika donjih ekstremiteta i mehaničkog intenziteta pojedinačnog udarca.

Mehanički intenzitet pojedinačnog udarca procijenjen je putem vršne brzine i Intensity Scorea zabilježenih pomoću inercijskih senzora Hykso Punch Tracker postavljenih na oba zapešća sportaša (Omcirk et al., 2021, 2023). Za svaki ekstremitet vrijednosti zabilježene tijekom pet krošea korištene su za izračun srednje i maksimalne vršne brzine te srednjeg i maksimalnog Intensity Scorea, koji su smatrani pokazateljima mehaničkog intenziteta pojedinačnog udarca.

Razmatrane varijable bile su:

- **srednja vršna brzina [km·h^{-1}]**, izračunata kao srednja vrijednost vršnih brzina zabilježenih tijekom pet krošea izvedenih svakim ekstremitetom;
- **maksimalna vršna brzina [km·h^{-1}]**, koja odgovara najvećoj vršnoj brzini zabilježenoj među pet krošea izvedenih svakim ekstremitetom;

- **srednji *Intensity Score***, izračunat kao srednja vrijednost Intensity Scoreova zabilježenih tijekom pet krošea izvedenih svakim ekstremitetom;
- **maksimalni *Intensity Score***, koji odgovara najvećem Intensity Scoreu zabilježenom među pet krošea izvedenih svakim ekstremitetom.

Ove su mjere korištene za opisivanje mehaničkog intenziteta pojedinačnog udarca. Iste su varijable također korištene za analizu odnosa između neuromuskularnih karakteristika donjih ekstremiteta i mehaničkog intenziteta pojedinačnog udarca.

4.4 Eksperimentalni postupak

Istraživački projekt primijenio je opservacijski pristup s ponovljenim mjerenjima i eksperimentalnim procedurama raspoređenima u četiri sesije.

Svi su postupci bili standardizirani i razvijeni u suradnji sa stručnim osobljem Talijanskog boksačkog saveza (FPI). Konkretno, Repeated Punch Ability Test (RPAT) korišten je kao eksplorativni protokol specifičan za boks za integriranu analizu mehaničkih i fizioloških odgovora tijekom ponavljanih napora visokog intenziteta.

Prikupljanje podataka organizirano je u četiri eksperimentalne sesije.

Prva sesija bila je posvećena procjeni srednjeg Intensity Scorea uzastopnih udaraca i fizioloških odgovora tijekom izvođenja Repeated Punch Ability Testa (RPAT), dok je u drugoj sesiji, provedenoj približno sedam dana nakon prve (Chaabene et al., 2018), RPAT protokol ponovljen u jednakim standardiziranim eksperimentalnim uvjetima kako bi se omogućila usporedba mjerenja dobivenih u dvjema sesijama. Podaci dobiveni tijekom RPAT-a korišteni su za analize povezane s hipotezama H1–H3, dok su podaci dobiveni tijekom testne i retestne sesije korišteni za karakterizaciju test–retest pouzdanosti, pogreške mjerenja i osjetljivosti protokola. Treća sesija bila je posvećena procjeni mišićno-tetivne krutosti u statičkim uvjetima specifičnih anatomskih regija dominantnog donjeg ekstremiteta; u četvrtoj sesiji, provedenoj približno 24 sata nakon treće (Secer et al., 2026), ta je procjena ponovljena u jednakim standardiziranim eksperimentalnim uvjetima kako bi

se omogućila usporedba mjerenja dobivenih u dvjema sesijama, nakon čega je uslijedila procjena glavnih parametara eksplozivne snage donjih ekstremiteta te srednje i maksimalne vršne brzine i srednjeg i maksimalnog Intensity Scorea pojedinačnih udaraca. Testovi skokova rCMJ i rJ te procjena mehaničkog intenziteta pojedinačnog udarca provedeni su tijekom druge sesije procjene krutosti, nakon retesta krutosti, kako bi se izbjegao mogući utjecaj tih testova na njezino mjerenje. Podaci dobiveni tijekom testne i retestne sesije procjene krutosti korišteni su za karakterizaciju test–retest pouzdanosti, dok su podaci dobiveni tijekom retesta korišteni za analize povezane s hipotezama H4–H5.

Sve procjene provedene su u jutarnjim satima. Svakoj eksperimentalnoj sesiji prethodilo je najmanje 24 sata bez intenzivne tjelesne aktivnosti. Sportašima je također preporučeno izbjegavati konzumaciju kofeina i alkohola tijekom 24 sata prije svake testne sesije, u skladu s postupcima standardizacije prije testiranja koji su prethodno primjenjivani u populacijama boksača (Gough et al., 2019).

Način izvođenja eksperimentalnih testova i postupci mjerenja razmatranih varijabli opisani su u sljedećim odlomcima.

Tijekom prve eksperimentalne sesije, u kojoj su sudjelovali elitni i neelitni boksači muškog i ženskog spola, procijenjene su antropometrijske karakteristike sudionika (tjelesna visina u cm i tjelesna masa u kg).

Nakon toga provedena je specifična faza zagrijavanja u ukupnom trajanju od približno 9 minuta, strukturirana u 6 minuta opće aktivacije i 3 minute udaraca izvedenih u prazno (shadowboxing), s ciljem reproduciranja načina pripreme koji se uobičajeno primjenjuje u boksačkom kontekstu prije natjecateljske aktivnosti. Zagrijavanje je uključivalo vježbe dinamičke aktivacije (npr. poskoke i različite oblike kretanja), vježbe za mobilnost zglobova i udarce izvedene u prazno progresivno rastućim intenzitetom.

Po završetku zagrijavanja sportaši su opremljeni potrebnom opremom za praćenje mehaničkih i fizioloških varijabli.

Zatim je proveden Repeated Punch Ability Test (RPAT) radi procjene mehaničkog intenziteta uzastopnih udaraca, srednje srčane frekvencije (HRmean) i srednje potrošnje

kisika (VO_2mean). Repeated Punch Ability Test (RPAT) predstavlja nedavno razvijen protokol intervalnog vježbanja specifičan za boks, koji se trenutačno nalazi u fazi progresivne metodološke karakterizacije te se koristi u eksplorativne i primijenjene svrhe u okviru procjene sportske izvedbe u boksu. Protokol je osmišljen s ciljem reproduciranja, u standardiziranim, kontroliranim i ekološki relevantnim uvjetima, mehaničkih i fizioloških zahtjeva tipičnih za sportsku izvedbu u boksu. RPAT protokol sastojao se od 3 uzastopne runde u trajanju od po 90 sekundi. Unutar svake runde sportaši su izveli šest serija direktnih udaraca u vreću maksimalnim intenzitetom u trajanju od po 5 sekundi, između kojih je bilo 10 sekundi pasivnog oporavka. Udaljenost od vreće svaki je sportaš samostalno odabrao u skladu s vlastitim antropometrijskim karakteristikama i načinom izvođenja. Tijekom protokola sportaši su nosili pamučne bandaže za šake duljine 3,5 m ispod rukavica za vreću od 10 oz, inercijske senzore Hykso Punch Tracker postavljene na dorzalnu stranu oba zapešća ispod bandaža, prsni remen Polar H10 i prijenosni metabolički analizator VO_2 Master Pro. Protokol je izveden korištenjem boksačke vreće mase 60 kg i visine 145 cm, pričvršćene za zid.

Intensity Score zabilježen je pomoću inercijskih senzora Hykso Punch Tracker (Omcirk et al., 2021). Tijekom RPAT-a za svaku seriju udaraca u trajanju od 5 s zabilježen je Intensity Score koji se odnosio na udarce izvedene u toj seriji. Za svaku rundu srednji Intensity Score (ISmean) zatim je izračunat kao aritmetička sredina Intensity Scoreova zabilježenih tijekom šest serija udaraca u trajanju od 5 s koje su činile svaku rundu. ISmean je korišten u analizama kao pokazatelj mehaničkog intenziteta uzastopnih udaraca tijekom svake runde.

Srednja srčana frekvencija (HRmean) zabilježena je pomoću prsnog remena Polar H10 (Schaffarczyk et al., 2022), dok je srednja potrošnja kisika (VO_2mean) mjerena prijenosnim metaboličkim analizatorom VO_2 Master Pro (Thiessen et al., 2025). Prije početka svakog testa VO_2 Master Pro pripremljen je i kalibriran u skladu s uputama navedenima u priručniku proizvođača. Korišten je user piece medium, dok je veličina maske za lice odabrana individualno kako bi se osiguralo pravilno prianjanje i smanjilo moguće propuštanje zraka. Nakon uključivanja i završetka automatskog postupka inicijalizacije uređaja provedena je kalibracija protoka pomoću kalibracijske štrcaljke od 3 L, nakon čega je uslijedila kalibracija O_2. Po završetku postupaka kalibracije i prije početka bilježenja provjereni su pravilno postavljanje i pričvršćivanje maske za lice kako bi se smanjile moguće smetnje pri mjerenju

potrošnje kisika uzrokovane pokretima glave i eventualnim pomicanjem maske tijekom izvođenja protokola. Podaci su zabilježeni putem vlasničke aplikacije VO_2 Master Manager (VO_2 Master Health Sensors Inc., Kanada) i korišteni kao fiziološki pokazatelji. Bilježenja su pokrenuta ručno i istodobno, a početak svake runde označen je ručno, što je omogućilo vremensko usklađivanje fizioloških podataka s odgovarajućim vrijednostima Intensity Scorea. Za svaku rundu HRmean i VO_2mean izračunati su uzimajući u obzir cijeli interval od 90 s, koji je obuhvaćao šest serija udaraca u trajanju od 5 s i šest pripadajućih razdoblja pasivnog oporavka u trajanju od 10 s, uključujući razdoblje oporavka nakon šeste serije. Tako dobivene vrijednosti HRmean i VO_2mean za svaku rundu korištene su u naknadnim statističkim analizama.

U okviru progresivne metodološke karakterizacije RPAT protokola, u uzorku pilot-faze provedena je preliminarna procjena test–retest pouzdanosti, pogreške mjerenja i osjetljivosti glavnih varijabli zabilježenih tijekom protokola. Te su procjene naknadno proširene na cjelokupni uzorak glavnog eksperimentalnog istraživanja, u kojem su također razmotreni preliminarni dokazi o valjanosti RPAT-a koji su se stvarno mogli poduprijeti na temelju dizajna istraživanja i dostupnih mjerenja.

Tijekom treće i četvrte eksperimentalne sesije, u kojima su sudjelovali elitni i neelitni boksači muškog i ženskog spola, procijenjene su neuromuskularne karakteristike donjih ekstremiteta i mehanički intenzitet pojedinačnog udarca.

Treća eksperimentalna sesija započela je standardiziranim razdobljem odmora u trajanju od 5 minuta u opuštenim uvjetima. Neposredno nakon toga provedena je procjena mišićno-tetivne krutosti u statičkim uvjetima specifičnih anatomskih regija dominantnog donjeg ekstremiteta. Test je proveden u statičkim uvjetima radi procjene mehaničkih svojstava površinskih mišićnih i tetivnih tkiva. Mjerne točke identificirane su pomoću anatomskih orijentira opisanih u literaturi za miotonometrijsku procjenu mišića i tetiva (Duarte et al., 2026), uz pomoć antropometra, libele, mjerne trake i dermografske olovke.

Za procjenu Ahilove tetive i lateralnog gastroknemijusa sudionici su bili postavljeni na masažni stol u potrbušnom i opuštenom položaju, s ispruženim donjim ekstremitetima i bosim stopalima postavljenima izvan ruba stola. Za procjenu patelarne tetive, ravnog bedrenog mišića i lateralnog širokog mišića sudionici su bili postavljeni u opušteni ležeći

položaj na leđima, s donjim ekstremitetima savijenima pod kutom od 90° i bosim stopalima postavljenima izvan ruba stola.

Krutost Ahilove tetive, lateralnog gastroknemijusa, patelarne tetive, ravnog bedrenog mišića i lateralnog širokog mišića zabilježena je pomoću uređaja MyotonPRO (Lettner et al., 2024). Za svako anatomsko mjesto provedeno je jedno mjerenje koje se sastojalo od pet uzastopnih mehaničkih impulsa; vrijednost krutosti korištena u naknadnim analizama odgovarala je srednjoj vrijednosti pet dobivenih vrijednosti. Podaci su prikupljeni i zabilježeni putem vlasničkog softvera Myoton (Myoton AS, Estonija) te korišteni kao neuromuskularni pokazatelji.

U četvrtoj eksperimentalnoj sesiji procjena mišićno-tetivne krutosti u statičkim uvjetima specifičnih anatomskih regija dominantnog donjeg ekstremiteta ponovljena je na istim anatomskim regijama prema istom postupku opisanom za treću sesiju. Nakon toga provedena je faza općeg zagrijavanja koja se sastojala od 6 minuta trčanja na traci za trčanje progresivno rastućim intenzitetom. Po završetku zagrijavanja proveden je test ponavljanih vertikalnih skokova radi procjene glavnih parametara eksplozivne snage donjih ekstremiteta. Test se sastojao od tri serije repeated countermovement jumps (rCMJ) od po pet skokova, izvedenih uz savijanje koljena do približno 90° i s ograničenim pokretima ruku, te tri serije repeated jumps (rJ) od po osam skokova, izvedenih uz minimalno savijanje koljena i slobodne pokrete ruku. Između serija bilo je 120 sekundi pasivnog oporavka.

Razmatrani parametri eksplozivne snage donjih ekstremiteta bili su: vrijeme kontakta, vrijeme leta, ritam, trajanje koncentrične faze, trajanje ekscentrične faze, procijenjena relativna vršna sila i procijenjeni rate of force development. Za svaku seriju rCMJ i rCMJ-a korištene su srednje vrijednosti parametara koje je softver izračunao na temelju dostupnih podataka za pojedinačne skokove. Za svaki parametar i svaku vrstu skoka vrijednost korištena u naknadnim analizama zatim je izračunata kao srednja vrijednost srednjih vrijednosti dobivenih u trima serijama.

Po završetku testova skokova sudionici su izveli specifičnu fazu zagrijavanja u ukupnom trajanju od približno 3–4 minute, koja je uključivala udarce izvedene u prazno (engl. *shadowboxing*).

Nakon toga proveden je test pojedinačnih udaraca radi procjene mehaničkog intenziteta pojedinačnog udarca. Test se sastojao od deset krošea u vreću izvedenih maksimalnim intenzitetom, pet prednjim lijevim ekstremitetom i pet stražnjim desnim ekstremitetom, iz ortodoksnog položaja garda i sa samostalno odabrane udaljenosti. Između jednog i sljedećeg udarca nije bio predviđen unaprijed određen interval oporavka; svaki novi pokušaj izveden je nakon vremena potrebnog sportašu da se ponovno postavi u početni položaj.

Tijekom svakog krošea vršna brzina i Intensity Score zabilježeni su pomoću inercijskih senzora Hykso Punch Tracker postavljenih na oba zapešća sportaša (Omcirk et al., 2021). Za svaki ekstremitet iz pet izvedenih krošea izračunati su srednja i maksimalna vršna brzina te srednji i maksimalni Intensity Score. Podaci su zabilježeni putem vlasničke aplikacije Hykso (Hykso Inc., Kanada) i korišteni kao pokazatelji mehaničkog intenziteta pojedinačnog udarca.

Također su procijenjene test–retest pouzdanost i pogreška mjerenja mjera mišićno-tetivne krutosti dominantnog donjeg ekstremiteta u statičkim uvjetima u različitim razmatranim anatomskim regijama.

4.5 Statističke analize

Statističke analize provedene su na podacima dobivenima u različitim fazama istraživanja u skladu sa specifičnim istraživačkim hipotezama. Podaci su najprije podvrgnuti deskriptivnoj analizi i izraženi kao srednja vrijednost i standardna devijacija (SD). Distribucija varijabli ispitana je Shapiro–Wilkovim testom. Homogenost varijanci provjerena je Leveneovim testom kada je to bilo primjenjivo.

Karakteristike uzorka analizirane su s obzirom na dob i trenažni staž. Za obje varijable provedena je dvosmjerna ANOVA, pri čemu su spol i natjecateljska razina (elitni vs neelitni) razmatrani kao faktori između ispitanika.

Veličina uzorka procijenjena je analizama statističke snage provedenima pomoću programa G*Power (verzija 3.1.9.7). Za učinak runde unutar ispitanika provedena je a priori analiza

uzimajući u obzir ANOVA-u za ponovljena mjerenja, veličinu učinka f = 0,25, razinu značajnosti α = 0,05, statističku snagu (1 − β) = 0,80, četiri skupine, tri mjerenja, korelaciju između ponovljenih mjerenja od 0,50 i korekciju nesferičnosti ε = 0,75. Analiza je pokazala minimalnu ukupnu veličinu uzorka od 36 sudionika. Uz stvarni uzorak od 40 sudionika, procijenjena statistička snaga za učinak runde iznosila je 0,873. Za učinke spola i natjecateljske razine između ispitanika te njihovu interakciju, a priori analiza temeljena na ANOVA-i za fiksne učinke, uz pretpostavke f = 0,25, α = 0,05, statističke snage 0,80 i četiri skupine, pokazala je potrebnu ukupnu veličinu uzorka od 128 sudionika. Uz stvarni uzorak od 40 sudionika, procijenjena statistička snaga za te učinke iznosila je 0,337. Stoga su analize povezane sa spolom, natjecateljskom razinom i njihovim interakcijama smatrane eksplorativnima i interpretirane s oprezom.

Za varijable zabilježene tijekom Repeated Punch Ability Testa (RPAT) analizirani su srednji Intensity Score uzastopnih udaraca (ISmean), srednja srčana frekvencija (HRmean) i srednja potrošnja kisika (VO_2mean) zabilježeni u svakoj rundi protokola. Za svaku varijablu također su izračunate promjene između rundi (ΔR1–R2, ΔR2–R3 i ΔR1–R3). Za provjeru H1 promjene mehaničkih i fizioloških varijabli tijekom protokola analizirane su mješovitom ANOVA-om za ponovljena mjerenja, pri čemu je runda (runda 1, runda 2 i runda 3) razmatrana kao faktor unutar ispitanika, a spol (muškarci vs žene) i natjecateljska razina (elitni vs neelitni boksači) kao faktori između ispitanika. Eventualne značajne razlike dodatno su analizirane post hoc testovima s Bonferronijevom korekcijom. Glavni učinci spola i natjecateljske razine, kao i njihove interakcije, interpretirani su eksplorativno, s obzirom na ograničenu veličinu svakog poduzorka, uz prikaz veličina učinka i pripadajućih intervala pouzdanosti.

Za provjeru H2 odnosi između srednjeg Intensity Scorea uzastopnih udaraca (ISmean) i fizioloških odgovora zabilježenih tijekom RPAT-a analizirani su Spearmanovim korelacijama. U svakoj rundi zasebno su ispitane povezanosti između ISmean i srednje srčane frekvencije (HRmean) te između ISmean i srednje potrošnje kisika (VO_2mean). U skladu s ovom strukturom analize specifičnom za pojedinu rundu, dvije korelacije ispitane unutar svake runde smatrane su jednom inferencijalnom obitelji, a pripadajuće vrijednosti značajnosti korigirane su sekvencijalnim Holmovim postupkom. Kao analiza osjetljivosti,

Holmov postupak dodatno je primijenjen razmatrajući svih šest korelacija obuhvaćenih H2 zajedno kao jednu inferencijalnu obitelj.

Uz nekorigirane korelacije, H2 je ispitana i parcijalnim Spearmanovim korelacijama, uz kontrolu za spol i natjecateljsku razinu. Parcijalne Spearmanove korelacije dobivene su primjenom analize na varijable transformirane u rangove. Spol i natjecateljska razina uključeni su u glavni model kao potencijalni zbunjujući čimbenici jer predstavljaju strukturne faktore dizajna koji su također razmatrani u analizama razlika između skupina. S obzirom na veličinu uzorka (N = 40), primijenjen je parsimonijski model, izbjegavajući istodobno uključivanje dodatnih kovarijata. Robusnost povezanosti zatim je ispitana pomoću dviju zasebnih analiza osjetljivosti, dodavanjem dobi odnosno trenažnog iskustva modelu koji je uključivao spol i natjecateljsku razinu. Za parcijalne korelacije glavnog modela zadržana je ista struktura kontrole višestrukih usporedbi kao i za nekorigirane korelacije: Holmov postupak primijenjen je na dvije povezanosti ispitane unutar svake runde te, kao analiza osjetljivosti u odnosu na definiranje inferencijalne obitelji, na svih šest korelacija razmatranih zajedno.

Kako je predviđeno planom analize, provedena je i eksplorativna multipla regresijska analiza radi ispitivanja zajedničke povezanosti fizioloških varijabli s mehaničkim intenzitetom uzastopnih udaraca. U tu su svrhu za svakog sudionika korištene ukupne srednje vrijednosti ISmean, HRmean i VO_2mean izračunate kroz tri runde RPAT-a; ISmean je razmatran kao zavisna varijabla, dok su HRmean i VO_2mean istodobno uključeni kao prediktori.

Za provjeru H3 eksplorativno su ispitani učinci spola i natjecateljske razine te njihove interakcije na srednji Intensity Score uzastopnih udaraca (ISmean), srednju srčanu frekvenciju (HRmean) i srednju potrošnju kisika (VO_2mean), na temelju iste mješovite ANOVA-e za ponovljena mjerenja opisane za H1. Eventualne značajne razlike dodatno su analizirane post hoc testovima s Bonferronijevom korekcijom. Za jednostavne usporedbe specifične za pojedinu rundu povezane sa značajnim interakcijama, Bonferronijeva korekcija primijenjena je na obitelj od tri usporedbe, po jednu za svaku rundu. S obzirom na ograničenu statističku snagu za učinke između ispitanika, ti su rezultati interpretirani s oprezom, uz prikaz veličina učinka i pripadajućih intervala pouzdanosti.

Kao dopuna analizama povezanim s RPAT-om, provedena je njegova metodološka karakterizacija procjenom test–retest pouzdanosti, pogreške mjerenja i osjetljivosti glavnih varijabli zabilježenih tijekom protokola. Analize su najprije provedene na uzorku pilot-faze (n = 20), a zatim proširene na cjelokupni uzorak glavnog eksperimentalnog istraživanja (n = 40). Za ISmean, HRmean i VO_2mean, zasebno za svaku rundu RPAT-a, izračunat je koeficijent intraklasne korelacije (ICC) primjenom dvosmjernog modela mješovitih učinaka, apsolutnog slaganja i pojedinačnog mjerenja, uz prikaz pripadajućeg 95%-tnog intervala pouzdanosti (95% CI). Također su izračunati postotni koeficijent varijacije (CV%), standardna pogreška mjerenja (SEM) i minimalna detektabilna promjena uz razinu pouzdanosti od 95% (MDC_{95}). SEM je izračunat kao standardna devijacija razlika između testa i retesta podijeljena s √2, dok je MDC_{95} izračunat kao 1,96 × √2 × SEM. CV% je izračunat kao tipična postotna pogreška na logaritamskoj skali [TEln = SD(ln Retest − ln Test)/√2; CV% = 100 × (e^TEln − 1)]. Osjetljivost mjera također je procijenjena usporedbom standardne pogreške mjerenja i najmanje relevantne promjene (SEM/SWC). SWC je izračunat kao 0,2 puta interindividualna standardna devijacija početnog mjerenja, zasebno za svaku varijablu i svaku rundu RPAT-a. Pouzdanost je interpretirana uzimajući u obzir vrijednosti ICC ≥ 0,75 kao pokazatelje dobre pouzdanosti, vrijednosti CV% ≤ 10% kao pokazatelje prihvatljive varijabilnosti te niže vrijednosti SEM i MDC_{95} kao pokazatelje veće preciznosti mjerenja. Valjanost RPAT-a ispitana je u okviru njegove progresivne metodološke karakterizacije uzimajući u obzir dokaze koji su se mogli poduprijeti na temelju strukture protokola, dizajna istraživanja i stvarno dostupnih mjerenja. Konkretno, razmatrani su preliminarni dokazi o sadržajnoj valjanosti, na temelju specifičnosti zadatka za boks, standardizacije eksperimentalnih uvjeta i usklađenosti protokola sa zahtjevima sportske izvedbe, kao i preliminarni dokazi o diskriminativnoj konstruktnoj valjanosti, procijenjeni kroz razlike u srednjem Intensity Scoreu (ISmean) s obzirom na natjecateljsku razinu. Ti su dokazi interpretirani zajedno s rezultatima test–retest pouzdanosti, pogreške mjerenja i osjetljivosti, pri čemu se RPAT nije smatrao potpuno validiranim protokolom.

Prije analiza povezanih s H4 i H5 procijenjene su test–retest pouzdanost i pogreška mjerenja mjera mišićno-tetivne krutosti dominantnog donjeg ekstremiteta u statičkim uvjetima. Analize su provedene na cjelokupnom uzorku glavnog eksperimentalnog istraživanja (n = 40), usporedbom mjerenja dobivenih u dvjema sesijama provedenima u razmaku od približno 24 sata za svaku od pet razmatranih anatomskih regija: Ahilovu tetivu, lateralni

gastroknemijus, patelarnu tetivu, ravni bedreni mišić i lateralni široki mišić. Za svako mjesto izračunati su koeficijent intraklasne korelacije (ICC), s pripadajućim 95%-tnim intervalom pouzdanosti (95% CI), postotni koeficijent varijacije (CV%), standardna pogreška mjerenja (SEM) i minimalna detektabilna promjena uz razinu pouzdanosti od 95% (MDC_{95}). Pouzdanost je interpretirana uzimajući u obzir vrijednosti ICC ≥ 0,75 kao pokazatelje dobre pouzdanosti, vrijednosti CV% ≤ 10% kao pokazatelje prihvatljive varijabilnosti te niže vrijednosti SEM i MDC_{95} kao pokazatelje veće preciznosti mjerenja.

Za provjeru H4 eksplorativno su ispitani odnosi između mišićno-tetivne krutosti u statičkim uvjetima specifičnih anatomskih regija dominantnog donjeg ekstremiteta, glavnih parametara eksplozivne snage donjih ekstremiteta i pokazatelja mehaničkog intenziteta pojedinačnog udarca. Povezanosti su analizirane Spearmanovim korelacijama. Također su izračunate parcijalne korelacije uz istodobnu kontrolu učinka spola i natjecateljske razine. Parcijalne Spearmanove korelacije dobivene su primjenom parcijalne korelacije na varijable transformirane u rangove, uz istodobnu kontrolu za spol i natjecateljsku razinu. S obzirom na eksplorativnu prirodu analiza i velik broj predviđenih povezanosti, Benjamini–Hochbergov postupak primijenjen je zasebno na obitelj Spearmanovih korelacija i na obitelj parcijalnih korelacija, uz postavljanje stope lažnih otkrića na q = 0,05. Za svaku povezanost prikazane su i nekorigirane vrijednosti p i odgovarajuće korigirane vrijednosti p.

Za provjeru H5 razlike u mišićno-tetivnoj krutosti u statičkim uvjetima specifičnih anatomskih regija dominantnog donjeg ekstremiteta, glavnim parametrima eksplozivne snage donjih ekstremiteta i pokazateljima mehaničkog intenziteta pojedinačnog udarca analizirane su eksplorativno pomoću dvosmjerne ANOVA-e, pri čemu su spol (muškarci vs žene) i natjecateljska razina (elitni vs neelitni boksači) razmatrani kao faktori između ispitanika. S obzirom na eksplorativnu prirodu H5, globalna korekcija za višestruke usporedbe nije primijenjena na skup od 27 analiziranih varijabli; rezultati su stoga interpretirani zajedničkim razmatranjem vrijednosti p, veličina učinka i pripadajućih intervala pouzdanosti. Za svaku varijablu ispitani su glavni učinci spola i natjecateljske razine te pripadajuća interakcija spol × natjecateljska razina. Eventualne statistički značajne razlike dodatno su analizirane post hoc usporedbama s Bonferronijevom korekcijom. Rezultati su interpretirani uzimajući u obzir veličine učinka i pripadajuće intervale

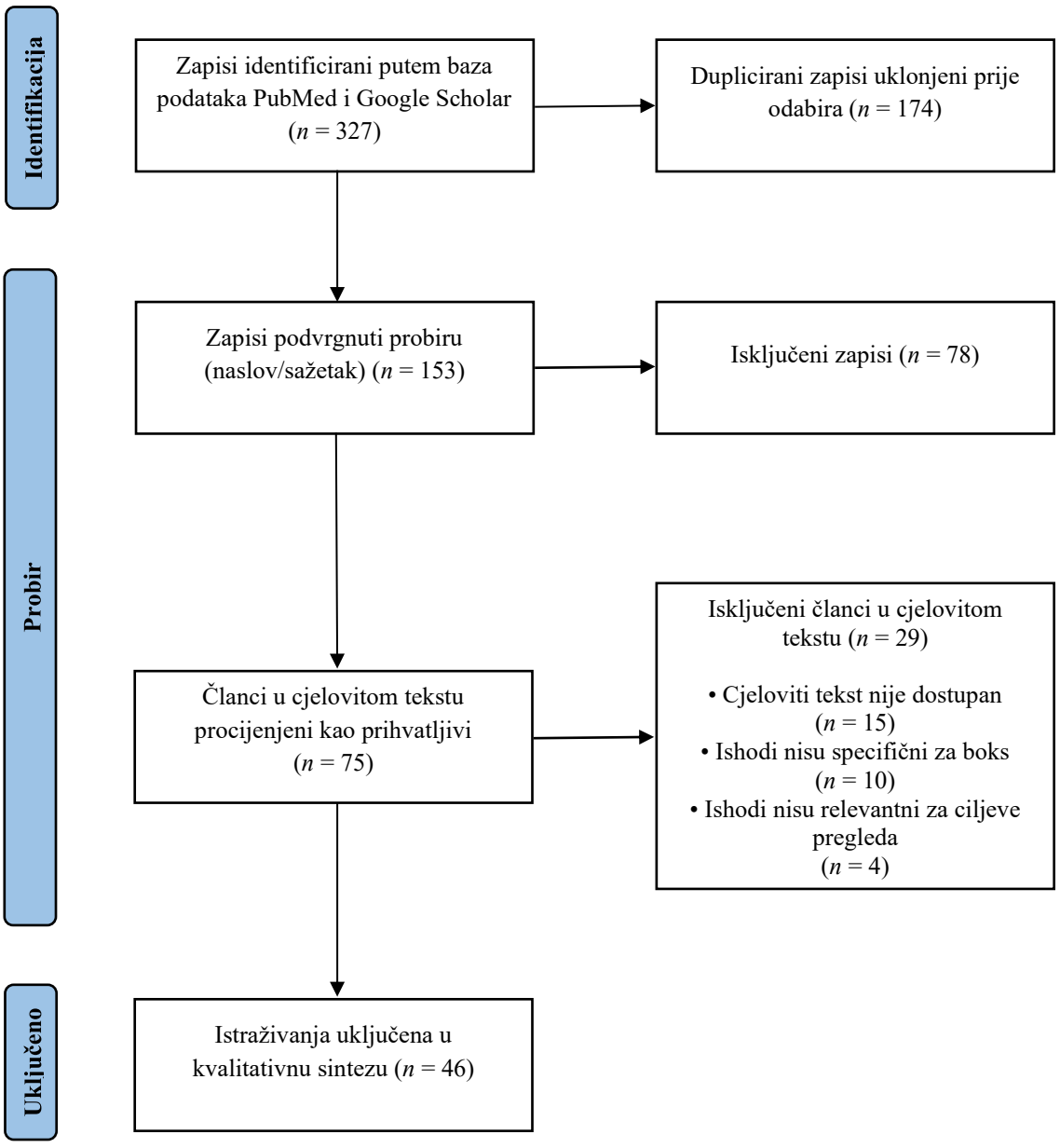
pouzdanosti, vodeći računa o ograničenoj statističkoj snazi dostupnoj za učinke između ispitanika.

Jačina odnosa procijenjenih Spearmanovim koeficijentom korelacije interpretirana je na temelju apsolutne vrijednosti ρ, pri čemu su vrijednosti < 0,30 smatrane pokazateljima slabe povezanosti, vrijednosti od 0,30 do < 0,50 pokazateljima umjerene povezanosti, a vrijednosti ≥ 0,50 pokazateljima snažne povezanosti (Cohen, 1988). Razina statističke značajnosti postavljena je na $\alpha = 0,05$. U slučajevima u kojima je bilo predviđeno više usporedbi koje pripadaju istoj inferencijalnoj obitelji, kontrola pogreške tipa I provedena je postupcima korekcije navedenima za svaku pojedinu analizu. Eksplorativne analize povezane s podskupinama interpretirane su uzimajući u obzir veličine učinka i pripadajuće intervale pouzdanosti. Za učinke ANOVA-e veličina učinka izražena je pomoću ηp^2; kada su prikazani, pripadajući 95%-tni intervali pouzdanosti dobiveni su inverzijom necentralne F-distribucije. Za jednostavne usporedbe između dviju skupina Cohenov d izračunat je korištenjem objedinjene standardne devijacije uspoređivanih skupina, a pripadajući 95%-tni interval pouzdanosti dobiven je inverzijom necentralne t-distribucije. Inferencijalne statističke analize provedene su pomoću programa IBM SPSS Statistics (verzija 32.0.0.0). Analize statističke snage provedene su pomoću programa G*Power (verzija 3.1.9.7). Prilagodbe vrijednosti p prema Holmovu i Benjamini–Hochbergovu postupku te izvedeni pokazatelji pogreške mjerenja i osjetljivosti (CV%, SEM, MDC95 i SWC) izračunati su na temelju rezultata dobivenih u SPSS-u primjenom prethodno opisanih formula i statističkih postupaka.

5 Rezultati

5.1 Faza 1 – Sustavni pregled

Proces odabira istraživanja doveo je do identifikacije istraživanja uključenih u kvalitativnu sintezu i prikazan je u dijagramu toka PRISMA 2020 (Slika 1).



Slika 1. Dijagram toka PRISMA 2020 procesa odabira istraživanja.

Pretraživanjem literature identificirano je ukupno 327 zapisa. Nakon uklanjanja 174 duplikata, 153 zapisa podvrgnuta su probiru naslova i sažetaka, pri čemu je isključeno 78

nerelevantnih radova. Preostalih 75 članaka procijenjeno je analizom cjelovitog teksta; naknadno je isključeno 29 članaka, od kojih 15 zbog nedostupnosti cjelovitog teksta, 10 zbog ishoda koji nisu bili specifični za boks i 4 zbog ishoda koji nisu bili relevantni za ciljeve pregleda. Po završetku procesa odabira, 46 istraživanja uključeno je u kvalitativnu sintezu.

Uključena istraživanja, objavljena između 2010. i 2025. godine, obuhvaćala su opservacijske dizajne, pretežno presječne, i eksperimentalne dizajne, uključujući pre–post istraživanja i istraživanja s ponovljenim mjerenjima, kao i ograničen broj studija slučaja. Uzorci su bili heterogeni s obzirom na spol, natjecateljsku razinu i dob, uz prevladavanje neelitnih i elitnih boksača muškog spola te ograničeniju zastupljenost žena i mješovitih uzoraka. Korišteni protokoli i mjerni instrumenti također su pokazivali izraženu heterogenost. Protokoli su uglavnom uključivali testove pojedinačnog maksimalnog udarca, specifične boksačke protokole s ponavljanim ili uzastopnim udarcima te specifične inkrementalne testove za boks.

Analizirani ishodi uglavnom su se odnosili na pokazatelje izvedbe udarca, fiziološke odgovore i neuromuskularne karakteristike donjih ekstremiteta. Izvedba udarca predstavljala je najčešće istraživanu domenu, dok su neuromuskularne karakteristike donjih ekstremiteta bile rjeđe ispitivane i procjenjivane su prvenstveno putem parametara eksplozivne snage dobivenih testovima skokova. Neki su dokazi ukazivali na moguće povezanosti između specifičnih parametara eksplozivne snage, poput visine skoka, sile i snage, i pokazatelja izvedbe udarca. Međutim, ograničen broj istraživanja, heterogenost korištenih testova i čest nedostatak integriranih analiza ograničavali su robusnost dostupnih zaključaka. Nadalje, nijedno od uključenih istraživanja nije izvijestilo o izravnim mjerenjima mišićno-tetivne krutosti donjih ekstremiteta u boksu.

Tablica 1. Sažetak nalaza i glavna ograničenja uključenih istraživanja.

Istraživačka domena	Varijable	Metode	Glavni nalazi	Glavna ograničenja
Izvedba udarca	Snaga udarca; brzina udarca; snaga udara; impuls; RFD; ubrzanje; efektivna masa; broj/učestalost udaraca; kumulativni ishod	Tenziometrijske platforme; instrumentirani ciljevi; boksačke lutke; boksačke vreće opremljene senzorom; akcelerometri; inercijalni senzori;	Učinkovitost udarca predstavlja najjasnije istraženo područje i analizirana je kao maksimalan učinak jednog udara i kao mehanički izlaz	Identificirana heterogenost u mjerenih varijabli, usvojenih protokola i mjernih sustava ograničavala su usporedivost različitih studija.

		sustavi videoanalize; testovi maksimalne snage jednog udarca; protokoli specifični za boks; inkrementalni testovi	tijekom opetovanih ili kontinuiranih napora tijekom udaranja. Ova dvostruka perspektiva omogućuje istovremeni opis maksimalne sposobnosti ali i performansi tijekom vremena.	Ishodi su uglavnom analizirani kao neovisne varijable te nisu integrirani u cjelovite modele, uz ograničenu integraciju s fiziološkim odgovorima i neuromuskularnim karakteristikama.
Fiziološki odgovori	Srčana frekvencija; VO_2; laktati u krvi; ocjena percipiranog napora; plućna ventilacija; respiratorna frekvencija; omjer respiratorne izmjene; mišićna oksigenacija; temperatura kože	Praćenje otkucaja srca; prijenosni ili laboratorijski metabolički analizatori; prijenosni analizatori laktata; skale percipiranog napora; protokoli specifični za boks; inkrementalni testovi; trenažne intervencije	Fiziološki odgovori prvenstveno su istraženi kao pokazatelji unutarnjeg opterećenja povezanog s protokolima specifičnim za boks. Srčana frekvencija, VO_2 i laktati u krvi najčešće su ispitivane varijable.	Prisutna jeheterogenost u korištenh varijabli, a korišteni protokoli i instrumenti imaju ograničene znanstvene dosege. Fiziološke varijable uglavnom su analizirane neovisno, a ne u izravnom odnosu s izvedbama udaranja, što ograničava razumijevanje interakcija između fiziološkog opterećenja i performansi specifičnih za boks.
Neuromuskularne karakteristike donjeg dijela tijela	Visina skoka; sila; snaga; RFD; GRF; maksimalna jakost u čučnju	Platforme za mjerenje sile; kontaktne prostirke; optoelektronički sustavi (npr. Optojump); CMJ; testovi maksimalne jakosti u čučnju (1RM).	Neuromuskularne karakteristike donjeg dijela tijela rjeđe su istražene i uglavnom su procijenjene parametrima eksplozivne snage dobivenima iz mjerenja skokova. Neki dokazi govore o potencijalnim povezanostima između odabranih varijabli (npr. visine skoka, sile, snage) te pokazateljima uspješnosti udaranja.	Ograničen broj studija, izražena heterogenost korištenih testova i česta odsutnost integriranih statističkih analiza smanjuju robusnost zaključaka. Integrirane analize između parametara eksplozivne snage i pokazatelja izvedbe udarca ostaju ograničene. Nadalje, nisu zabilježena izravna mjerenja mišićno-tetivne krutosti donjih ekstremiteta niti integrirani pristupi koji bi zajednički

				ispitivali njezine odnose s eksplozivnom snagom i pokazateljima izvedbe udarca.

Napomena. CMJ = skok s pripremnim pokretom (engl. *Countermovement Jump*); GRF = sila reakcije podloge (engl. *Ground Reaction Force*); 1RM = maksimum jednog ponavljanja (engl. *One-Repetition Maximum*); RFD = stopa razvoja sile (engl. *Rate of Force Development*); VO_2 = potrošnja kisika (engl. *Oxygen Uptake*).

Sumarno, kvalitativna sinteza ukazala je na fragmentiran metodološki okvir, obilježen izraženom heterogenošću dizajna istraživanja, karakteristika uzoraka, eksperimentalnih protokola, mjernih instrumenata i analiziranih ishoda. Pokazatelji izvedbe udarca predstavljali su najčešće istraživanu domenu, ali su pretežno analizirani odvojeno od ostalih komponenti izvedbe. Slično tome, fiziološki odgovori proučavani su prvenstveno kao pokazatelji unutarnjeg opterećenja povezanog s protokolima specifičnima za boks te su uglavnom analizirani zasebno, umjesto u izravnom odnosu s pokazateljima izvedbe udarca.

Neuromuskularne karakteristike donjih ekstremiteta bile su rjeđe istraživane i procjenjivane su pretežno putem specifičnih parametara eksplozivne snage. Iako su neki dokazi upućivali na moguće povezanosti između specifičnih parametara eksplozivne snage i pokazatelja izvedbe udarca, ti su odnosi ispitani u ograničenom broju istraživanja i često bez integriranih analiza. Nadalje, nijedno od uključenih istraživanja nije izravno procijenilo mišićno-tetivnu krutost donjih ekstremiteta u boksu.

U cjelini sustavni pregled stoga je ukazao na ograničenu integraciju između pokazatelja izvedbe udarca, fizioloških odgovora i neuromuskularnih karakteristika donjih ekstremiteta, identificirajući potrebu za integriranim metodološkim pristupima koji omogućuju zajedničko ispitivanje tih komponenti sportske izvedbe u boksu.

5.2 Faza 2 – Pilot - istraživanje

Pilot-faza uključivala je 20 boksača kod kojih su analizirani mehanički intenzitet uzastopnih udaraca i fiziološki odgovori tijekom RPAT-a te je provedena preliminarna metodološka karakterizacija protokola. Rezultati koji se odnose na uzorak stvarno uključen u pilot-fazu

prikazani su u nastavku, uz odvojeni prikaz ishoda zabilježenih tijekom RPAT-a i njegove preliminarne metodološke karakterizacije.

5.2.1 Rezultati RPAT-a

Deskriptivne vrijednosti srednjeg *Intensity Score*-a (ISmean), srednje srčane frekvencije (HRmean) i srednje potrošnje kisika (VO_2mean) zabilježene tijekom triju rundi RPAT-a kod 20 sudionika pilot-faze prikazane su u tablici 2. ISmean pokazao je progresivno smanjenje od prve do treće runde u svim podskupinama, dok su se HRmean i VO_2mean povećale prvenstveno između prve i druge runde, nakon čega su pokazale manje izražene promjene.

Tablica 2. Mehanički intenzitet udarca i fiziološki odgovori tijekom RPAT-a u pilot-uzorku (n = 20).

Grupa	Spol	ISmean			HRmean			VO_2mean		
		R1	R2	R3	R1	R2	R3	R1	R2	R3
Neelitni	Ž	132,20 ± 21,10	83,55 ± 12,48	74,78 ± 12,08	155,76 ± 12,08	177,51 ± 10,67	173,53 ± 10,13	34,86 ± 6,62	42,64 ± 6,16	41,19 ± 5,20
Neelitni	M	198,20 ± 31,73	103,05 ± 26,83	87,95 ± 23,29	160,09 ± 10,04	180,31 ± 9,38	178,74 ± 5,53	36,73 ± 4,63	44,04 ± 3,07	42,77 ± 4,12
Elitni	Ž	154,98 ± 25,02	108,56 ± 17,22	105,71 ± 16,61	151,13 ± 11,23	167,38 ± 9,61	170,47 ± 9,69	35,71 ± 6,62	45,90 ± 6,48	47,33 ± 5,87
Elitni	M	227,95 ± 36,85	128,07 ± 33,27	117,33 ± 30,45	156,80 ± 9,57	173,21 ± 8,69	176,42 ± 5,09	37,71 ± 4,70	46,96 ± 3,16	47,48 ± 4,45

Napomena. Podaci su prikazani kao srednja vrijednost ± SD. RPAT = test sposobnosti ponavljanja udaraca (engl. *Repeated Punch Ability Test*); ISmean = srednji Intensity Score (kompozitni indeks izveden iz inercijskih podataka); HRmean = srednja srčana frekvencija (otkucaja·min^{-1}); VO_2mean = srednja potrošnja kisika (mL·kg^{-1}·min^{-1}); R1–R3 = runde 1–3; Ž = žene; M = muškarci.

U pilot-uzorku (n = 20), mješovita ANOVA za ponovljena mjerenja pokazala je značajan učinak runde na ISmean, $F(2, 32) = 349{,}16$, $p < 0{,}001$, $\eta_p^2 = 0{,}956$. Također je utvrđena značajna interakcija Runda × Spol, $F(2, 32) = 42{,}06$, $p < 0{,}001$, $\eta p^2 = 0{,}724$, dok interakcije Runda × Natjecateljska razina i Runda × Spol × Natjecateljska razina nisu bile značajne ($p > 0{,}05$). Bonferronijevom korekcijom prilagođene usporedbe u parovima pokazale su smanjenje ISmean od prve do druge runde ($\Delta = 72{,}53$, $p < 0{,}001$), od druge do treće runde ($\Delta = 9{,}36$, $p = 0{,}006$) te od prve do treće runde ($\Delta = 81{,}89$, $p < 0{,}001$). U analizi interakcije Runda × Spol, razlika između muškaraca i žena bila je značajna u prvoj rundi ($\Delta = 69{,}49$, $p < 0{,}001$), ali ne i u drugoj ili trećoj rundi nakon korekcije za višestruke usporedbe.

Za HRmean utvrđen je značajan učinak runde, $F(2, 32) = 201{,}05$, $p < 0{,}001$, $\eta p^2 = 0{,}926$, zajedno sa značajnom interakcijom Runda × Natjecateljska razina, $F(2, 32) = 4{,}17$, $p = 0{,}025$, $\eta p^2 = 0{,}207$. Interakcije Runda × Spol i Runda × Spol × Natjecateljska razina nisu bile značajne. HRmean se značajno povećala od prve do druge runde ($\Delta = -18{,}66$ otkucaja·min^{-1}, $p < 0{,}001$) i od prve do treće runde ($\Delta = -18{,}85$ otkucaja·min^{-1}, $p < 0{,}001$), dok između druge i treće runde nije utvrđena razlika ($p = 1{,}000$). Unatoč interakciji Runda × Natjecateljska razina, nijedna usporedba između elitnih i neelitnih boksača unutar pojedinačnih rundi nije ostala značajna nakon Bonferronijeve korekcije.

I za VO_2mean utvrđen je značajan učinak runde, $F(2, 32) = 89{,}83$, $p < 0{,}001$, $\eta p^2 = 0{,}849$, kao i značajna interakcija Runda × Natjecateljska razina, $F(2, 32) = 4{,}70$, $p = 0{,}016$, $\eta p^2 = 0{,}227$. Interakcije Runda × Spol i Runda × Spol × Natjecateljska razina nisu bile značajne. Vrijednost VO_2mean značajno se povećala od prve do druge runde ($\Delta = -8{,}63$ mL·kg^{-1}·min^{-1}, $p < 0{,}001$) i od prve do treće runde ($\Delta = -8{,}44$ mL·kg^{-1}·min^{-1}, $p < 0{,}001$), bez razlika između druge i treće runde ($p = 1{,}000$). U jednostavnim usporedbama između natjecateljskih razina nijedna razlika unutar pojedinačnih rundi nije ostala značajna nakon Bonferronijeve korekcije.

Spearmanove korelacije između ISmean i fizioloških odgovora nisu pokazale značajne povezanosti u prve dvije runde nakon Holmove korekcije. U trećoj rundi ISmean je pokazao umjerenu pozitivnu korelaciju s VO_2mean ($\rho = 0{,}549$, korigirani $p = 0{,}024$), dok korelacija s HRmean nije bila značajna ($\rho = -0{,}359$, korigirani $p = 0{,}120$).

5.2.2 Preliminarna metodološka karakterizacija RPAT-a

U pilot-uzorku ($n = 20$), test–retest pouzdanost devet varijabli RPAT-a specifičnih za pojedine runde bila je visoka, s vrijednostima ICC-a u rasponu od 0,921 do 0,982. Vrijednosti CV% kretale su se od 3,55% do 6,37% za ISmean, od 1,48% do 1,59% za HRmean te od 2,87% do 3,20% za VO_2mean. Procjene pogreške mjerenja i osjetljivosti

prikazane su u tablici 3. Usporedba SEM-a i SWC-a pokazala je SEM < SWC za ISmean u rundama 2 i 3 te za VO_2mean u rundi 1, dok je za ostale ishode SEM bio veći od SWC-a.

Tablica 3. Test–retest pouzdanost, pogreška mjerenja i osjetljivost ishoda RPAT-a u pilot-uzorku (n = 20).

Varijabla	Runda	ICC	95% CI	CV (%)	SEM	MDC95	SWC
ISmean	R1	0,938	0,852–0,975	6,37	12,07	33,46	9,34
ISmean	R2	0,982	0,955–0,993	3,55	3,81	10,55	5,46
ISmean	R3	0,971	0,928–0,988	4,48	4,35	12,06	5,21
HRmean	R1	0,958	0,898–0,983	1,48	2,27	6,30	2,08
HRmean	R2	0,950	0,880–0,980	1,52	2,60	7,20	2,03
HRmean	R3	0,921	0,812–0,968	1,59	2,70	7,48	1,59
VO_2mean	R1	0,963	0,911–0,985	2,87	1,05	2,91	1,07
VO_2mean	R2	0,928	0,825–0,971	3,04	1,30	3,59	0,98
VO_2mean	R3	0,946	0,869–0,978	3,20	1,40	3,87	1,07

Napomena. ICC = koeficijent intraklasne korelacije, dvosmjerni model mješovitih učinaka, apsolutno slaganje, pojedinačno mjerenje; CI = interval pouzdanosti; CV = koeficijent varijacije; SEM = standardna pogreška mjerenja; MDC95 = minimalna detektabilna promjena pri 95%-tnoj razini pouzdanosti; SWC = najmanja relevantna promjena; ISmean = srednji Intensity Score (kompozitni indeks izveden iz inercijskih podataka); HRmean = srednja srčana frekvencija (otkucaja·min^{-1}); VO_2mean = srednja potrošnja kisika (mL·kg^{-1}·min^{-1}); R1–R3 = runde 1–3. SEM, MDC95 i SWC izraženi su u mjernim jedinicama odgovarajućeg ishoda.

5.3 Faza 3 – Glavno eksperimentalno istraživanje

Glavno eksperimentalno istraživanje uključivalo je 40 boksača, ravnomjerno raspoređenih prema natjecateljskoj razini i spolu: 20 elitnih i 20 neelitnih sportaša, od kojih je bilo 20 muškaraca i 20 žena. Svaka kombinacija natjecateljske razine i spola obuhvaćala je 10 sudionika.

5.3.1 Karakteristike uzorka

U ukupnom uzorku prosječna dob iznosila je 24,78 ± 3,68 godina, dok je trenažni staž iznosio 7,78 ± 2,11 godina.

Za dob je dvosmjerna ANOVA pokazala značajan učinak natjecateljske razine, $F(1, 36) = 7,06$, $p = 0,012$, $\eta_p^2 = 0,164$. Nasuprot tome, učinak spola, $F(1, 36) = 1,40$, $p = 0,245$, kao ni interakcija Spol × Natjecateljska razina, $F(1, 36) = 0,34$, $p = 0,564$, nisu bili značajni.

I za trenažni staž utvrđen je značajan učinak natjecateljske razine, $F(1, 36) = 6,81$, $p = 0,013$, $\eta_p^2 = 0,159$. Učinak spola, $F(1, 36) = 0,16$, $p = 0,695$, kao ni interakcija Spol × Natjecateljska razina, $F(1, 36) = 0,31$, $p = 0,583$, nisu bili značajni.

Deskriptivne karakteristike uzorka, stratificirane prema natjecateljskoj razini i spolu, prikazane su u tablici 4.

Tablica 4. Karakteristike sudionika u glavnom eksperimentalnom istraživanju (n = 40).

Grupa	Spol	Dob (god)	Visina (cm)	Masa (kg)	BMI (kg·m⁻²)	Trenažni staž (god)
Neelitni	Ž	24,30 ± 2,96	166,75 ± 6,07	60,95 ± 7,17	21,91 ± 2,24	6,90 ± 1,10
Neelitni	M	22,38 ± 3,30	173,72 ± 8,84	68,01 ± 17,84	22,26 ± 4,25	7,00 ± 0,94
Elitni	Ž	26,55 ± 4,12	166,85 ± 6,30	61,80 ± 7,16	22,21 ± 2,39	8,90 ± 2,85
Elitni	M	25,90 ± 3,23	174,70 ± 8,82	71,00 ± 11,52	23,12 ± 1,94	8,30 ± 2,41

Napomena. Podaci su prikazani kao srednja vrijednost ± SD. BMI = indeks tjelesne mase; Ž = žene; M = muškarci.

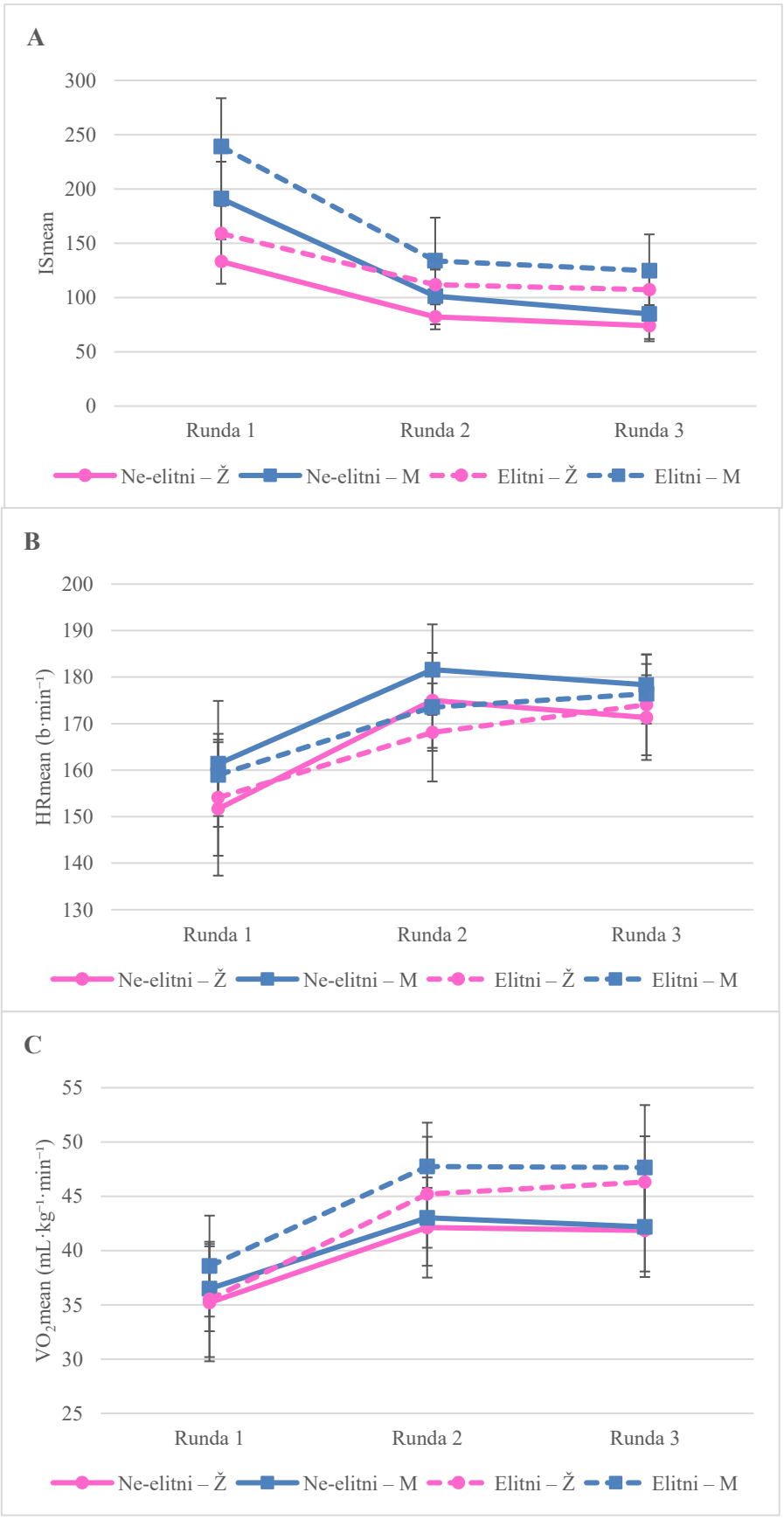
5.3.2 H1 – Tijek mehaničkog intenziteta uzastopnih udaraca i fizioloških odgovora tijekom rundi RPAT-a

U ukupnom uzorku (n = 40), mješovita ANOVA za ponovljena mjerenja pokazala je značajan učinak runde na ISmean, $F(2, 72) = 372,45$, $p < 0,001$, $\eta_p^2 = 0,912$. Bonferronijevom korekcijom prilagođene usporedbe u parovima pokazale su značajno smanjenje ISmean od prve do druge runde ($\Delta = 73,27$, $p < 0,001$), od druge do treće runde ($\Delta = 9,57$, $p = 0,007$) te od prve do treće runde ($\Delta = 82,84$, $p < 0,001$).

Za HRmean utvrđen je značajan učinak runde, $F(2, 72) = 174,90$, $p < 0,001$, $\eta_p^2 = 0,829$. HRmean se značajno povećala od prve do druge runde ($\Delta = -18,04$ otkucaja·min^{-1}, $p < 0,001$) i od prve do treće runde ($\Delta = -18,50$ otkucaja·min^{-1}, $p < 0,001$), dok između druge i treće runde nije utvrđena značajna razlika ($\Delta = -0,46$ otkucaja·min^{-1}, $p = 1,000$).

Za VO_2mean test sferičnosti ukazao je na narušavanje pretpostavke; stoga su prikazani rezultati uz Greenhouse–Geisserovu korekciju. Utvrđen je značajan učinak runde, $F(1{,}684, 60{,}614) = 117{,}65$, $p < 0{,}001$, $\eta_p^2 = 0{,}766$. Vrijednost VO_2mean značajno se povećala od prve do druge runde ($\Delta = -8{,}08$ mL·kg^{-1}·min^{-1}, $p < 0{,}001$) i od prve do treće runde ($\Delta = -8{,}06$ mL·kg^{-1}·min^{-1}, $p < 0{,}001$), dok između druge i treće runde nije utvrđena značajna razlika ($\Delta = 0{,}02$ mL·kg^{-1}·min^{-1}, $p = 1{,}000$).

Rezultati stoga pokazuju izraženo smanjenje ISmean, pokazatelja mehaničkog intenziteta uzastopnih udaraca tijekom RPAT-a, praćeno povećanjem HRmean i VO_2mean pretežno između prve i druge runde. Deskriptivna kretanja ISmean, HRmean i VO_2mean tijekom triju rundi RPAT-a, stratificirana prema spolu i natjecateljskoj razini, prikazana su na slici 2, dok su odgovarajuće deskriptivne vrijednosti prikazane u Tablici 5.


A
300
250
200
150
100
50
0
ISmean
Runda 1
Runda 2
Runda 3
Ne-elitni – Ž
Ne-elitni – M
Elitni – Ž
Elitni – M
B
200
190
180
170
160
150
140
130
HRmean (b·min⁻¹)
Runda 1
Runda 2
Runda 3
Ne-elitni – Ž
Ne-elitni – M
Elitni – Ž
Elitni – M
C
55
50
45
40
35
30
25
VO2mean (mL·kg⁻¹·min⁻¹)
Runda 1
Runda 2
Runda 3
Ne-elitni – Ž
Ne-elitni – M
Elitni – Ž
Elitni – M

Slika 2. Mehanički intenzitet udarca i fiziološki odgovori tijekom rundi RPAT-a prema spolu i natjecateljskoj razini u glavnom eksperimentalnom istraživanju (n = 40).

Napomena. Podaci su prikazani kao srednja vrijednost ± SD. Panel A prikazuje srednji Intensity Score; Panel B prikazuje srednju srčanu frekvenciju; panel C prikazuje srednju potrošnju kisika. RPAT = test sposobnosti ponavljanja udaraca; SD = standardna devijacija; Ž = žene; M = muškarci.

Tablica 5. Mehanički intenzitet udarca i fiziološki odgovori tijekom RPAT-a u glavnom eksperimentalnom istraživanju (n = 40).

Grupa	Spol	ISmean			HRmean			VO_2mean		
		R1	R2	R3	R1	R2	R3	R1	R2	R3
Neelitni	Ž	133,16 ± 20,51	82,18 ± 11,46	73,99 ± 12,18	151,67 ± 14,33	175,00 ± 10,21	171,30 ± 9,11	35,20 ± 5,40	42,12 ± 4,61	41,85 ± 4,29
Neelitni	M	191,07 ± 34,03	101,18 ± 25,82	84,87 ± 25,18	161,36 ± 13,53	181,61 ± 9,73	178,32 ± 6,48	36,48 ± 3,91	43,02 ± 2,76	42,18 ± 4,11
Elitni	Ž	158,86 ± 25,46	111,86 ± 13,85	107,20 ± 14,15	154,08 ± 12,47	168,11 ± 10,55	174,06 ± 10,86	35,50 ± 5,31	45,19 ± 6,59	46,31 ± 4,22
Elitni	M	239,00 ± 44,57	133,78 ± 39,81	124,67 ± 33,47	158,98 ± 8,83	173,55 ± 9,41	176,41 ± 6,41	38,57 ± 4,65	47,74 ± 2,74	47,65 ± 5,75

Napomena. Podaci su prikazani kao srednja vrijednost ± SD. RPAT = test sposobnosti ponavljanja udaraca; ISmean = srednji Intensity Score (kompozitni indeks izveden iz inercijskih podataka); HRmean = srednja srčana frekvencija (otkucaja·min^{-1}); VO_2mean = srednja potrošnja kisika (mL·kg^{-1}·min^{-1}); R1–R3 = runde 1–3; Ž = žene; M = muškarci.

5.3.3 H2 – Odnosi između mehaničkog intenziteta uzastopnih udaraca i fizioloških odgovora

Nekorigirane Spearmanove korelacije između ISmean i fizioloških odgovora pokazale su različite obrasce tijekom triju rundi RPAT-a. U prvoj rundi ISmean nije bio značajno povezan s HRmean ($\rho = -0{,}098$, pHolm = 0,545), dok je utvrđena umjerena pozitivna korelacija s VO_2mean ($\rho = 0{,}478$, pHolm = 0,004). U drugoj rundi ISmean je pokazao umjerenu negativnu korelaciju s HRmean ($\rho = -0{,}343$, pHolm = 0,038) i umjerenu pozitivnu korelaciju s VO_2mean ($\rho = 0{,}369$, pHolm = 0,038). U trećoj rundi povezanost između ISmean i HRmean nije bila značajna ($\rho = -0{,}215$, pHolm = 0,182), dok je utvrđena snažna pozitivna korelacija između ISmean i VO_2mean ($\rho = 0{,}662$, pHolm < 0,001) (Tablica 6). Kada se, kao analiza osjetljivosti, šest nekorigiranih korelacija obuhvaćenih hipotezom H2 promatralo kao jedna inferencijalna obitelj za Holmovu korekciju, povezanosti utvrđene u drugoj rundi nisu zadržale statističku značajnost (ISmean–HRmean: pHolm = 0,091; ISmean–VO_2mean: pHolm = 0,077).

U parcijalnim Spearmanovim analizama prilagođenima za spol i natjecateljsku razinu, u prvoj rundi ISmean bio je negativno povezan s HRmean ($\rho_{parcijalni} = -0{,}486$, p = 0,002) i

pozitivno povezan s VO_2mean (ρparcijalni = 0,503, p = 0,001). U drugoj rundi odgovarajuće povezanosti iznosile su ρparcijalni = −0,339 (p = 0,038) za HRmean i ρparcijalni = 0,130 (p = 0,436) za VO_2mean. U trećoj rundi ISmean bio je negativno povezan s HRmean (ρparcijalni = −0,403, p = 0,012) i pozitivno povezan s VO_2mean (ρparcijalni = 0,541, p < 0,001) (Tablica 7). Nakon Holmove korekcije primijenjene zasebno na dvije povezanosti unutar svake runde, povezanosti u prvoj rundi ostale su statistički značajne (ISmean–HRmean: pHolm = 0,003; ISmean–VO_2mean: pHolm = 0,003), dok u drugoj rundi nijedna od dviju povezanosti nije zadržala statističku značajnost (pHolm = 0,075 odnosno 0,436). U trećoj rundi obje su povezanosti ostale statistički značajne (ISmean–HRmean: pHolm = 0,012; ISmean–VO_2mean: pHolm < 0,001). Kada se konzervativnije šest parcijalnih korelacija promatralo kao jedna inferencijalna obitelj, povezanosti u prvoj rundi (ISmean–HRmean: pHolm = 0,008; ISmean–VO_2mean: pHolm = 0,006) i trećoj rundi (ISmean–HRmean: pHolm = 0,036; ISmean–VO_2mean: pHolm = 0,003) ostale su statistički značajne, dok povezanosti u drugoj rundi nisu bile statistički značajne (ISmean–HRmean: pHolm = 0,075; ISmean–VO_2mean: pHolm = 0,436).

Analize osjetljivosti s dodatnom prilagodbom, zasebno za dob ili trenažni staž, pokazale su parcijalne koeficijente koji su u osnovi bili u skladu s onima iz glavnog modela. Uz dodatnu prilagodbu za dob, koeficijenti ρparcijalni za ISmean–HRmean i ISmean–VO_2mean iznosili su redom −0,483 i 0,505 u prvoj rundi, −0,337 i 0,146 u drugoj rundi te −0,425 i 0,533 u trećoj rundi. Uz dodatnu prilagodbu za trenažni staž, odgovarajući koeficijenti iznosili su −0,480 i 0,460 u prvoj rundi, −0,333 i 0,097 u drugoj rundi te −0,407 i 0,515 u trećoj rundi. U cjelini, veličina i smjer povezanosti iz glavnog modela nisu se bitno promijenili nakon dodatne prilagodbe za ove kovarijate.

U eksplorativnoj analizi provedenoj na individualnim srednjim vrijednostima triju rundi, model višestruke linearne regresije koji je uključivao HRmean i VO_2mean kao prediktore ISmean bio je značajan, $F(2, 37) = 10,58$, $p < 0,001$, $R^2 = 0,364$, prilagođeni $R^2 = 0,329$. Vrijednost VO_2mean bila je pozitivno povezana s ISmean (B = 4,469, SE = 1,038, t = 4,306, p < 0,001, 95% CI [2,366, 6,572]), dok vrijednost HRmean nije pokazala značajnu povezanost (B = −0,445, SE = 0,463, t = −0,961, p = 0,343, 95% CI [−1,383, 0,493]).

Tablica 6. Nekorigirane povezanosti između mehaničkog intenziteta udarca i fizioloških odgovora tijekom rundi RPAT-a u glavnom eksperimentalnom istraživanju (n = 40).

Runda	Varijable	ρ	p	Holm-korigirani p
R1	ISmean – HRmean	−0,098	0,545	0,545
R1	ISmean – VO_2mean	0,478	0,002	0,004
R2	ISmean – HRmean	−0,343	0,030	0,038
R2	ISmean – VO_2mean	0,369	0,019	0,038
R3	ISmean – HRmean	−0,215	0,182	0,182
R3	ISmean – VO_2mean	0,662	< 0,001	< 0,001

Napomena. ρ = Spearmanov koeficijent korelacije ranga; p = nekorigirana p-vrijednost; pHolm = p-vrijednost prilagođena sekvencijalnim Holmovim postupkom; RPAT = test sposobnosti ponavljanja udaraca; ISmean = srednji Intensity Score (kompozitni indeks izveden iz inercijskih podataka); HRmean = srednja srčana frekvencija (otkucaja·min⁻¹); VO_2mean = srednja potrošnja kisika (mL·kg⁻¹·min⁻¹); R1–R3 = runde 1–3. Holmov postupak prilagodbe primijenjen je zasebno unutar svake runde na dvije korelacije između ISmean i fizioloških ishoda.

Tablica 7. Povezanosti između mehaničkog intenziteta udarca i fizioloških odgovora tijekom rundi RPAT-a, prilagođene za spol i natjecateljsku razinu, u glavnom eksperimentalnom istraživanju (n = 40).

Runda	Varijable	Parcijalni ρ	Nekorigirani p	Holm-korigirani p
R1	ISmean – HRmean	−0,486	0,002	0,003
R1	ISmean – VO_2mean	0,503	0,001	0,003
R2	ISmean – HRmean	−0,339	0,038	0,075
R2	ISmean – VO_2mean	0,130	0,436	0,436
R3	ISmean – HRmean	−0,403	0,012	0,012
R3	ISmean – VO_2mean	0,541	< 0,001	< 0,001

Napomena. Parcijalni ρ = parcijalni Spearmanov koeficijent korelacije ranga prilagođen za spol i natjecateljsku razinu; p = nekorigirana p-vrijednost; pHolm = p-vrijednost prilagođena sekvencijalnim Holmovim postupkom; RPAT = test sposobnosti ponavljanja udaraca; ISmean = srednji Intensity Score (kompozitni indeks izveden iz inercijskih podataka); HRmean = srednja srčana frekvencija (otkucaja·min⁻¹); VO_2mean = srednja potrošnja kisika (mL·kg⁻¹·min⁻¹); R1–R3 = runde 1–3. Holmov postupak prilagodbe primijenjen je zasebno unutar svake runde na dvije parcijalne korelacije između ISmean i fizioloških ishoda.

5.3.4 H3 – Razlike s obzirom na natjecateljsku razinu i spol

Za ISmean utvrđen je značajan učinak spola, $F(1, 36) = 20,10$, $p < 0,001$, $\eta_p^2 = 0,358$, 95% CI [0,123, 0,553], i natjecateljske razine, $F(1, 36) = 20,41$, $p < 0,001$, $\eta_p^2 = 0,362$, 95% CI [0,126, 0,556], dok interakcija Spol × Natjecateljska razina nije bila značajna, $F(1, 36) = 0,47$, $p = 0,497$. Također je utvrđena značajna interakcija Runda × Spol, $F(2, 72) = 40,86$, $p < 0,001$, $\eta_p^2 = 0,532$, 95% CI [0,370, 0,644], dok interakcije Runda × Natjecateljska razina ($p = 0,632$) i Runda × Spol × Natjecateljska razina ($p = 0,310$) nisu bile značajne. Jednostavne usporedbe prilagođene Bonferronijevom korekcijom pokazale su više vrijednosti ISmean kod muškaraca u odnosu na žene u prvoj rundi ($\Delta = 69,03$, $p < 0,001$, $d = 1,85$, 95% CI [1,10, 2,59]) i drugoj rundi ($\Delta = 20,45$, $p = 0,046$, $d = 0,70$, 95% CI [0,05,

1,33]), dok razlika u trećoj rundi nije bila značajna nakon korekcije (Δ = 14,17, p = 0,175, d = 0,49, 95% CI [−0,15, 1,11]).

Za HRmean, ni učinak spola, F(1, 36) = 3,92, p = 0,055, ni učinak natjecateljske razine, F(1, 36) = 0,60, p = 0,444, kao ni interakcija Spol × Natjecateljska razina, F(1, 36) = 0,34, p = 0,563, nisu bili značajni. Međutim, utvrđena je značajna interakcija Runda × Natjecateljska razina, F(2, 72) = 7,77, p < 0,001, η_p^2 = 0,177, 95% CI [0,037, 0,325]. Interakcije Runda × Spol i Runda × Spol × Natjecateljska razina nisu bile značajne (p > 0,05). U jednostavnim usporedbama između natjecateljskih razina nijedna razlika unutar pojedinačnih rundi nije ostala značajna nakon Bonferronijeve korekcije (sve vrijednosti p ≥ 0,070).

Za VO_2mean utvrđen je značajan učinak natjecateljske razine, F(1, 36) = 6,70, p = 0,014, η_p^2 = 0,157, 95% CI [0,007, 0,372], dok učinak spola, F(1, 36) = 1,48, p = 0,231, kao ni interakcija Spol × Natjecateljska razina, F(1, 36) = 0,33, p = 0,571, nisu bili značajni. S obzirom na narušavanje pretpostavke sferičnosti, za učinke unutar ispitanika prikazani su rezultati korigirani prema Greenhouse–Geisseru. Interakcija Runda × Natjecateljska razina bila je značajna, F(1,684, 60,614) = 5,11, p = 0,013, η_p^2 = 0,124, 95% CI [0,006, 0,281], dok interakcije Runda × Spol i Runda × Spol × Natjecateljska razina nisu bile značajne (p > 0,05). U jednostavnim usporedbama elitni sportaši pokazali su više vrijednosti VO_2mean od neelitnih sportaša u drugoj rundi (Δ = 3,89 $mL \cdot kg^{-1} \cdot min^{-1}$, p = 0,027, d = 0,87, 95% CI [0,22, 1,52]) i trećoj rundi (Δ = 4,96 $mL \cdot kg^{-1} \cdot min^{-1}$, p = 0,005, d = 1,09, 95% CI [0,42, 1,75]), dok u prvoj rundi nije utvrđena značajna razlika (p = 1,000).

5.3.5 Metodološka karakterizacija RPAT-a u ukupnom uzorku

U ukupnom uzorku (n = 40), test–retest pouzdanost devet varijabli RPAT-a specifičnih za pojedine runde bila je visoka, s vrijednostima ICC-a u rasponu od 0,909 do 0,980. Za ISmean vrijednosti ICC-a kretale su se od 0,964 do 0,980; za HRmean od 0,909 do 0,974; a za VO_2mean od 0,929 do 0,954.

Procjene pogreške mjerenja i osjetljivosti prikazane su u tablici 8. Usporedba SEM-a i SWC-a pokazala je SEM < SWC za ISmean u sve tri runde te za HRmean u prvoj rundi. Za

HRmean u rundama 2 i 3 te za VO_2mean u sve tri runde, SEM je bio veći od SWC-a. Međutim, za ISmean MDC_{95} je bio veći od SWC-a u sve tri runde.

Analiza sustavne pogreške test–retest nije pokazala značajne sustavne razlike ni za jednu od devet varijabli RPAT-a specifičnih za pojedine runde (sve vrijednosti $p > 0,05$), pri čemu su 95%-tni intervali pouzdanosti srednjih razlika u svim slučajevima obuhvaćali nulu.

Tablica 8. Test–retest pouzdanost, pogreška mjerenja i osjetljivost ishoda RPAT-a u glavnom eksperimentalnom istraživanju (n = 40).

Varijabla	Runda	ICC	95% CI	CV (%)	SEM	MDC95	SWC
ISmean	R1	0,964	0,932–0,981	5,64	9,74	27,00	10,15
ISmean	R2	0,980	0,964–0,990	4,02	4,36	12,07	6,17
ISmean	R3	0,975	0,951–0,987	6,21	4,60	12,74	5,94
HRmean	R1	0,974	0,952–0,986	1,39	2,12	5,88	2,52
HRmean	R2	0,944	0,897–0,970	1,62	2,77	7,67	2,15
HRmean	R3	0,909	0,835–0,951	1,65	2,82	7,83	1,70
VO_2mean	R1	0,954	0,914–0,976	2,88	1,05	2,90	0,97
VO_2mean	R2	0,929	0,871–0,962	3,06	1,33	3,69	0,96
VO_2mean	R3	0,947	0,904–0,972	3,03	1,25	3,48	1,03

Napomena. ICC = koeficijent intraklasne korelacije, dvosmjerni model mješovitih učinaka, apsolutno slaganje, pojedinačno mjerenje; CI = interval pouzdanosti; CV = koeficijent varijacije; SEM = standardna pogreška mjerenja; MDC95 = minimalna detektabilna promjena pri 95%-tnoj razini pouzdanosti; SWC = najmanja relevantna promjena; ISmean = srednji Intensity Score (kompozitni indeks izveden iz inercijskih podataka); HRmean = srednja srčana frekvencija (otkucaja·min^{-1}); VO_2mean = srednja potrošnja kisika (mL·kg^{-1}·min^{-1}); R1–R3 = runde 1–3. SEM, MDC95 i SWC izraženi su u mjernim jedinicama odgovarajućeg ishoda.

U okviru progresivne metodološke karakterizacije RPAT-a, specifičnost zadatka za boks i standardizacija eksperimentalnih uvjeta smatrane su preliminarnim elementima koji se odnose na sadržajnu valjanost protokola. Nadalje, razlike u ISmean utvrđene s obzirom na natjecateljsku razinu, prikazane u odjeljku 5.3.4, pružile su preliminarne dokaze diskriminativnog karaktera u prilog konstruktnoj valjanosti. Ti su dokazi specifični i preliminarni te ne predstavljaju sveobuhvatnu validaciju RPAT-a.

5.3.6 Pouzdanost mišićno-tetivne krutosti u statičkim uvjetima dominantnog donjeg ekstremiteta

U ukupnom uzorku (n = 40), test–retest pouzdanost mišićno-tetivne krutosti u statičkim uvjetima dominantnog donjeg ekstremiteta bila je visoka u pet procijenjenih anatomskih regija. Vrijednosti ICC-a kretale su se od 0,869 za Ahilovu tetivu do 0,985 za lateralni široki mišić. Vrijednosti CV% kretale su se od 2,14% do 6,60%. Procjene pogreške mjerenja, izražene putem SEM-a i MDC95, prikazane su u tablici 9.

Konkretno, Ahilova tetiva pokazala je ICC = 0,869 (95% CI [0,768, 0,928]), dok su za lateralni gastroknemijus, patelarnu tetivu, ravni bedreni mišić i lateralni široki mišić vrijednosti ICC-a bile u rasponu od 0,973 do 0,985.

Tablica 9. Test–retest pouzdanost i pogreška mjerenja mišićno-tetivne krutosti u statičkim uvjetima u glavnom eksperimentalnom istraživanju (n = 40).

Anatomska regija	ICC	95% CI	CV (%)	SEM (N/m)	MDC95 (N/m)
Ahilova tetiva	0,869	0,768–0,928	6,60	88,43	245,12
Lateralni gastroknemijus	0,977	0,957–0,988	3,08	12,05	33,40
Patelarna tetiva	0,973	0,951–0,986	3,84	36,70	101,72
Ravni bedreni mišić	0,974	0,951–0,986	2,14	7,69	21,31
Lateralni široki mišić	0,985	0,971–0,992	3,23	15,88	44,02

Napomena. ICC = koeficijent intraklasne korelacije, dvosmjerni model mješovitih učinaka, apsolutno slaganje, pojedinačno mjerenje; CI = interval pouzdanosti; CV = koeficijent varijacije; SEM = standardna pogreška mjerenja; MDC95 = minimalna detektabilna promjena pri 95%-tnoj razini pouzdanosti. SEM i MDC95 izraženi su u N/m.

5.3.7 H4 – Odnosi između neuromuskularnih karakteristika donjih ekstremiteta i mehaničkog intenziteta pojedinačnog udarca

U ukupnom uzorku glavnog istraživanja (n = 40) ispitane su 222 međudomenske povezanosti između mišićno-tetivne krutosti u statičkim uvjetima dominantnog donjeg ekstremiteta, parametara dobivenih testovima skokova i pokazatelja mehaničkog intenziteta pojedinačnog udarca. Nakon Benjamini–Hochbergove korekcije primijenjene na obitelj Spearmanovih korelacija, 28 povezanosti ostalo je značajno ($q < 0,05$): četiri između krutosti i parametara skokova, osam između krutosti i pokazatelja udarca te šesnaest između parametara skokova i pokazatelja udarca.

Nakon kontrole za spol i natjecateljsku razinu putem parcijalnih korelacija te naknadne Benjamini–Hochbergove korekcije odgovarajuće inferencijalne obitelji, pet povezanosti ostalo je značajno. Procijenjena relativna vršna sila tijekom rCMJ-a bila je negativno povezana i s maksimalnom vršnom brzinom lijevog krošea (parcijalni $\rho = -0{,}581$, korigirani $p = 0{,}015$) i sa srednjom vršnom brzinom istog udarca (parcijalni $\rho = -0{,}581$, korigirani $p = 0{,}015$). Nasuprot tome, procijenjena relativna vršna sila tijekom rJ-a bila je pozitivno povezana sa srednjom vršnom brzinom (parcijalni $\rho = 0{,}539$, korigirani $p = 0{,}028$) i maksimalnom vršnom brzinom (parcijalni $\rho = 0{,}519$, korigirani $p = 0{,}037$) lijevog krošea.

Među mjerama krutosti i pokazateljima mehaničkog intenziteta pojedinačnog udarca, krutost patelarne tetive bila je negativno povezana sa srednjim Intensity Scoreom desnog krošea nakon kontrole za spol i natjecateljsku razinu (parcijalni $\rho = -0{,}538$, korigirani $p = 0{,}028$). Nijedna povezanost između krutosti i parametara testova skokova nije ostala značajna nakon prilagodbe za spol i natjecateljsku razinu te korekcije za višestruke usporedbe. U cjelini, smanjenje s 28 značajnih povezanosti u bivarijatnim analizama na pet u prilagođenim analizama ukazuje na to da su spol i natjecateljska razina u značajnoj mjeri doprinosili strukturi opaženih povezanosti. Odnosi između neuromuskularnih karakteristika donjih ekstremiteta i mehaničkog intenziteta pojedinačnog udarca koji su se pokazali značajnima prikazani su u tablici 10.

Tablica 10. Značajne međudomenske povezanosti između neuromuskularnih karakteristika donjih ekstremiteta i izvedbe pojedinačnog udarca u glavnom eksperimentalnom istraživanju (n = 40).

Domena	Varijabla 1	Varijabla 2	ρ	p	BH-korigirani p	Parcijalni ρ	p	BH-korigirani p
Krutost–skok	Krutost ravnog bedrenog mišića	rCMJ vrijeme leta	0,584	<0,001	0,004	0,425	0,008	0,157
Krutost–skok	Krutost ravnog bedrenog mišića	rJ vrijeme leta	0,465	0,002	0,027	0,082	0,624	0,972
Krutost–skok	Krutost lateralnog širokog mišića	rCMJ trajanje koncentrične faze	−0,451	0,003	0,037	−0,288	0,079	0,580
Krutost–skok	Krutost ravnog bedrenog mišića	rCMJ procijenjena relativna vršna sila	0,427	0,006	0,048	0,076	0,651	0,972
Krutost–pojedinačni udarac	Krutost ravnog bedrenog mišića	Srednji Intensity Score desnog krošea	0,771	<0,001	<0,001	0,286	0,082	0,580

Krutost–pojedinačni udarac	Krutost ravnog bedrenog mišića	Maksimalni Intensity Score desnog krošea	0,722	<0,001	<0,001	0,177	0,288	0,861
Krutost–pojedinačni udarac	Krutost lateralnog širokog mišića	Srednji Intensity Score desnog krošea	0,595	<0,001	0,004	0,384	0,017	0,212
Krutost–pojedinačni udarac	Krutost lateralnog širokog mišića	Maksimalni Intensity Score desnog krošea	0,539	<0,001	0,006	0,280	0,089	0,582
Krutost–pojedinačni udarac	Krutost ravnog bedrenog mišića	Maksimalna vršna brzina desnog krošea	0,542	<0,001	0,006	−0,091	0,586	0,972
Krutost–pojedinačni udarac	Krutost ravnog bedrenog mišića	Srednja vršna brzina desnog krošea	0,532	<0,001	0,007	−0,034	0,840	0,972
Krutost–pojedinačni udarac	Krutost lateralnog gastroknemijusa	Srednji Intensity Score desnog krošea	0,501	<0,001	0,014	0,137	0,413	0,935
Krutost–pojedinačni udarac	Krutost ravnog bedrenog mišića	Maksimalna vršna brzina lijevog krošea	−0,439	0,005	0,043	−0,329	0,044	0,405
Krutost–pojedinačni udarac	Krutost patelarne tetive	Srednji Intensity Score desnog krošea	−0,225	0,162	0,353	−0,538	<0,001	0,028
Skok–pojedinačni udarac	rCMJ vrijeme leta	Srednji Intensity Score desnog krošea	0,583	<0,001	0,004	0,395	0,014	0,183
Skok–pojedinačni udarac	rCMJ procijenjena relativna vršna sila	Maksimalna vršna brzina lijevog krošea	−0,548	<0,001	0,006	−0,581	<0,001	0,015
Skok–pojedinačni udarac	rCMJ procijenjena relativna vršna sila	Srednja vršna brzina lijevog krošea	−0,552	<0,001	0,006	−0,581	<0,001	0,015
Skok–pojedinačni udarac	rJ vrijeme leta	Maksimalni Intensity Score desnog krošea	0,561	<0,001	0,006	0,201	0,227	0,824
Skok–pojedinačni udarac	rJ vrijeme leta	Srednji Intensity Score desnog krošea	0,550	<0,001	0,006	0,192	0,248	0,833
Skok–pojedinačni udarac	rCMJ procijenjena relativna vršna sila	Maksimalni Intensity Score	0,540	<0,001	0,006	0,227	0,170	0,785

		desnog krošea						
Skok–pojedinačni udarac	rJ vrijeme leta	Srednji Intensity Score lijevog krošea	0,527	<0,001	0,008	0,346	0,033	0,335
Skok–pojedinačni udarac	rJ procijenjena relativna vršna sila	Srednja vršna brzina lijevog krošea	0,513	<0,001	0,011	0,539	<0,001	0,028
Skok–pojedinačni udarac	rJ procijenjena relativna vršna sila	Maksimalna vršna brzina lijevog krošea	0,494	0,001	0,016	0,519	<0,001	0,037
Skok–pojedinačni udarac	rJ trajanje koncentrične faze	Srednji Intensity Score lijevog krošea	−0,468	0,002	0,027	−0,444	0,005	0,146
Skok–pojedinačni udarac	rJ ritam	Srednji Intensity Score desnog krošea	−0,469	0,002	0,027	0,042	0,802	0,972
Skok–pojedinačni udarac	rCMJ vrijeme leta	Maksimalni Intensity Score desnog krošea	0,448	0,004	0,038	0,099	0,553	0,972
Skok–pojedinačni udarac	rCMJ trajanje koncentrične faze	Srednji Intensity Score desnog krošea	−0,443	0,004	0,040	−0,130	0,437	0,952
Skok–pojedinačni udarac	rJ vrijeme leta	Maksimalni Intensity Score lijevog krošea	0,435	0,005	0,043	0,239	0,148	0,728
Skok–pojedinačni udarac	rCMJ vrijeme leta	Maksimalna vršna brzina desnog krošea	0,437	0,005	0,043	0,148	0,374	0,898
Skok–pojedinačni udarac	rCMJ procijenjena relativna vršna sila	Srednji Intensity Score desnog krošea	0,429	0,006	0,048	−0,001	0,995	0,998

Napomena. ρ = parcijalni Spearmanov koeficijent korelacije uz kontrolu za spol i natjecateljsku razinu; BH = Benjamini–Hochbergova korekcija stope lažnih pozitivnih rezultata; rCMJ = ponavljani skok s pripremnim pokretom; rJ = ponavljani skok; Fmax = procijenjena relativna vršna sila. Intensity Score predstavlja kompozitni indeks izveden iz inercijskih podataka; srednji Intensity Score predstavlja aritmetičku sredinu vrijednosti Intensity Scorea zabilježenih tijekom pet krošea izvedenih svakom rukom, dok maksimalni Intensity Score predstavlja najvišu vrijednost Intensity Scorea zabilježenu tijekom pet krošea. Brzina udarca izražena je u $km \cdot h^{-1}$; srednja vršna brzina predstavlja aritmetičku sredinu vršnih brzina zabilježenih tijekom pet krošea izvedenih svakom rukom, dok maksimalna vršna brzina predstavlja najvišu vršnu brzinu zabilježenu tijekom pet krošea. BH-korekcija primijenjena je zasebno na 222 Spearmanove korelacije i 222 parcijalne korelacije. Podebljane vrijednosti označavaju parcijalne korelacije koje su ostale značajne nakon BH korekcije ($q < 0,05$). Prikazane su samo povezanosti koje su bile značajne nakon BH-korekcije u najmanje jednoj od dviju analiza.

5.3.8 H5 – Razlike s obzirom na spol i natjecateljsku razinu u neuromuskularnim karakteristikama donjih ekstremiteta i mehaničkom intenzitetu pojedinačnog udarca

U ukupnom uzorku glavnog istraživanja (n = 40) ispitane su razlike s obzirom na spol i natjecateljsku razinu u pet mjera mišićno-tetivne krutosti u statičkim uvjetima dominantnog donjeg ekstremiteta, 14 parametara dobivenih testovima rCMJ i rJ te osam pokazatelja mehaničkog intenziteta pojedinačnog udarca.

Za krutost su utvrđeni značajni glavni učinci spola za lateralni gastroknemijus, $F(1, 36) = 13,86$, $p < 0,001$, $\eta_p^2 = 0,278$, 95% CI [0,064, 0,487], za ravni bedreni mišić, $F(1, 36) = 55,34$, $p < 0,001$, $\eta_p^2 = 0,606$, 95% CI [0,391, 0,736], te za lateralni široki mišić, $F(1, 36) = 11,81$, $p = 0,002$, $\eta_p^2 = 0,247$, 95% CI [0,045, 0,459]. U sva tri slučaja srednje vrijednosti bile su više kod muškaraca nego kod žena. Za mjere krutosti nisu utvrđeni značajni učinci natjecateljske razine ni interakcije Spol × Natjecateljska razina.

U testovima skokova utvrđeni su značajni glavni učinci spola za vrijeme kontakta tijekom rCMJ-a, $F(1, 36) = 4,80$, $p = 0,035$, $\eta_p^2 = 0,118$, 95% CI [0,000, 0,329], vrijeme leta tijekom rCMJ-a, $F(1, 36) = 9,44$, $p = 0,004$, $\eta_p^2 = 0,208$, 95% CI [0,025, 0,423], trajanje koncentrične faze rCMJ-a, $F(1, 36) = 11,50$, $p = 0,002$, $\eta_p^2 = 0,242$, 95% CI [0,042, 0,455], procijenjenu relativnu vršnu silu tijekom rCMJ-a, $F(1, 36) = 7,39$, $p = 0,010$, $\eta_p^2 = 0,170$, 95% CI [0,011, 0,386], te procijenjeni rate of force development tijekom rCMJ-a, $F(1, 36) = 4,31$, $p = 0,045$, $\eta_p^2 = 0,107$, 95% CI [0,000, 0,316]. Za rJ su utvrđeni značajni glavni učinci spola za vrijeme leta, $F(1, 36) = 12,11$, $p = 0,001$, $\eta_p^2 = 0,252$, 95% CI [0,048, 0,464], ritam, $F(1, 36) = 24,91$, $p < 0,001$, $\eta_p^2 = 0,409$, 95% CI [0,168, 0,593], te trajanje ekscentrične faze, $F(1, 36) = 7,81$, $p = 0,008$, $\eta_p^2 = 0,178$, 95% CI [0,014, 0,394]. Za vrijeme leta tijekom rJ-a također je utvrđen učinak natjecateljske razine, $F(1, 36) = 4,12$, $p = 0,050$, $\eta_p^2 = 0,103$, 95% CI [0,000, 0,311], pri čemu su srednje vrijednosti bile više kod elitnih nego kod neelitnih sportaša. Taj je rezultat interpretiran s oprezom s obzirom na eksplorativnu prirodu H5. Nijedna interakcija Spol × Natjecateljska razina nije bila značajna za parametre testova skokova.

Za pokazatelje udarca spol je pokazao značajne glavne učinke na maksimalni Intensity Score desnog krošea, $F(1, 36) = 71,24$, $p < 0,001$, $\eta_p^2 = 0,664$, 95% CI [0,470, 0,776], srednji Intensity Score desnog krošea, $F(1, 36) = 79,71$, $p < 0,001$, $\eta_p^2 = 0,689$, 95% CI [0,505,

0,793], maksimalni Intensity Score lijevog krošea, F(1, 36) = 7,51, p = 0,010, η_p^2 = 0,173, 95% CI [0,012, 0,388], te srednji Intensity Score lijevog krošea, F(1, 36) = 5,31, p = 0,027, η_p^2 = 0,129, 95% CI [0,000, 0,341]. Također su utvrđeni značajni glavni učinci spola na maksimalnu i srednju vršnu brzinu desnog krošea, redom F(1, 36) = 25,05, p < 0,001, η_p^2 = 0,410, 95% CI [0,169, 0,594] i F(1, 36) = 19,69, p < 0,001, η_p^2 = 0,354, 95% CI [0,119, 0,549], kao i na maksimalnu i srednju vršnu brzinu lijevog krošea, redom F(1, 36) = 4,77, p = 0,036, η_p^2 = 0,117, 95% CI [0,000, 0,328] i F(1, 36) = 4,69, p = 0,037, η_p^2 = 0,115, 95% CI [0,000, 0,326]. Muškarci su imali više vrijednosti za sve pokazatelje Intensity Scorea i za brzine desnog krošea, dok su za brzine lijevog krošea srednje vrijednosti bile više kod žena. Za pokazatelje udarca nisu utvrđeni značajni učinci natjecateljske razine ni interakcije Spol × Natjecateljska razina.

Zaključno, H5 je pokazala obrazac pretežno obilježen razlikama povezanima sa spolom, dok su dokazi koji se odnose na natjecateljsku razinu bili ograničeni. Nisu utvrđene značajne interakcije Spol × Natjecateljska razina ni u jednom od 27 analiziranih ishoda. Rezultati koji se odnose na razlike prema spolu i natjecateljskoj razini u neuromuskularnim karakteristikama donjih ekstremiteta i mehaničkom intenzitetu pojedinačnog udarca prikazani su u tablici 11.

Tablica 11. Razlike s obzirom na spol i natjecateljsku razinu u neuromuskularnim karakteristikama donjih ekstremiteta i izvedbi pojedinačnog udarca u glavnom eksperimentalnom istraživanju (n = 40).

Varijabla	Neelitni Ž	Neelitni M	Elitni Ž	Elitni M	Spol F(p)	η_p^2	Natjecateljska razina F(p)	η_p^2	Spol × Natjecateljska razina F(p)	η_p^2
Krutost Ahilove tetive (N/m)	1225,0 ± 154,9	1260,0 ± 253,7	1392,8 ± 182,8	1261,6 ± 297,9	0,44 (0,511)	0,012	1,36 (0,251)	0,036	1,31 (0,259)	0,035
Krutost lateralnog gastroknemijusa (N/m)	339,9 ± 43,2	422,1 ± 80,1	346,9 ± 53,4	432,9 ± 96,2	13,86 (<0,001)	0,278	0,15 (0,696)	0,004	0,01 (0,932)	0,000
Krutost patelarne tetive (N/m)	914,1 ± 266,5	927,1 ± 175,0	952,2 ± 274,1	965,7 ± 198,4	0,03 (0,858)	0,001	0,27 (0,605)	0,008	0,00 (0,997)	0,000
Krutost ravnog bedrenog mišića (N/m)	296,1 ± 26,5	366,3 ± 23,3	303,7 ± 35,1	377,6 ± 35,8	55,34 (<0,001)	0,606	0,95 (0,335)	0,026	0,04 (0,848)	0,001
Krutost lateralnog širokog mišića (N/m)	404,7 ± 71,5	528,3 ± 132,0	410,9 ± 81,7	539,1 ± 156,3	11,81 (0,002)	0,247	0,05 (0,818)	0,001	0,00 (0,950)	0,000

rCMJ vrijeme kontakta (s)	0,550 ± 0,041	0,504 ± 0,077	0,534 ± 0,057	0,489 ± 0,077	4,80 (0,035)	0,118	0,56 (0,459)	0,015	0,00 (0,972)	0,000
rCMJ vrijeme leta (s)	0,417 ± 0,031	0,464 ± 0,056	0,439 ± 0,045	0,488 ± 0,059	9,44 (0,004)	0,208	2,24 (0,143)	0,059	0,01 (0,938)	0,000
rCMJ ritam (p/s)	1,022 ± 0,091	1,054 ± 0,129	1,043 ± 0,109	1,076 ± 0,171	0,62 (0,435)	0,017	0,27 (0,605)	0,007	0,00 (0,995)	0,000
rCMJ trajanje koncentrične faze (s)	0,289 ± 0,036	0,242 ± 0,036	0,282 ± 0,045	0,246 ± 0,037	11,50 (0,002)	0,242	0,02 (0,903)	0,000	0,15 (0,698)	0,004
rCMJ trajanje ekscentrične faze (s)	0,262 ± 0,022	0,259 ± 0,061	0,263 ± 0,036	0,266 ± 0,084	0,00 (0,982)	0,000	0,04 (0,835)	0,001	0,03 (0,854)	0,001
rCMJ procijenjena relativna vršna sila (Fmax) (N/kg)	22,14 ± 2,40	26,64 ± 6,24	24,06 ± 3,64	28,96 ± 7,86	7,39 (0,010)	0,170	1,50 (0,228)	0,040	0,01 (0,911)	0,000
rCMJ procijenjeni RFD (N/kg/s)	27,14 ± 19,29	53,58 ± 37,77	30,15 ± 27,43	59,54 ± 68,48	4,31 (0,045)	0,107	0,11 (0,741)	0,003	0,01 (0,914)	0,000
rJ vrijeme kontakta (s)	0,201 ± 0,035	0,205 ± 0,018	0,195 ± 0,043	0,199 ± 0,021	0,17 (0,679)	0,005	0,37 (0,549)	0,010	0,00 (0,991)	0,000
rJ vrijeme leta (s)	0,457 ± 0,029	0,499 ± 0,039	0,481 ± 0,040	0,525 ± 0,047	12,11 (0,001)	0,252	4,12 (0,050)	0,103	0,01 (0,921)	0,000
rJ ritam (p/s)	1,460 ± 0,053	1,367 ± 0,056	1,490 ± 0,058	1,395 ± 0,070	24,91 (<0,001)	0,409	2,33 (0,136)	0,061	0,00 (0,962)	0,000
rJ trajanje koncentrične faze (s)	0,094 ± 0,025	0,082 ± 0,007	0,101 ± 0,038	0,088 ± 0,011	2,93 (0,095)	0,075	0,67 (0,418)	0,018	0,01 (0,915)	0,000
rJ trajanje ekscentrične faze (s)	0,106 ± 0,021	0,123 ± 0,013	0,116 ± 0,021	0,134 ± 0,021	7,81 (0,008)	0,178	2,78 (0,104)	0,072	0,01 (0,926)	0,000
rJ procijenjena relativna vršna sila (Fmax) (N/kg)	59,92 ± 9,27	61,74 ± 5,87	63,75 ± 10,85	65,68 ± 7,44	0,48 (0,494)	0,013	2,05 (0,160)	0,054	0,00 (0,983)	0,000
rJ procijenjeni RFD (N/kg/s)	364,19 ± 215,93	502,50 ± 189,03	404,66 ± 337,13	558,33 ± 253,13	3,28 (0,079)	0,083	0,36 (0,554)	0,010	0,01 (0,925)	0,000
maksimalni Intensity Score desnog krošea	13,66 ± 1,91	18,81 ± 1,15	14,52 ± 2,84	20,31 ± 1,94	71,24 (<0,001)	0,664	3,32 (0,077)	0,084	0,25 (0,622)	0,007

Srednji Intensity Score desnog krošea	11,42 ± 1,93	16,87 ± 1,81	12,42 ± 2,26	18,34 ± 2,03	79,71 (<0,001)	0,689	3,73 (0,061)	0,094	0,14 (0,712)	0,004
Maksimalni Intensity Score lijevog krošea	14,48 ± 2,83	16,99 ± 2,83	15,58 ± 3,80	18,68 ± 3,41	7,51 (0,010)	0,173	1,84 (0,183)	0,049	0,08 (0,779)	0,002
Srednji Intensity Score lijevog krošea	12,10 ± 1,92	13,69 ± 1,80	13,30 ± 2,95	14,88 ± 1,84	5,31 (0,027)	0,129	3,00 (0,092)	0,077	0,00 (0,997)	0,000
Maksimalna vršna brzina desnog krošea ($km \cdot h^{-1}$)	25,40 ± 3,49	30,13 ± 1,77	26,51 ± 5,20	32,71 ± 2,29	25,05 (<0,001)	0,410	2,87 (0,099)	0,074	0,45 (0,505)	0,012
Srednja vršna brzina desnog krošea ($km \cdot h^{-1}$)	21,99 ± 4,65	27,14 ± 2,03	23,91 ± 5,17	29,50 ± 2,48	19,69 (<0,001)	0,354	3,11 (0,086)	0,080	0,03 (0,854)	0,001
Maksimalna vršna brzina lijevog krošea ($km \cdot h^{-1}$)	27,17 ± 4,78	23,47 ± 4,66	29,23 ± 6,59	25,35 ± 5,72	4,77 (0,036)	0,117	1,29 (0,264)	0,034	0,00 (0,960)	0,000
Srednja vršna brzina lijevog krošea ($km \cdot h^{-1}$)	23,12 ± 6,12	19,50 ± 4,67	25,41 ± 6,60	21,20 ± 5,30	4,69 (0,037)	0,115	1,21 (0,278)	0,033	0,03 (0,871)	0,001

Napomena. Vrijednosti su prikazane kao srednja vrijednost ± SD. F-statistike odnose se na glavne učinke spola i natjecateljske razine te na interakciju Spol × Natjecateljska razina iz dvosmjerne ANOVA-e. η_p^2 = parcijalna eta-kvadrat; rCMJ = ponavljani skok s pripremnim pokretom; rJ = ponavljani skok; Fmax = procijenjena relativna vršna sila; RFD = procijenjena stopa razvoja sile. Intensity Score predstavlja kompozitni indeks izveden iz inercijskih podataka; srednji Intensity Score predstavlja aritmetičku sredinu vrijednosti Intensity Scorea zabilježenih tijekom pet krošea izvedenih svakom rukom, dok maksimalni Intensity Score predstavlja najvišu vrijednost Intensity Scorea zabilježenu tijekom pet krošea. Brzina udarca izražena je u $km \cdot h^{-1}$; srednja vršna brzina predstavlja aritmetičku sredinu vršnih brzina zabilježenih tijekom pet krošea izvedenih svakom rukom, dok maksimalna vršna brzina predstavlja najvišu vršnu brzinu zabilježenu tijekom pet krošea.

6 Rasprava

6.1 Sažetak glavnih rezultata

U ovom su radu integrirano ispitani mehanički intenzitet udarca, fiziološki odgovori tijekom intervalnog opterećenja specifičnog za boks i neuromuskularne karakteristike donjih ekstremiteta, kroz istraživački proces progresivno strukturiran u tri faze: sustavni pregled, pilot-istraživanje i glavno eksperimentalno istraživanje. Ukupno, rezultati istraživanja pokazali su različit obrazac mehaničkog intenziteta uzastopnih udaraca i fizioloških odgovora tijekom RPAT-a, specifične povezanosti između tih varijabli te razlike između muškaraca i žena i između elitnih i neelitnih boksača. Naknadna integracija procjena neuromuskularnih karakteristika donjih ekstremiteta dodatno je omogućila istraživanje odnosa između mišićno-tetivne krutosti u statičkim uvjetima specifičnih anatomskih regija dominantnog donjeg ekstremiteta, parametara eksplozivne snage donjih ekstremiteta i pokazatelja mehaničkog intenziteta udarca.

Tijekom RPAT-a srednji Intensity Score pokazao je izraženo smanjenje tijekom triju rundi, osobito između prve i druge runde, uz daljnje smanjenje, iako manjeg opsega, između druge i treće runde. Nasuprot tome, vrijednosti HRmean i VO_2mean povećale su se pretežno između prve i druge runde, bez daljnjih značajnih promjena između druge i treće runde. Stoga se progresivno smanjenje ISmean, kao pokazatelja mehaničkog intenziteta uzastopnih udaraca tijekom RPAT-a, odvijalo uz fiziološke odgovore koji su, nakon početnog povećanja, pokazali uglavnom stabilizaciju u sljedećim rundama.

Analize odnosa između mehaničkog intenziteta udarca i fizioloških odgovora pokazale su različit obrazac ovisno o rundi i prilagodbi za potencijalne zbunjujuće čimbenike. U nekorigiranim analizama ISmean bio je pozitivno povezan s VO_2mean u prvoj i trećoj rundi, dok povezanosti utvrđene u drugoj rundi nisu zadržale značajnost kada je šest korelacija obuhvaćenih hipotezom H2 zajednički razmatrano pri Holmovoj korekciji. Nakon kontrole za spol i natjecateljsku razinu, ostale su pozitivne povezanosti između ispitanika (between-subject) između ISmean i VO_2mean u prvoj i trećoj rundi, dok je povezanost u drugoj rundi oslabila i nije bila statistički značajna. Za HRmean, prilagođena analiza pokazala je

negativne povezanosti s ISmean u prvoj i trećoj rundi, koje su se zadržale i nakon Holmove korekcije kada je šest parcijalnih korelacija zajednički razmatrano, dok povezanost u drugoj rundi nije zadržala značajnost nakon korekcije. Dodatna prilagodba, zasebno za dob ili trenažni staž, nije bitno promijenila smjer ni veličinu tih povezanosti. Ovi rezultati opisuju povezanosti između ispitanika (between-subject) unutar pojedinačnih rundi i ne omogućuju zaključivanje da su promjene fizioloških odgovora unutar ispitanika (*within-subject*) kroz runde povezane s odgovarajućim promjenama ISmean. U eksplorativnoj analizi provedenoj na ukupnim srednjim vrijednostima triju rundi za svakog sudionika, vrijednost VO_2mean bila je pozitivno povezana s vrijednošću ISmean kada su oba fiziološka odgovora istodobno uključena u analizu, dok za HRmean nije utvrđena statistički značajna povezanost s ISmean.

Eksplorativne analize koje su se odnosile na spol i natjecateljsku razinu također su pokazale određene razlike u kretanju razmatranih varijabli tijekom RPAT-a između muškaraca i žena te između elitnih i neelitnih boksača. Konkretno, vrijednosti ISmean razlikovale su se i između muškaraca i žena i između elitnih i neelitnih boksača. Nadalje, smanjenje ISmean tijekom triju rundi pokazalo je različit obrazac između muškaraca i žena. Za HRmean, nasuprot tome, kretanje tijekom triju rundi razlikovalo se između elitnih i neelitnih boksača; međutim, kada je svaka runda analizirana zasebno, razlike između elitnih i neelitnih boksača nisu bile statistički značajne nakon uzimanja u obzir višestrukih provedenih usporedbi. Zaključno, ovi rezultati pokazuju da se razlike povezane sa spolom i natjecateljskom razinom nisu očitovale na isti način za sve varijable razmatrane tijekom RPAT-a te ih je potrebno interpretirati s oprezom s obzirom na eksplorativnu prirodu tih analiza.

Paralelno s rezultatima koji se odnose na mehanički intenzitet udarca i fiziološke odgovore, glavno eksperimentalno istraživanje omogućilo je detaljniju metodološku karakterizaciju RPAT-a. Mjere ISmean, HRmean i VO_2mean u pojedinačnim rundama pokazale su visoku test–retest pouzdanost i nisku varijabilnost, bez značajnih i sustavnih promjena između dvaju mjerenja. Analiza pogreške mjerenja također je pokazala različitu sposobnost razmatranih varijabli da razlikuju male promjene od pogreške povezane s mjerenjem. Ti rezultati, zajedno s preliminarnim dokazima koji se odnose na sadržajnu valjanost i diskriminativnu konstruktnu valjanost, pridonose progresivnoj metodološkoj karakterizaciji RPAT-a, pri čemu se on ne smatra potpuno validiranim prookolom.

Mjere mišićno-tetivne krutosti u statičkim uvjetima pet anatomskih regija dominantnog donjeg ekstremiteta također su pokazale dobru test–retest pouzdanost i nisku varijabilnost. Eksplorativne analize povezane s H4 u početku su pokazale više povezanosti između mišićno-tetivne krutosti u statičkim uvjetima, parametara eksplozivne snage donjih ekstremiteta i pokazatelja mehaničkog intenziteta udarca. Međutim, kada su ti odnosi ponovno analizirani uzimajući u obzir moguće razlike povezane sa spolom i natjecateljskom razinom, samo je pet povezanosti zadržalo statističku značajnost. One su se odnosile na procijenjenu relativnu vršnu silu u testovima skokova u odnosu na vršnu brzinu lijevog krošea te na krutost patelarne tetive u odnosu na srednji Intensity Score desnog krošea. Sumarno, rezultati su stoga pokazali ograničene i specifične odnose između neuromuskularnih karakteristika donjih ekstremiteta i pokazatelja mehaničkog intenziteta pojedinačnog udarca, umjesto općeg obrasca povezanosti između razmatranih varijabli.

Naposljetku, eksplorativne analize povezane s H5 pokazale su da su razlike u neuromuskularnim karakteristikama donjih ekstremiteta i nekim pokazateljima mehaničkog intenziteta pojedinačnog udarca bile prvenstveno povezane sa spolom. Razlike između elitnih i neelitnih boksača bile su, nasuprot tome, ograničenije, a razlike opažene između muškaraca i žena nisu se značajno razlikovale između elitnih i neelitnih boksača. Promatrani u cjelini, rezultati glavnog eksperimentalnog istraživanja proširuju nalaze dobivene u prve dvije faze istraživanja i omogućuju da se u sljedećim odjeljcima detaljnije razmotre kretanje mehaničkog intenziteta udarca i fizioloških odgovora tijekom RPAT-a, razlike između muškaraca i žena i između elitnih i neelitnih boksača, metodološka karakterizacija protokola te odnosi između neuromuskularnih karakteristika donjih ekstremiteta i mehaničkog intenziteta udarca.

6.2 RPAT: mehanički intenzitet uzastopnih udaraca i fiziološki odgovori

Promatrano zaključno, rezultati pokazuju progresivno smanjenje Intensity Scorea tijekom triju rundi RPAT-a, s izraženim smanjenjem između prve i druge runde te daljnjim smanjenjem u trećoj rundi. Budući da ISmean proizlazi iz srednje vrijednosti Intensity Scoreova zabilježenih tijekom šest serija udaraca u trajanju od 5 s koje su činile svaku rundu te je u analizama korišten kao pokazatelj mehaničkog intenziteta uzastopnih udaraca, ovaj

obrazac opisuje progresivno smanjenje ISmean tijekom rundi, što je u skladu sa smanjenjem sposobnosti održavanja izvedbe uzastopnih udaraca tijekom protokola. Dunn et al. (2022b) utvrdili su smanjenje sile udarca kod visoko treniranih boksača nakon intenzivnog intervalnog opterećenja koje je uključivalo donje ekstremitete i trup. U novijem istraživanju Stewart et al. (2025) utvrdili su smanjenje sile udarca nakon protokola zamora donjih ekstremiteta, s različitim učincima među različitim vrstama udaraca. Iako su u tim istraživanjima korišteni protokoli i mjere različiti od onih u našem istraživanju, njihovi rezultati pokazuju da zamor može narušiti sposobnost generiranja sile udarca. Stoga je moguće da progresivno smanjenje Intensity Scorea barem djelomično odražava sve veću poteškoću u održavanju mehaničkog intenziteta uzastopnih udaraca tijekom ponavljanih napora. Međutim, ova interpretacija mora ostati oprezna jer u RPAT-u zamor nije izravno mjeren, a Intensity Score ne predstavlja izravnu mjeru sile udarca ili snage udarca, kao što je prethodno navedeno.

Uz ovaj opći obrazac, elitni boksači ostvarili su ukupno više vrijednosti ISmean od neelitnih boksača, dok je smanjenje zabilježeno tijekom triju rundi bilo slično u objema skupinama. Proširenje uzorka u glavnom eksperimentalnom istraživanju stoga je potvrdilo ono što je uočeno u pilot-fazi, u kojoj su elitni boksači pokazivali više vrijednosti Intensity Scorea.

Muškarci su ostvarili više vrijednosti ISmean od žena, osobito u prvoj rundi; razlika se smanjila u drugoj rundi, dok su u trećoj rundi vrijednosti bile sličnije. Ovaj obrazac mogao bi biti povezan s početno višim vrijednostima ISmean zabilježenima kod muškaraca i njihovim naknadnim većim smanjenjem tijekom protokola. Međutim, nije moguće utvrditi je li takav obrazac povezan s različitim razvojem zamora između muškaraca i žena jer zamor nije izravno mjeren.

Vrijednosti HRmean i VO_2mean pokazale su drukčiji obrazac. Obje su se varijable značajno povećale od prve do druge runde, bez daljnjih značajnih promjena u trećoj rundi. Takav je obrazac u skladu s visokim fiziološkim zahtjevima dokumentiranima u literaturi. El-Ashker et al. (2018) tijekom simulacije triju rundi zabilježili su vrijednosti potrošnje kisika veće od 90% VO_2max, bez značajnih razlika između rundi, te vrijednosti vršne srčane frekvencije jednake ili veće od 90% maksimalne srčane frekvencije u svim trima rundama. Venckunas et al. (2022) također su dokumentirali visoke kardiorespiratorne odgovore tijekom vježbi

specifičnih za boks kod sportaša visoke razine. Stoga se u našem istraživanju početno povećanje i naknadna stabilizacija HRmean i VO_2mean uklapaju u obrazac koji je već opisan u literaturi o boksu.

Zanimljiv aspekt proizlazi iz usporedbe ovog obrasca s kretanjem Intensity Scorea. Naime, između druge i treće runde ISmean nastavio se smanjivati, dok vrijednosti HRmean i VO_2mean nisu pokazale daljnje značajne promjene. Smanjenje ISmean stoga nije bilo praćeno smanjenjem razmatranih fizioloških odgovora. Ovaj rezultat pokazuje da se tijekom RPAT-a ISmean može smanjivati dok razmatrani fiziološki odgovori ostaju povišeni. Međutim, dostupni podaci ne omogućuju utvrđivanje mehanizama odgovornih za takav obrazac.

Kada se specifičnije razmotri potrošnja kisika, u prvoj rundi vrijednost VO_2mean bila je slična između elitnih i neelitnih boksača, dok su u drugoj i trećoj rundi elitni boksači pokazali više vrijednosti. Razlika između dviju skupina stoga se pojavila s napredovanjem protokola, usporedno s povećanjem potrošnje kisika zabilježenim u odnosu na prvu rundu. Za razliku od ISmean, vrijednosti VO_2mean bile su slične između muškaraca i žena.

Nekorigirane analize pokazale su pozitivne povezanosti između ISmean i VO_2mean u prvoj i trećoj rundi, dok su povezanosti zabilježene u drugoj rundi bile osjetljive na definiciju inferencijalne obitelji primijenjene za korekciju višestrukih usporedbi. Nakon prilagodbe za spol i natjecateljsku razinu, pozitivne povezanosti između ISmean i VO_2mean ostale su prisutne u prvoj i trećoj rundi, dok je ona u drugoj rundi znatno oslabila i nije bila statistički značajna. Za HRmean prilagodba je u većoj mjeri promijenila obrazac povezanosti: utvrđene su negativne povezanosti s ISmean u prvoj i trećoj rundi, koje su se zadržale i kada je šest parcijalnih korelacija razmatrano kao jedna obitelj za Holmovu korekciju, dok negativna povezanost u drugoj rundi nije zadržala značajnost nakon korekcije. Analize osjetljivosti s dodatnom prilagodbom, zasebno za dob ili trenažni staž, nisu bitno promijenile smjer ni veličinu povezanosti utvrđenih u glavnom modelu. U cjelini, prilagođeni rezultati pokazuju obrazac povezanosti između ispitanika (between-subject) između višeg ISmean i više vrijednosti VO_2mean u prvoj i trećoj rundi, uz istodobne obrnute povezanosti između ISmean i HRmean u istim rundama. Ti rezultati opisuju razlike između ispitanika (engl. *between-subject*) unutar svake pojedine runde i ne smiju se interpretirati kao dokaz da su

promjene VO_2mean ili HRmean unutar pojedinca (engl. *within-subject*) kroz runde praćene odgovarajućim promjenama ISmean.

Ovaj je rezultat osobito zanimljiv s obzirom na to da su elitni boksači, osim što su ostvarili ukupno više vrijednosti ISmean, pokazali i više vrijednosti VO_2mean u drugoj i trećoj rundi. Ta su dva rezultata međusobno usklađena, ali ne omogućuju utvrđivanje je li veća potrošnja kisika pridonijela održavanju većeg mehaničkog intenziteta ili je, nasuprot tome, veći izraženi intenzitet doveo do većih energetskih zahtjeva.

Već se u pilot-fazi taj odnos pojavio ponajprije u završnom dijelu RPAT-a. U ukupnom uzorku nekorigirane korelacije pokazale su pozitivne povezanosti između ISmean i VO_2mean u prvoj i trećoj rundi, dok je u drugoj rundi značajnost ovisila o definiciji primijenjene inferencijalne obitelji. Nakon kontrole za spol i natjecateljsku razinu, pozitivne povezanosti ostale su prisutne u prvoj i trećoj rundi, dok je ona u drugoj rundi znatno oslabila. Relativna stabilnost koeficijenata nakon dodatne prilagodbe, zasebno za dob ili trenažni staž, podupire robusnost obrasca uočenog u prvoj i trećoj rundi u odnosu na razmatrane čimbenike. U trećoj rundi utvrđena je pozitivna povezanost najveće veličine između ISmean i VO_2mean; međutim, budući da su korelacije izračunate zasebno unutar svake runde, deskriptivna usporedba koeficijenata ne omogućuje zaključivanje o jačanju povezanosti unutar ispitanika (*within-subject*) s napredovanjem RPAT-a.

Važnost aerobnog metabolizma u boksu dobro je dokumentirana. Više istraživanja potvrdilo je znatan aerobni angažman koji zahtijeva boksačka aktivnost (El-Ashker et al., 2018; Venckunas et al., 2022), dok su Kamandulis et al. (2018) utvrdili da četiri tjedna specifičnog treninga temeljenog na ponavljanim sekvencama udaraca mogu poboljšati i vršnu potrošnju kisika tijekom vježbanja gornjih ekstremiteta i sposobnost održavanja frekvencije i sile udaraca tijekom triju rundi. Promatrani zajedno, ovi dokazi podupiru važnost aerobne komponente za sposobnost održavanja ponavljanih boksačkih aktivnosti, ali ne dokazuju izravno značenje odnosa ISmean–VO_2mean utvrđenog u ovom istraživanju.

U našem slučaju rezultat pokazuje da su sportaši koji su ostvarivali više vrijednosti mehaničkog intenziteta uzastopnih udaraca također imali tendenciju pokazivati više vrijednosti potrošnje kisika tijekom RPAT-a. Međutim, nije moguće utvrditi smjer tog odnosa, odnosno može li veća potrošnja kisika pridonijeti održavanju većeg intenziteta

vježbanja ili, nasuprot tome, veći mehanički intenzitet udaraca dovesti do većih energetskih zahtjeva. Stoga rezultati ne omogućuju zaključak da su sportaši s većim aerobnim kapacitetom sposobni ostvariti veći mehanički intenzitet uzastopnih udaraca.

Za srčanu frekvenciju elitni i neelitni boksači pokazali su različit obrazac HRmean tijekom triju rundi. Međutim, kada su dvije skupine uspoređene zasebno u svakoj rundi, vrijednosti HRmean nisu se značajno razlikovale. Vrijednosti HRmean bile su slične i između muškaraca i žena.

Što se tiče HRmean, odnos s ISmean bio je manje konzistentan. Nekorigirane korelacije nisu pokazale značajne povezanosti između ISmean i HRmean u prvoj i trećoj rundi, dok je u drugoj rundi utvrđena umjerena negativna povezanost koja nije zadržala značajnost kada je šest korelacija obuhvaćenih hipotezom H2 razmatrano kao jedna inferencijalna obitelj. Obrazac se razlikovao nakon prilagodbe za spol i natjecateljsku razinu: ISmean pokazao je negativne povezanosti s HRmean u prvoj i trećoj rundi, koje su se zadržale i nakon Holmove korekcije na šest parcijalnih korelacija, dok povezanost u drugoj rundi nije zadržala značajnost nakon korekcije. I te su povezanosti ostale uglavnom stabilne u analizama osjetljivosti koje su zasebno uključivale dob ili trenažni staž. Nadalje, kada su za svakog sudionika razmatrane srednje vrijednosti zabilježene tijekom triju rundi, vrijednost HRmean nije pokazala značajnu povezanost s ISmean. Zaključno, odnos između HRmean i ISmean pokazao se ovisnijim o analitičkoj strategiji od odnosa utvrđenog za VO_2mean, budući da su se negativne povezanosti u prvoj i trećoj rundi pojavile nakon kontrole za spol i natjecateljsku razinu, dok vrijednost HRmean nije bila značajno povezana s ISmean u eksplorativnoj analizi provedenoj na srednjim vrijednostima triju rundi.

U tom pogledu literatura pokazuje da srčana frekvencija tijekom boksa doseže vrlo visoke vrijednosti, kako u simulacijama tako i tijekom borbe (de Lira et al., 2013; El-Ashker et al., 2018; Venckunas et al., 2022). Međutim, srčana frekvencija i potrošnja kisika ne moraju nužno na isti način odgovarati na promjene u provedenoj aktivnosti. Kravitz et al. (2003) utvrdili su da je povećanje frekvencije izvođenja udaraca bilo praćeno povećanjem srčane frekvencije bez značajnih promjena potrošnje kisika. Iako se protokol i ispitivana populacija razlikuju od onih u ovom istraživanju, taj rezultat opreznije podupire pretpostavku da srčana

frekvencija i potrošnja kisika mogu pružati fiziološke informacije koje se tijekom boksačke aktivnosti ne preklapaju u potpunosti.

Negativne povezanosti između ISmean i HRmean utvrđene u prvoj i trećoj rundi nakon prilagodbe za spol i natjecateljsku razinu zahtijevaju opreznu interpretaciju, osobito zato što nisu bile vidljive u odgovarajućim nekorigiranim korelacijama. Opservacijski dizajn i provedene analize ne omogućuju utvrđivanje odražavaju li te povezanosti individualne razlike u kardiovaskularnom odgovoru na vježbanje, izvedbene karakteristike sportaša ili druge nemjerene čimbenike. Analogno povezanostima s VO_2mean, one opisuju odnose između ispitanika unutar svake pojedine runde i ne ukazuju na to da su promjene HRmean unutar ispitanika (within-subject) tijekom RPAT-a povezane s odgovarajućim promjenama ISmean.

Ovi rezultati pokazuju da se tijekom protokola intervalnog opterećenja specifičnog za boks, kao što je RPAT, opaža progresivno smanjenje ISmean kao pokazatelja mehaničkog intenziteta uzastopnih udaraca, praćeno brzim povećanjem fizioloških odgovora koji se potom nastoje stabilizirati. Akumulacija zamora mogla bi pridonijeti progresivnom smanjenju ISmean zabilježenom tijekom protokola; međutim, budući da zamor nije izravno mjeren, ova interpretacija ostaje hipotetska. Prilagođene analize pokazale su pozitivne povezanosti između ispitanika između ISmean i VO_2mean u prvoj i trećoj rundi, dok u drugoj rundi ta povezanost nije bila značajna. Za HRmean negativne povezanosti s ISmean pojavile su se u prvoj i trećoj rundi nakon kontrole za spol i natjecateljsku razinu. Stoga ovi rezultati ukazuju na povezanosti specifične za pojedine runde između mehaničkog intenziteta uzastopnih udaraca i fizioloških odgovora, čija interpretacija mora uzeti u obzir opservacijsku prirodu istraživanja i prirodu povezanosti između ispitanika. Usporedbe prema natjecateljskoj razini i spolu nadopunjuju ovaj obrazac. Elitni boksači ostvarili su ukupno više vrijednosti ISmean od neelitnih boksača te više vrijednosti VO_2mean u drugoj i trećoj rundi, dok je smanjenje ISmean tijekom triju rundi bilo slično u objema skupinama. Muškarci su ostvarili više vrijednosti ISmean od žena ponajprije na početku RPAT-a, uz progresivno smanjenje razlike u sljedećim rundama, dok su vrijednosti HRmean i VO_2mean bile slične između muškaraca i žena. U cjelini, ovi rezultati proširuju opažanja proizašla iz pilot-faze i jasnije definiraju odnos između mehaničkog intenziteta uzastopnih udaraca i

fizioloških odgovora tijekom RPAT-a, ali ne omogućuju zaključivanje o uzročnom smjeru opaženih povezanosti.

6.3 Metodološka karakterizacija RPAT-a

Metodološka karakterizacija RPAT-a pokazala je dobru reproducibilnost ISmean, HRmean i VO_2mean tijekom triju rundi, uz nisku varijabilnost mjerenja i izostanak sustavnih promjena između dviju sesija. U cjelini, ovi rezultati pokazuju da su odgovori zabilježeni tijekom RPAT-a ostali stabilni kada je protokol ponovljen u istim uvjetima. Ovaj je rezultat relevantan za test specifičan za sport, u kojem reproducibilnost mjerenja predstavlja temeljni preduvjet za pouzdanu interpretaciju odgovora sportaša (Chaabene et al., 2018; Currell & Jeukendrup, 2008).

Uz dobru reproducibilnost, usporedba SEM-a i SWC-a pokazala je povoljnu osjetljivost ISmean prema primijenjenom kriteriju, pri čemu su vrijednosti SEM-a bile niže od SWC-a u sve tri runde. Za HRmean taj je uvjet zabilježen samo u prvoj rundi, dok za VO_2mean nije utvrđen. Međutim, za ISmean MDC_{95} bio je veći od SWC-a u sve tri runde; stoga se individualne promjene veličine SWC-a ne mogu razlikovati od pogreške mjerenja uz 95%-tnu razinu pouzdanosti.

U odnosu na pilot-fazu, glavno eksperimentalno istraživanje omogućilo je jasnije određivanje karakteristika osjetljivosti ISmean prema kriteriju SEM–SWC. Naime, u pilot-fazi SEM < SWC utvrđen je u drugoj i trećoj rundi, dok je u ukupnom uzorku taj uvjet bio prisutan u sve tri runde. Budući da glavno eksperimentalno istraživanje uključuje i sportaše koji su već bili procijenjeni u pilot-fazi, ovaj rezultat predstavlja proširenje prethodne karakterizacije, a ne potvrdu dobivenu na neovisnom uzorku. Rezultati stoga pokazuju da ISmean ima dobru reproducibilnost u primijenjenim standardiziranim uvjetima i povoljnu osjetljivost prema kriteriju SEM–SWC, uz napomenu da MDC_{95} veći od SWC-a ograničava interpretaciju promjena malog opsega na razini pojedinačnog sportaša.

Dodatni element proizlazi iz usporedbe natjecateljskih razina. Elitni boksači ostvarili su ukupno viši Intensity Score od neelitnih boksača, što pokazuje da je ova mjera mogla

razlikovati dvije skupine u očekivanom smjeru. Rezultati ove vrste korišteni su i u literaturi o testovima specifičnima za sport u borilačkim sportovima kao dokaz sposobnosti testa da razlikuje sportaše različite razine izvedbe (Chaabene et al., 2018). U našem istraživanju ovaj rezultat stoga pruža početnu potporu diskriminativnoj sposobnosti Intensity Scorea, ograničeno na ispitivanu populaciju i uvjete.

Struktura RPAT-a pridonosi objašnjenju opažene dobre reproducibilnosti. Protokol, naime, uključuje standardizirani boksački zadatak koji se sastoji od ponavljanih sekvenci direktnih udaraca izvedenih na boksačkoj vreći visokim intenzitetom, uz standardizirano trajanje rada i oporavka. Takva struktura omogućuje procjenu mehaničkog intenziteta uzastopnih udaraca i povezanih fizioloških odgovora u jednakim uvjetima. Istodobno, RPAT reproducira samo dio zahtjeva natjecanja. Tijekom borbe prisutni su protivnik, napadačke i obrambene akcije, kretanja, taktičke odluke i kontinuirane promjene ritma aktivnosti. RPAT se stoga može smatrati protokolom reprezentativnim za specifičan, ponavljani i standardizirani boksački zadatak, iako ne reproducira sve zahtjeve i varijabilnost koji obilježavaju borbu.

Pri interpretaciji Intensity Scorea također je potrebno uzeti u obzir karakteristike sustava Hykso korištenog za bilježenje mehaničkog intenziteta udaraca. Omcirk et al. (2023), uspoređujući različite komercijalne senzore za praćenje udaraca s mjerenjima dobivenima trodimenzionalnim sustavom analize pokreta i platformom sile, za Hykso su utvrdili umjerenu podudarnost s mjerenjima brzine i slabu povezanost s vršnom silom. Autori su također istaknuli da neke informacije o algoritmima koje koriste komercijalni uređaji nisu javno dostupne. Ta su ograničenja relevantna za interpretaciju rezultata dobivenih u ovom istraživanju.

Intensity Score stoga treba interpretirati u skladu s onime što stvarno predstavlja: kompozitni indeks koji sustav Hykso generira iz inercijskih podataka zabilježenih tijekom izvođenja udaraca te stoga ne predstavlja izravnu mjeru sile udarca ili snage udarca. Budući da su Omcirk et al. (2023) ispitivali specifične izlazne pokazatelje uređaja, uključujući brzinu, njihovi se rezultati ne mogu izravno prenijeti na Intensity Score korišten u ovom istraživanju. Naši rezultati pokazuju da je ovaj indeks reproducibilan u standardiziranim uvjetima RPAT-a, ali ne omogućuju utvrđivanje njegove podudarnosti s određenom izravno izmjerenom mehaničkom veličinom.

Stoga glavno eksperimentalno istraživanje proširuje nalaze pilot-faze pokazujući da su glavne varijable zabilježene tijekom RPAT-a reproducibilne u primijenjenim standardiziranim uvjetima. Intensity Score također je pokazao povoljnu osjetljivost prema kriteriju SEM–SWC te razlike između elitnih i neelitnih boksača. Ovi rezultati dodatno podupiru metodološku karakterizaciju RPAT-a, ali ih je potrebno interpretirati uzimajući u obzir standardiziranu prirodu zadatka i karakteristike sustava korištenog za kvantificiranje mehaničkog intenziteta udaraca. Dobiveni dokazi podupiru primjenu RPAT-a za procjenu mehaničkog intenziteta uzastopnih udaraca i povezanih fizioloških odgovora u standardiziranim uvjetima, pridonoseći progresivnoj metodološkoj karakterizaciji protokola. Međutim, oni ne omogućuju da se RPAT definira kao potpuno validiran protokol. Jednako tako, Intensity Score treba interpretirati kao indeks mehaničkog intenziteta udaraca, a ne kao izravnu mjeru sile ili snage udarca.

6.4 Neuromuskularne karakteristike donjih ekstremiteta i mehanički intenzitet pojedinačnog udarca

Mjere mišićno-tetivne krutosti u statičkim uvjetima specifičnih anatomskih regija dominantnog donjeg ekstremiteta pokazale su dobru reproducibilnost između dviju sesija, uz općenito nisku varijabilnost. Ovaj je rezultat u skladu s dostupnom literaturom o primjeni uređaja MyotonPRO, u kojoj je zabilježena dobra pouzdanost mjera mišićno-tetivne krutosti donjih ekstremiteta (Chen et al., 2019; Tas & Salkin, 2019). Sumarno, ovi dokazi podupiru dobru stabilnost mjera krutosti dobivenih u standardiziranim uvjetima primijenjenima u ovom istraživanju.

Ispitivani odnosi između neuromuskularnih karakteristika donjih ekstremiteta i mehaničkog intenziteta pojedinačnog udarca u cjelini su pokazali selektivan obrazac, s ograničenim brojem povezanosti koje su ostale prisutne. One su se odnosile na procijenjenu relativnu vršnu siluu testovima skokova u odnosu na vršnu brzinu lijevog krošea te na krutost patelarne tetive u odnosu na srednji Intensity Score desnog krošea. Odnosi između karakteristika sile donjih ekstremiteta i izvedbe udarca imaju opću potporu u literaturi o boksu. Prethodna istraživanja izvijestila su o povezanostima između karakteristika sile donjih ekstremiteta i

sile ili brzine udarca (Dunn et al., 2022a; Loturco et al., 2016). Međutim, u ovom istraživanju odnos s vršnom brzinom lijevog krošea pokazao je različit obrazac između dviju vrsta skokova: veća procijenjena relativna vršna sila tijekom rJ bila je povezana s većom srednjom i maksimalnom vršnom brzinom lijevog krošea, dok je veća procijenjena relativna vršna sila tijekom rCMJ-a bila povezana s manjom srednjom i maksimalnom vršnom brzinom lijevog krošea.

Moguće objašnjenje različitih povezanosti utvrđenih tijekom rCMJ-a i rJ-a moglo bi se odnositi na različit kut pregibanja donjih ekstremiteta predviđen u dvjema primijenjenim vrstama skoka. Literatura, naime, pokazuje da su različiti kutovi pregibanja tijekom pripremnog pokreta povezani s razlikama u karakteristikama sile ostvarene tijekom skoka, pri čemu su vrijednosti vršne sile općenito veće kada je pregibanje manje izraženo (Kirby et al., 2011; McHugh et al., 2024). Uzimajući u obzir doprinos donjih ekstremiteta izvođenju udarca, može se pretpostaviti da različiti kutovi pregibanja donjih ekstremiteta mogu biti na različit način povezani s izvedbom udarca. Međutim, u ovom istraživanju nisu procjenjivani zglobni kutovi tijekom izvođenja krošea te stoga nije moguće utvrditi mogu li se različite povezanosti opažene tijekom rCMJ-a i rJ-a doista pripisati tom aspektu.

Suprotan smjer povezanosti opaženih između procijenjene relativne vršne sile u testovima rCMJ i rJ te srednje i maksimalne vršne brzine lijevog krošea stoga zahtijeva osobit oprez pri interpretaciji. Ovi specifični rezultati, u okviru provedenih eksplorativnih analiza, mogu se smatrati korisnima za oblikovanje hipoteza koje je potrebno provjeriti u budućim istraživanjima, a ne konačnim dokazima o odnosima između razmatranih varijabli.

Druga povezanost koja je ostala prisutna odnosila se na krutost patelarne tetive, koja je bila negativno povezana sa srednjim Intensity Scoreom desnog krošea. Ovaj rezultat pokazuje da su u ispitivanom uzorku više vrijednosti krutosti patelarne tetive bile povezane s nižim srednjim Intensity Scoreom desnog krošea.

Međutim, interpretacija ove povezanosti zahtijeva oprez. Odnos između tetivne krutosti i izvedbe, naime, ne čini se jednoznačnim i može ovisiti o karakteristikama specifičnog motoričkog zadatka. Konkretno, veća krutost nije nužno uvijek povezana s boljom izvedbom. Murtagh et al. (2018), proučavajući patelarnu tetivu kod elitnih nogometaša,

utvrdili su da se odnos između svojstava tetive i izvedbe razlikovao ovisno o smjeru izvedenog skoka.

Određeni dokazi također upućuju na to da različite razine tetivne krutosti mogu biti povoljnije ovisno o karakteristikama razmatrane aktivnosti (Lichtwark & Wilson, 2007). U pokušaju interpretacije rezultata utvrđenog u ovom istraživanju može se stoga pretpostaviti da bi i u boksačkoj izvedbi mogao postojati raspon krutosti patelarne tetive koji je više ili manje povoljan za izvedbu udarca. Međutim, ta mogućnost ostaje hipoteza koju je potrebno provjeriti, a ne zaključak koji se može izravno izvesti iz naših rezultata. Naime, pojedinačna negativna povezanost utvrđena između krutosti patelarne tetive i srednjeg Intensity Scorea desnog krošea ne omogućuje utvrđivanje postojanja, a još manje određivanje, mogućeg raspona krutosti patelarne tetive koji bi bio povoljniji za izvedbu udarca.

Nasuprot tome, nisu ostale prisutne povezanosti između mišićno-tetivne krutosti u statičkim uvjetima specifičnih anatomskih regija dominantnog donjeg ekstremiteta i glavnih parametara eksplozivne snage dobivenih testovima skokova. Ovaj rezultat u ispitivanom uzorku ne podupire postojanje konzistentnih odnosa između razmatranih mjera krutosti i glavnih parametara eksplozivne snage procijenjenih putem rCMJ-a i rJ-a.

Međutim, rezultat je potrebno interpretirati uzimajući u obzir da odnosi između krutosti i izvedbe skokova zabilježeni u literaturi nisu ujednačeni. Gervasi et al. (2022), koristeći MyotonPRO, izvijestili su o povezanostima između mišićno-tetivne krutosti donjih ekstremiteta i pojedinih parametara izvedbe u drop jumpu kod mladih košarkaša. Wdowski et al. (2023), koristeći miometriju, utvrdili su povezanosti između pojedinih mišićno-tetivnih svojstava donjih ekstremiteta i izvedbe u countermovement jumpu. Nasuprot tome, Konrad i Paternoster (2022), koristeći Myoton, nisu utvrdili značajne povezanosti između mjera mišićne i tetivne krutosti donjih ekstremiteta i parametara izvedbe u drop jumpu i countermovement jumpu. Dostupni dokazi stoga pokazuju heterogene rezultate u pogledu odnosa između mišićno-tetivne krutosti i izvedbe u testovima skokova (Gervasi et al., 2022; Wdowski et al., 2023; Konrad & Paternoster, 2022).

U tom kontekstu izostanak povezanosti koje su ostale prisutne u ovom istraživanju ne isključuje moguću ulogu mišićno-tetivnih svojstava u eksplozivnoj izvedbi donjih

ekstremiteta, nego pokazuje da razmatrane mjere krutosti nisu pokazale značajne odnose s glavnim procijenjenim parametrima eksplozivne snage.

Stoga se jasno može istaknuti da rezultati istraživanja opisuju selektivne odnose, a ne opću povezanost između neuromuskularnih karakteristika donjih ekstremiteta i mehaničkog intenziteta pojedinačnog udarca. Povezanosti koje su ostale prisutne specifično su se odnosile na procijenjenu relativnu vršnu silu u testovima skokova u odnosu na srednju i maksimalnu vršnu brzinu lijevog krošea te na krutost patelarne tetive u odnosu na srednji Intensity Score desnog krošea, dok nisu utvrđeni konzistentni odnosi između mišićno-tetivne krutosti u statičkim uvjetima specifičnih anatomskih regija dominantnog donjeg ekstremiteta i glavnih parametara eksplozivne snage donjih ekstremiteta. S obzirom na eksplorativnu prirodu analiza, ovi rezultati predstavljaju nalaze koje je potrebno dodatno istražiti u budućim istraživanjima, a ne konačne dokaze o odnosima između razmatranih varijabli.

Što se tiče mišićno-tetivne krutosti u statičkim uvjetima specifičnih anatomskih regija dominantnog donjeg ekstremiteta, muškarci su pokazali više vrijednosti od žena za lateralni gastroknemijus, ravni bedreni mišić i lateralni široki mišić. Za Ahilovu i patelarnu tetivu, nasuprot tome, vrijednosti nisu pokazale jasne razlike između muškaraca i žena. Ni usporedba između elitnih i neelitnih boksača nije pokazala razlike u procijenjenim anatomskim regijama.

Veća mišićna krutost utvrđena kod muškaraca u skladu je s prethodnim istraživanjima provedenima primjenom miometrije. Lee et al. (2021), koristeći MyotonPRO kod mladih odraslih osoba, izvijestili su o većoj mišićnoj krutosti u mirovanju kod muškaraca u odnosu na žene za ravni bedreni mišić, biceps femoris i medijalni gastroknemijus. Tas i Salkin (2019) također su utvrdili veću krutost gastroknemijusa kod muškaraca, iako je u istom istraživanju razlika bila prisutna i na razini Ahilove tetive. Nedavni sustavni pregled s metaanalizom pokazao je ukupno više vrijednosti kod muškaraca za Ahilovu i patelarnu tetivu, uz istodobno isticanje znatne heterogenosti među istraživanjima (Taş et al., 2025).

Izostanak razlika između elitnih i neelitnih boksača u mjerama krutosti u skladu je i s istraživanjima provedenima u drugim sportskim populacijama. Pruyn et al. (2015), uspoređujući igračice netball-a različitih natjecateljskih razina, nisu utvrdili značajne razlike među skupinama u mjerama pasivne krutosti dobivenima miometrijom, dok su elitne

sportašice pokazale veću vertikalnu krutost tijekom ponavljanih skokova u odnosu na rekreativne sportašice. U novijem istraživanju López-Laval et al. (2021), uspoređujući elitne, subelitne i rekreativne bicikliste, nisu utvrdili razlike među skupinama u pasivnoj krutosti ravnog bedrenog mišića, lateralnog širokog mišića, bicepsa femorisa i lateralnog gastroknemijusa procijenjenoj uređajem MyotonPRO prije inkrementalnog testa na biciklističkom ergometru. Iako je riječ o različitim sportskim populacijama i protokolima, ti su rezultati u skladu s nalazima ovog istraživanja i pokazuju da sportaši različite natjecateljske razine ne moraju nužno pokazivati razlike u mjerama krutosti procijenjenima miometrijom.

Razlike između muškaraca i žena utvrđene su i u glavnim parametrima eksplozivne snage donjih ekstremiteta. Tijekom rCMJ-a muškarci su pokazali kraće vrijeme kontakta i kraće trajanje koncentrične faze, uz dulje vrijeme leta, veću procijenjenu relativnu vršnu silu i veći procijenjeni rate of force development u odnosu na žene. Tijekom rJ muškarci su pokazali dulje vrijeme leta i dulje trajanje ekscentrične faze, dok su žene pokazale veći ritam skokova. U cjelini, rezultati rCMJ-a i rJ-a pokazuju razlike između muškaraca i žena u više parametara eksplozivne izvedbe, s općenito višim vrijednostima kod muškaraca, iako obrazac nije bio ujednačen za sve razmatrane varijable.

Opaženi obrazac u skladu je s novijim dokazima koji pokazuju razlike između muškaraca i žena u različitim karakteristikama izvedbe skoka. Thomas et al. (2022), uspoređujući muškarce i žene s usporedivim razinama relativne snage, kod muškaraca su utvrdili veću visinu countermovement jumpa, praćenu većom srednjom silom, impulsom i brzinom u propulzivnoj fazi. U novijem istraživanju Lin et al. (2025), analizirajući košarkaše i košarkašice te odbojkaše i odbojkašice, pokazali su da izvedba countermovement jumpa proizlazi iz interakcije karakteristika sile, brzine i vremena, čija se važnost može razlikovati i ovisno o spolu i sportskoj disciplini. Stoga su ovi dokazi u skladu s razlikama utvrđenima u ovom istraživanju, istodobno pokazujući da se karakteristike izvedbe skoka ne moraju nužno ujednačeno razlikovati između muškaraca i žena.

Za razliku od razlika utvrđenih između muškaraca i žena, glavni parametri eksplozivne snage pokazali su uglavnom sličan obrazac između elitnih i neelitnih boksača. Među razmatranim parametrima samo je vrijeme leta tijekom rJ-a bilo veće kod elitnih nego kod neelitnih

boksača. Budući da je vrijeme leta izravno povezano s izvedbom skoka i u boksu (Chen et al., 2023), opaženi rezultat mogao bi ukazivati na bolju vertikalnu izvedbu elitnih u odnosu na neelitne sportaše. Međutim, s obzirom na eksplorativnu prirodu analiza i uglavnom sličan obrazac utvrđen za ostale parametre rCMJ-a i rJ-a, ovaj pojedinačni rezultat treba interpretirati s oprezom i ne omogućuje utvrđivanje opće razlike između elitnih i neelitnih boksača u glavnim procijenjenim parametrima eksplozivne snage.

Razlike između muškaraca i žena utvrđene su i pri izvođenju pojedinačnog udarca. Muškarci su pokazali više vrijednosti od žena i za srednji i za maksimalni Intensity Score desnog i lijevog krošea. Za vršnu brzinu, nasuprot tome, smjer razlika razlikovao se između dvaju krošea: muškarci su pokazali veću srednju i maksimalnu vršnu brzinu desnog krošea, dok su žene pokazale veću srednju i maksimalnu vršnu brzinu lijevog krošea.

Razlike utvrđene u vršnoj brzini krošea imaju samo djelomičnu potporu u novijoj literaturi. Xu et al. (2024), uspoređujući boksače i boksačice, izvijestili su o većoj brzini stražnjeg krošea kod muškaraca. Taj je rezultat u skladu s većom vršnom brzinom desnog krošea utvrđenom kod muškaraca u ovom istraživanju, ali nije u skladu s većom vršnom brzinom lijevog krošea utvrđenom kod žena. U nedostatku dovoljno specifičnih dokaza, dostupni podaci ne omogućuju objašnjenje različitog obrasca opaženog između dvaju krošea.

Zanimljiv aspekt odnosi se i na različit obrazac Intensity Scorea i vršne brzine lijevog krošea. Naime, za taj su udarac muškarci pokazali više vrijednosti i srednjeg i maksimalnog Intensity Scorea, dok su žene pokazale više vrijednosti i srednje i maksimalne vršne brzine.

Za razliku od razlika utvrđenih između muškaraca i žena, nisu utvrđene jasne razlike između elitnih i neelitnih boksača u srednjem i maksimalnom Intensity Scoreu ni u srednjoj i maksimalnoj vršnoj brzini dvaju krošea. Ovaj je rezultat osobito zanimljiv kada se razmotri zajedno s nalazima tijekom RPAT-a, u kojem su elitni sportaši ukupno pokazali veći mehanički intenzitet uzastopnih udaraca od neelitnih sportaša. Međutim, ta dva rezultata proizlaze iz različitih zadataka: s jedne strane iz izvođenja pojedinačnih krošea, a s druge iz ponavljanih i standardiziranih sekvenci direktnih udaraca tijekom intervalnog opterećenja. Razlika između elitnih i neelitnih boksača utvrđena u srednjem Intensity Scoreu uzastopnih udaraca tijekom RPAT-a stoga nije utvrđena u srednjem i maksimalnom Intensity Scoreu ni u srednjoj i maksimalnoj vršnoj brzini pojedinačnih udaraca krošeom. Ovaj različiti obrazac

upućuje na potrebu za oprezom pri izravnom poistovjećivanju rezultata dobivenih u dvama načinima izvođenja.

Pri interpretaciji ovog rezultata potrebno je uzeti u obzir i karakteristike mjerenja pomoću inercijskih senzora. Sposobnost uređaja za praćenje udaraca da prepoznaju udarce može se, naime, razlikovati ovisno o vrsti udarca. Konkretno, za Hykso je zabilježena veća sposobnost prepoznavanja direktnih udaraca u odnosu na krošee i aperkate (Omcirk et al., 2021). Ovaj dokaz stoga upućuje na potrebu za oprezom pri izravnoj usporedbi mjera dobivenih istim uređajem tijekom izvođenja različitih vrsta udaraca.

Odnosi između mišićno-tetivne krutosti u statičkim uvjetima specifičnih anatomskih regija dominantnog donjeg ekstremiteta, glavnih parametara eksplozivne snage i mehaničkog intenziteta pojedinačnog udarca pokazali su se selektivnima, bez općih povezanosti između razmatranih varijabli. Istodobno, muškarci i žene pokazali su razlike u više mjera mišićne krutosti, nekim od glavnih parametara eksplozivne snage donjih ekstremiteta i nekim pokazateljima mehaničkog intenziteta pojedinačnog udarca.

Natjecateljska razina, nasuprot tome, pokazala je manje diferenciran obrazac u varijablama razmatranima u ovom dijelu istraživanja. Elitni i neelitni boksači nisu pokazali jasne razlike u mjerama mišićno-tetivne krutosti u statičkim uvjetima ni u srednjem i maksimalnom Intensity Scoreu ili srednjoj i maksimalnoj vršnoj brzini pojedinačnih krošea, dok je među glavnim parametrima eksplozivne snage samo vrijeme leta tijekom rJ-a bilo veće kod elitnih boksača. U cjelini se stoga pojavljuje neujednačen obrazac, obilježen povezanostima između procijenjene relativne vršne sile tijekom rCMJ-a i rJ-a i srednje i maksimalne vršne brzine lijevog krošea te između krutosti patelarne tetive i srednjeg Intensity Scorea desnog krošea, uz šire izražene razlike između muškaraca i žena te ograničenije razlike između elitnih i neelitnih boksača.

6.5 Integracija triju faza istraživanja: Sustavni pregled → Pilot istraživanje → Glavno eksperimentalno istraživanje

Sustavni pregled, kao prva faza istraživanja, pokazao je izraženu metodološku heterogenost i ograničenu integraciju između pokazatelja izvedbe udarca, fizioloških odgovora i neuromuskularnih karakteristika donjih ekstremiteta. Konkretno, odnosi između izvedbe udarca i fizioloških odgovora još su uvijek bili nedovoljno analizirani na integriran način; neuromuskularne karakteristike donjih ekstremiteta bile još su uvijek bile istražene u ograničenoj mjeri, pretežno putem parametara eksplozivne snage; nadalje, nijedno od uključenih istraživanja nije izvijestilo o izravnim mjerenjima mišićno-tetivne krutosti donjih ekstremiteta u boksu. Sustavni pregled također je istaknuo potrebu za detaljnijim istraživanjem uloge spola i natjecateljske razine. Navedeni podaci su definirali znanstveni okvir iz kojeg su razvijene sljedeće eksperimentalne faze istraživanja.

U tom je okviru pilot-istraživanje predstavljalo prvu eksperimentalnu fazu usmjerenu na detaljnije istraživanje jednog od glavnih nedostataka utvrđenih sustavnim pregledom, kroz zajedničku analizu mehaničkog intenziteta uzastopnih udaraca i fizioloških odgovora tijekom izvođenja RPAT-a. Ova je faza omogućila opis kretanja tih varijabli tijekom različitih rundi protokola te istraživanje mogućih odnosa i razlika povezanih sa spolom i natjecateljskom razinom. Istodobno, ponavljanje RPAT-a omogućilo je početnu metodološku karakterizaciju protokola u pogledu test–retest pouzdanosti, pogreške mjerenja i osjetljivosti. Međutim, ograničena veličina pilot-uzorka, a osobito razmatranih podskupina, smanjivala je statističku snagu, povećavala rizik od pogreške tipa II i ograničavala mogućnost generalizacije rezultata. Stoga je obrasce utvrđene u odnosu na spol i natjecateljsku razinu bilo potrebno interpretirati s oprezom i smatrati preliminarnim nalazima.

Na tim je osnovama glavno eksperimentalno istraživanje proširilo uzorak na 40 boksača, zadržavajući analizu mehaničkog intenziteta uzastopnih udaraca i fizioloških odgovora tijekom RPAT-a te nastavljajući metodološku karakterizaciju protokola u ukupnom uzorku. Istodobno, treća je faza proširila područje istraživanja uključivanjem neuromuskularnih karakteristika donjih ekstremiteta, kroz procjenu mišićno-tetivne krutosti u statičkim uvjetima specifičnih anatomskih regija dominantnog donjeg ekstremiteta i glavnih

parametara eksplozivne snage, u odnosu na mehanički intenzitet pojedinačnog udarca. Rezultati glavnog eksperimentalnog istraživanja omogućili su detaljnije razmatranje obrazaca utvrđenih u pilot-fazi, pokazujući da mehanički intenzitet uzastopnih udaraca i fiziološki odgovori pokazuju različita kretanja tijekom RPAT-a te da se njihovi odnosi mogu razlikovati između pojedinih rundi protokola. Proširenje uzorka također je omogućilo detaljnije ispitivanje razlika povezanih sa spolom i natjecateljskom razinom te nastavak metodološke karakterizacije RPAT-a. Proširenje istraživanja na neuromuskularne karakteristike donjih ekstremiteta naposljetku je pokazalo složeniji obrazac od opće povezanosti s mehaničkim intenzitetom pojedinačnog udarca, sa selektivnim povezanostima između pojedinih razmatranih varijabli i eksplorativnim rezultatima koji se odnose na razlike povezane sa spolom i natjecateljskom razinom.

Zaključno, progresija od sustavnog pregleda preko pilot-istraživanja do glavnog eksperimentalnog istraživanja omogućila je detaljnije istraživanje nekih od glavnih nedostataka utvrđenih u literaturi kroz istodobno razmatranje mehaničkih, fizioloških i neuromuskularnih pokazatelja koje su prethodna istraživanja analizirala još uvijek ograničeno ili pretežno odvojeno.

7 Znanstveni i praktični značaj te ograničenja istraživanja

7.1 Znanstveni doprinos

Glavni znanstveni doprinos ovog istraživanja proizlazi iz progresivnog i integriranog pristupa nekim od glavnih nedostataka utvrđenih sustavnim pregledom literature, kroz analizu mehaničkih, fizioloških i neuromuskularnih pokazatelja relevantnih za sportsku izvedbu u boksu. Strukturiranje istraživanja u tri uzastopne faze omogućilo je prijelaz od identifikacije dostupnih dokaza i povezanih nedostataka prema eksperimentalnoj analizi odnosa između mehaničkog intenziteta udarca, fizioloških odgovora i neuromuskularnih karakteristika donjih ekstremiteta.

Prvi doprinos odnosi se na zajedničku analizu mehaničkog intenziteta uzastopnih udaraca i fizioloških odgovora tijekom intervalnog opterećenja specifičnog za boks. Rezultati dobiveni tijekom RPAT-a omogućili su karakterizaciju kretanja mehaničkog intenziteta uzastopnih udaraca, srčane frekvencije i potrošnje kisika tijekom različitih rundi protokola te detaljnije ispitivanje odnosa između tih varijabli. Konkretno, dobiveni dokazi pokazuju da razmatrani fiziološki odgovori ne pokazuju ujednačen odnos s mehaničkim intenzitetom uzastopnih udaraca, pridonoseći složenijem razumijevanju interakcije između mehaničkog outputa i fizioloških zahtjeva tijekom ponavljanih napora specifičnih za boks.

Dodatni doprinos odnosi se na progresivnu metodološku karakterizaciju RPAT-a. Procjena test–retest pouzdanosti, pogreške mjerenja i osjetljivosti glavnih varijabli zabilježenih tijekom protokola, prvotno provedena u pilot-fazi i naknadno proširena na ukupni uzorak, pružila je korisne informacije za interpretaciju promjena zabilježenih tijekom testa. U ukupnom uzorku također su razmotreni preliminarni dokazi koji se odnose na sadržajnu valjanost i diskriminativnu konstruktnu valjanost. Ti elementi pridonose metodološkoj karakterizaciji RPAT-a, ali ne predstavljaju njegovu sveobuhvatnu validaciju.

Istraživanje je također pridonijelo proširenju spoznaja o neuromuskularnim karakteristikama donjih ekstremiteta u boksu. Konkretno, uključivanje mišićno-tetivne krutosti u statičkim uvjetima specifičnih anatomskih regija dominantnog donjeg ekstremiteta, zajedno s glavnim parametrima eksplozivne snage, omogućilo je istraživanje područja koje je sustavni pregled identificirao kao još uvijek nedovoljno istraženo. Utvrđeni odnosi s pokazateljima

mehaničkog intenziteta pojedinačnog udarca pokazali su obrazac ograničenih i specifičnih, a ne općih povezanosti, pridonoseći razlikovanju moguće uloge specifičnih neuromuskularnih karakteristika od širih interpretacija koje rezultati ne podupiru.

Naposljetku, uključivanje boksača različitog spola i natjecateljske razine omogućilo je detaljnije ispitivanje varijabilnosti mehaničkih, fizioloških i neuromuskularnih pokazatelja razmatranih u istraživanju. Utvrđene razlike pružile su dodatne elemente za interpretaciju sportske izvedbe u boksu, uz potrebu za oprezom zbog veličine podskupina i eksplorativne prirode pojedinih provedenih analiza.

Stoga je razvidno da se znanstveni doprinos istraživanja sastoji u razvoju integriranijeg okvira za analizu sportske izvedbe u boksu, povezivanjem mehaničkog intenziteta uzastopnih udaraca s fiziološkim odgovorima tijekom intervalnog opterećenja specifičnog za boks te proširenjem istraživanja na neuromuskularne karakteristike donjih ekstremiteta i mehanički intenzitet pojedinačnog udarca. Dobiveni rezultati tako pridonose smanjenju fragmentiranosti prethodno dostupnih dokaza i pružaju empirijsku i metodološku osnovu za buduća istraživanja usmjerena na integriranu procjenu sportske izvedbe u boksu.

7.2 Praktične implikacije

Glavne praktične implikacije ovog istraživanja odnose se na procjenu i praćenje sportske izvedbe u boksu kroz integrirani i individualiziraniji pristup. Rezultati dobiveni u različitim fazama istraživanja pokazuju da se sportska izvedba u boksu ne može sveobuhvatno opisati jednim pokazateljem, nego je za njezin opis korisno zajedničko razmatranje mehaničkih, fizioloških i neuromuskularnih pokazatelja.

Prije svega, rezultati RPAT-a pokazuju korisnost zajedničke procjene mehaničkog intenziteta uzastopnih udaraca i fizioloških odgovora. Mehanički intenzitet udaraca, srčana frekvencija i potrošnja kisika pokazali su različita kretanja i odnose tijekom protokola, što ukazuje na to da svaka varijabla pridonosi opisivanju specifičnih aspekata odgovora sportaša. U praktičnom smislu, zajednička procjena tih varijabli može omogućiti interpretaciju sposobnosti boksača da održava mehanički intenzitet ponavljanih udaraca u

odnosu na istodobne fiziološke zahtjeve, pružajući cjelovitiji i individualiziraniji uvid u sportsku izvedbu u boksu tijekom izvođenja protokola.

Drugo područje praktične primjene odnosi se na praćenje sportske izvedbe tijekom vremena. Informacije dobivene o test–retest pouzdanosti, pogrešci mjerenja i osjetljivosti upućuju na potencijalnu primjenu RPAT-a u praćenju sportske izvedbe tijekom vremena. Međutim, takva primjena zahtijeva daljnja longitudinalna istraživanja jer u ovom istraživanju nije izravno provjerena sposobnost protokola da otkrije promjene sportske izvedbe povezane s treningom.

Dodatno područje praktične primjene odnosi se na razlike utvrđene u pojedinim varijablama s obzirom na spol i natjecateljsku razinu. Ovi rezultati upućuju na to da spol i natjecateljska razina mogu predstavljati korisne elemente koje treba uzeti u obzir pri interpretaciji vrijednosti zabilježenih kod pojedinog boksača. Procjena koja uzima u obzir te razlike mogla bi pružiti korisne informacije za usmjeravanje buduće individualizacije programiranja treninga, uz potporu dodatnih dokaza.

U široj perspektivi rezultati istraživanja mogu pridonijeti budućem razvoju integriranih modela procjene i praćenja sportske izvedbe u boksu. Takvi bi modeli mogli integrirati informacije o mehaničkom intenzitetu udarca, fiziološkim odgovorima i neuromuskularnim karakteristikama donjih ekstremiteta, pridonoseći cjelovitijoj procjeni izvedbenog profila sportaša.

Stoga se može zaključiti da se praktične implikacije istraživanja prvenstveno odnose na integriranu procjenu sportske izvedbe u boksu, praćenje njezinih glavnih pokazatelja tijekom vremena te interpretaciju rezultata koja uzima u obzir i spol i natjecateljsku razinu. Ti elementi mogu pridonijeti razvoju integriranih i individualiziranih postupaka procjene i praćenja te pružiti osnovu za buduće primjene u području programiranja treninga.

7.3 Ograničenja istraživanja

Ovo istraživanje ima određena ograničenja koja je potrebno uzeti u obzir pri interpretaciji rezultata. Ta se ograničenja odnose kako na karakteristike pojedinih faza istraživanja tako i na određene metodološke aspekte zajedničke procjeni sportske izvedbe u boksu.

Što se tiče sustavnog pregleda, izražena heterogenost uključenih istraživanja u pogledu karakteristika uzoraka, dizajna istraživanja, eksperimentalnih protokola, mjernih instrumenata i analiziranih ishoda ograničila je izravnu usporedivost dostupnih dokaza i nije omogućila provedbu metaanalize. Pretraživanje literature provedeno je korištenjem baza PubMed i Google Scholar, slobodno dostupnih izvora, budući da nije bio dostupan institucionalni pristup bibliografskim i citatnim bazama podataka kao što su Scopus i Web of Science. To je ograničenje moglo smanjiti obuhvat relevantne literature, a time i potpunost prikupljenih dokaza. Nadalje, protokol sustavnog pregleda nije bio unaprijed registriran u javno dostupnom registru, što predstavlja dodatno ograničenje u pogledu metodološke transparentnosti. Nadalje, sustavni pregled nije uključivao formalnu procjenu metodološke kvalitete i rizika od pristranosti uključenih istraživanja. Sintezu dokaza stoga je potrebno interpretirati uzimajući u obzir različitu metodološku robusnost dostupnih istraživanja.

Veličina uzorka predstavlja dodatni element koji treba uzeti u obzir u eksperimentalnim fazama. U pilot-istraživanju uzorak od 20 boksača i podjela na podskupine od pet sudionika ograničili su statističku snagu analiza koje su se odnosile na spol i natjecateljsku razinu te mogućnost generalizacije rezultata. Proširenje uzorka na 40 sudionika u glavnom eksperimentalnom istraživanju omogućilo je detaljnije ispitivanje tih analiza, ali je u svakoj podskupini i dalje bilo 10 sudionika. Rezultate koji se odnose na razlike povezane sa spolom i natjecateljskom razinom, a osobito na njihove moguće interakcije, stoga je potrebno interpretirati s oprezom.

Dodatno ograničenje odnosi se na RPAT. Protokol omogućuje analizu mehaničkog intenziteta uzastopnih udaraca i fizioloških odgovora tijekom intervalnog zadatka specifičnog za boks koji se izvodi u standardiziranim uvjetima, ali ne reproducira cjelokupnu složenost stvarne borbe. Konkretno, ne uključuje interakciju s protivnikom ni varijabilnost napadačkih, obrambenih i taktičkih akcija koje obilježavaju natjecanje. Rezultati dobiveni

tijekom RPAT-a stoga se trebaju odnositi na specifične uvjete u kojima je protokol proveden i ne mogu se smatrati potpuno reprezentativnima za stvarnu borbu.

Iako su prije početka RPAT-a provjereni pravilno postavljanje i pričvršćivanje maske za lice, nije moguće u potpunosti isključiti moguće smetnje pri mjerenju potrošnje kisika uzrokovane pokretima glave i mogućim pomicanjem maske tijekom izvođenja protokola. Stoga se taj potencijalni izvor instrumentalne pogreške mora uzeti u obzir pri interpretaciji vrijednosti VO_2.

Metodološka karakterizacija RPAT-a također ima određena ograničenja. Iako su analizirane test–retest pouzdanost, pogreška mjerenja i osjetljivost glavnih varijabli zabilježenih tijekom protokola, dokazi koji se odnose na valjanost ostaju preliminarni i ograničeni na sadržajnu valjanost i diskriminativnu konstruktnu valjanost razmatrane u ukupnom uzorku. Ti rezultati pridonose progresivnoj metodološkoj karakterizaciji RPAT-a, ali ne omogućuju da se RPAT smatra potpuno validiranim protokolom.

Dodatni aspekt odnosi se na mjerenje mehaničkog intenziteta udarca pomoću srednjeg Intensity Scorea. Taj je parametar kompozitni indeks koji sustav Hykso generira iz inercijskih podataka zabilježenih tijekom izvođenja udaraca. Potpuna struktura algoritma korištenog za njegov izračun nije javno dostupna, a srednji Intensity Score ne predstavlja izravnu mjeru sile udarca ili snage udarca. Rezultate koji se odnose na ovaj pokazatelj stoga je potrebno interpretirati kao izraz mehaničkog intenziteta izvedenog iz korištenog sustava, što ograničava izravnu usporedbu s istraživanjima koja se temelje na različitim uređajima ili laboratorijskim mjernim instrumentima.

Dodatno ograničenje odnosi se na procjenu pojedinih dinamičkih parametara testova skokova pomoću sustava Gyko. Konkretno, relativna vršna sila i rate of force development korišteni u analizama nisu izravno izmjereni pomoću platforme sile, nego ih je softver sustava procijenio na temelju signala zabilježenih inercijskim senzorom. Nadalje, nisu pronađeni dokazi o valjanosti specifični za te ishode u uvjetima procjene primijenjenima u ovom istraživanju. Rezultate koji se odnose na procijenjenu relativnu vršnu silu i procijenjeni rate of force development stoga je potrebno interpretirati s oprezom.

Iako su mjere krutosti u statičkim ili pasivnim uvjetima u literaturi korištene i u istraživanjima eksplozivne izvedbe i izvedbe skokova, one opisuju konstrukt koji se razlikuje od dinamičke ili funkcionalne krutosti izražene tijekom aktivnosti koje se temelje na ciklusu istezanja i skraćivanja. Dobivene rezultate stoga je potrebno interpretirati s oprezom i specifično u odnosu na mišićno-tetivnu krutost procijenjenu u uvjetima primijenjenima u ovom istraživanju.

Analize odnosa između neuromuskularnih karakteristika donjih ekstremiteta i mehaničkog intenziteta pojedinačnog udarca, kao i analize razlika s obzirom na spol i natjecateljsku razinu u varijablama razmatranima u drugom dijelu eksperimentalnog istraživanja, također su bile eksplorativne prirode. Rezultate proizašle iz tih analiza stoga je potrebno interpretirati kao preliminarne dokaze i provjeriti u budućim istraživanjima s većim uzorcima.

Naposljetku, opservacijski dizajn istraživanja omogućuje utvrđivanje povezanosti i razlika između razmatranih varijabli, ali ne omogućuje utvrđivanje uzročnih odnosa. Konkretno, povezanosti utvrđene između neuromuskularnih karakteristika donjih ekstremiteta i mehaničkog intenziteta udarca ne omogućuju zaključak da promjena određene karakteristike dovodi do odgovarajuće promjene izvedbe udarca. Jednako tako, istraživanje nije izravno procjenjivalo učinke specifičnih programa treninga na razmatrane varijable.

Dodatni izvori individualne varijabilnosti, uključujući težinsku kategoriju, taktički stil i stanje kondicijske pripremljenosti sportaša, nisu bili posebno kontrolirani i mogli su pridonijeti varijabilnosti opaženih odgovora. Njihovo razmatranje u budućim istraživanjima moglo bi omogućiti precizniju karakterizaciju individualnih razlika i odnosa između mehaničkih, fizioloških i neuromuskularnih pokazatelja sportske izvedbe u boksu.

Potrebno je istaknuti da navedena ograničenja definiraju kontekst unutar kojeg je potrebno interpretirati rezultate. Buduća istraživanja s većim uzorcima, longitudinalnim i intervencijskim dizajnima te dodatnom metodološkom karakterizacijom korištenih instrumenata i protokola moći će provjeriti i proširiti dokaze dobivene u različitim fazama istraživanja.

8 Zaključci

Ovo istraživanje detaljnije je ispitalo sportsku izvedbu u boksu kroz integriranu analizu mehaničkog intenziteta udarca, fizioloških odgovora i neuromuskularnih karakteristika donjih ekstremiteta. Progresija od sustavnog pregleda preko pilot-istraživanja do glavnog eksperimentalnog istraživanja omogućila je detaljnije ispitivanje odnosa između mehaničkog intenziteta uzastopnih udaraca i fizioloških odgovora tijekom RPAT-a, proširenje metodološke karakterizacije protokola u ukupnom uzorku te proširenje istraživanja na mišićno-tetivnu krutost u statičkim uvjetima specifičnih anatomskih regija dominantnog donjeg ekstremiteta, eksplozivnu snagu donjih ekstremiteta i mehanički intenzitet pojedinačnog udarca.

Tijekom RPAT-a povezanosti između mehaničkog intenziteta uzastopnih udaraca i fizioloških odgovora pokazale su obrasce specifične za pojedine runde: nakon kontrole za spol i natjecateljsku razinu, ISmean bio je pozitivno povezan s VO_2mean i negativno povezan s HRmean u prvoj i trećoj rundi, dok u drugoj rundi te povezanosti nisu zadržale statističku značajnost nakon korekcije za višestruke usporedbe. Ovi rezultati opisuju povezanosti između ispitanika (*between-subject*) i ne omogućuju zaključivanje o odnosima između promjena fizioloških odgovora unutar ispitanika (*within-subject*) i promjena mehaničkog intenziteta uzastopnih udaraca tijekom rundi. Rezultati su također omogućili detaljnije ispitivanje razlika povezanih sa spolom i natjecateljskom razinom u razmatranim varijablama.

Zaključno, dobiveni rezultati pridonose širem i integriranijem razumijevanju sportske izvedbe u boksu te pružaju osnovu za budući razvoj postupaka procjene i praćenja sportske izvedbe. Buduća istraživanja moći će dodatno učvrstiti dobivene dokaze i detaljnije ispitati moguće primjene ovih rezultata u praćenju sportske izvedbe i individualizaciji programiranja treninga.

9 Bibliografija

1. Alba-Jiménez, C., Moreno-Doutres, D., Peña, J., Raya-González, J., Castillo, D., & Yanci, J. (2022). Trends assessing neuromuscular fatigue in team sports: A narrative review. *Biology, 11*(5), 749.
2. Ando, R., & Suzuki, Y. (2019). Positive relationship between passive muscle stiffness and rapid force production. *Human movement science*, *66*, 285–291.
3. Arseneau, E., Mekary, S., & Léger, L. A. (2011). VO_2 requirements of boxing exercises. *Journal of strength and conditioning research*, *25*(2), 348–359.
4. Beattie, K., & Ruddock, A. D. (2022). The role of strength on punch impact force in boxing. *Journal of Strength and Conditioning Research, 36*(10), 2957–2969.
5. Brazier, J., Maloney, S., Bishop, C., Read, P. J., & Turner, A. N. (2019). Lower Extremity Stiffness: Considerations for Testing, Performance Enhancement, and Injury Risk. *Journal of strength and conditioning research*, *33*(4), 1156–1166.
6. Chaabène, H., Negra, Y., Bouguezzi, R., Capranica, L., Franchini, E., Prieske, O., Hbacha, H., & Granacher, U. (2018). Tests for the Assessment of Sport-Specific Performance in Olympic Combat Sports: A Systematic Review With Practical Recommendations. *Frontiers in physiology*, *9*, 386.
7. Chaabène, H., Tabben, M., Mkaouer, B., Franchini, E., Negra, Y., Hammami, M., Amara, S., Chaabène, R. B., & Hachana, Y. (2015). Amateur boxing: Physical and physiological attributes. *Sports Medicine, 45*(3), 337–352.

8. Chen, C., Ali, Z., Rashid, M. A. R., Samethanovna, M. U., Wu, G., Mukhametkali, S., & Dilnur, T. (2023). Relationship between isokinetic strength of the knee joint and countermovement jump performance in elite boxers. *PeerJ, 11*, e16521.
9. Chen, G., Wu, J., Chen, G., Lu, Y., Ren, W., Xu, W., Xu, X., Wu, Z., Guan, Y., Zheng, Y., & Qiu, B. (2019). Reliability of a portable device for quantifying tone and stiffness of quadriceps femoris and patellar tendon at different knee flexion angles. *PLoS ONE, 14*(7), e0220521.
10. Cohen, J. (1988). *Statistical power analysis for the behavioral sciences* (2nd ed.). Lawrence Erlbaum Associates.
11. Chottidao, M., Kuo, C. H., Tsai, S. C., Hwang, I. S., Lin, J. J., & Tsai, Y. S. (2022). A Comparison of Plyometric and Jump Rope Training Programs for Improving Punching Performance in Junior Amateur Boxers. *Frontiers in bioengineering and biotechnology*, *10*, 878527.
12. Currell, K., & Jeukendrup, A. E. (2008). Validity, reliability and sensitivity of measures of sporting performance. *Sports medicine (Auckland, N.Z.)*, *38*(4), 297–316.
13. de Lira, C. A., Peixinho-Pena, L. F., Vancini, R. L., de Freitas Guina Fachina, R. J., de Almeida, A. A., Andrade, M.dosS., & da Silva, A. C. (2013). Heart rate response during a simulated Olympic boxing match is predominantly above ventilatory threshold 2: a cross sectional study. *Open access journal of sports medicine*, *4*, 175–182.
14. Duarte, L. H. C., Sinhorim, L., da Silva, J. C. A., Coutinho, G. G., Mochizuki, L., Tavares, G. M. S., Schleip, R., do Nascimento, I. B., & Santos, G. M. (2026). Development of a multi-point mapping protocol for myotonometric assessment: a methodological pilot study. *Scientific reports, 16*(1), 4852.
15. Dunn, E. C., Humberstone, C. E., Franchini, E., Iredale, K. F., & Blazevich, A. J. (2022a). 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.
16. Dunn, E. C., Humberstone, C. E., Franchini, E., Iredale, K. F., & Blazevich, A. J. (2022b). The effect of fatiguing lower-body exercise on punch forces in highly-trained boxers. *European Journal of Sport Science, 22*(7), 964-972.

17. El-Ashker, S., Chaabene, H., Negra, Y., Prieske, O., & Granacher, U. (2018). Cardio-Respiratory Endurance Responses Following a Simulated 3 × 3 Minutes Amateur Boxing Contest in Elite Level Boxers. *Sports (Basel, Switzerland)*, *6*(4), 119.
18. El-Ashker, S., & Nasr, M. (2012). Effect of boxing exercises on physiological and biochemical responses of Egyptian elite boxers. *Journal of Physical Education and Sport, 12*(1), 111-116.
19. Finlay, M. J., Greig, M., Bridge, C. A., & Page, R. M. (2024). Post-Activation Performance Enhancement of Punch Force and Neuromuscular Performance in Amateur Boxing: Toward a More Individualized and "Real-World" Approach. *Journal of strength and conditioning research, 38*(6), 1063–1071.
20. Finlay, M. J., Greig, M., & Page, R. M. (2018). Quantifying the Physical Response to a Contemporary Amateur Boxing Simulation. *Journal of Strength and Conditioning Research, 32*(4), 1005-1012.
21. Finlay, M. J., Greig, M., Page, R. M., & Bridge, C. A. (2023). Acute physiological, endocrine, biochemical and performance responses associated with amateur boxing: A systematic review with meta-analysis. *European Journal of Sport Science, 23*(5), 774-788.
22. Franchini, E. (2020). High-Intensity Interval Training Prescription for Combat-Sport Athletes. *International Journal of Sports Physiology and Performance, 15*(6), 767-776.
23. Franchini, E., Cormack, S., & Y Takito, M. (2019). Effects of High-Intensity Interval Training on Olympic Combat Sports Athletes' Performance and Physiological Adaptation: A Systematic Review. *Journal of Strength and Conditioning Research, 33* (1), 242-252.
24. Gervasi, M., Benelli, P., Venerandi, R., & Fernández-Peña, E. (2022). Relationship between Muscle-Tendon Stiffness and Drop Jump Performance in Young Male Basketball Players during Developmental Stages. *International journal of environmental research and public health*, *19*(24), 17017.
25. Ghosh, A. K. (2010). Heart rate, oxygen consumption and blood lactate responses during specific training in amateur boxing. *International Journal of Applied Sports Sciences, 22*(1), 1-12.
26. Gough, L. A., Rimmer, S., Sparks, S. A., McNaughton, L. R., & Higgins, M. F. (2019). Post-exercise Supplementation of Sodium Bicarbonate Improves Acid Base Balance

Recovery and Subsequent High-Intensity Boxing Specific Performance. *Frontiers in nutrition*, *6*, 155.

27. Kacprzak, J., Mosler, D., Tsos, A., & Wasik, J. (2025). Biomechanics of punching—The impact of effective mass and force transfer on strike performance. *Applied Sciences, 15*(7), 4008.
28. Kamandulis, S., Bruzas, V., Mockus, P., Stasiulis, A., Snieckus, A., & Venckunas, T. (2018). Sport-Specific Repeated Sprint Training Improves Punching Ability and Upper-Body Aerobic Power in Experienced Amateur Boxers. *Journal of strength and conditioning research*, *32*(5), 1214–1221.
29. Kirby, T. J., McBride, J. M., Haines, T. L., & Dayne, A. M. (2011). Relative net vertical impulse determines jumping performance. *Journal of applied biomechanics*, *27*(3), 207–214.
30. Konrad, A., & Paternoster, F. K. (2022). No association between jump parameters and tissue stiffness in the quadriceps and triceps surae muscles in recreationally active young adult males. *Applied Sciences, 12*(3), 1596.
31. Kravitz, L., Greene, L., Burkett, Z., & Wongsathikun, J. (2003). Cardiovascular response to punching tempo. *Journal of strength and conditioning research*, *17*(1), 104–108.
32. Lee, Y., Kim, M., & Lee, H. (2021). The measurement of stiffness for major muscles with shear wave elastography and Myoton: A quantitative analysis study. *Diagnostics, 11*(3), 524.
33. Lenetsky, S., Brughelli, M., Nates, R. J., Cross, M. R., & Lormier, A. V. (2018). Variability and Reliability of Punching Impact Kinetics in Untrained Participants and Experienced Boxers. *Journal of Strength and Conditioning Research, 32*(7), 1838-1842.
34. Lenetsky, S., Harris, N. K., & Brughelli, M. (2013). Assessment and contributors of punching forces in combat sports athletes: Implications for strength and conditioning. *Strength and Conditioning Journal, 35*(2), 1-7.
35. Lenetsky, S., Nates, R. J., Brughelli, M., & Harris, N. K. (2015). Is effective mass in combat sports punching above its weight? *Human Movement Science, 40,* 89-97.
36. Lettner, J., Królikowska, A., Ramadanov, N., Oleksy, L., Hakam, H. T., Becker, R., & Prill, R. (2024). Evaluating the Reliability of MyotonPro in Assessing Muscle Properties: A Systematic Review of Diagnostic Test Accuracy. *Medicina, 60*(6), 851.

37. Lichtwark, G. A., & Wilson, A. M. (2007). Is Achilles tendon compliance optimised for maximum muscle efficiency during locomotion? *Journal of biomechanics*, *40*(8), 1768–1775.
38. Lin, J. H., Goldstein, S., & Schroeder, E. T. (2025). Sex- and Sport-Specific Differences in Jump Strategies: Key Qualities for Jump Performance. *Sports (Basel, Switzerland)*, *13*(9), 292.
39. Loturco, I., Nakamura, F. Y., Artioli, G. G., Kobal, R., Kitamura, K., Cal Abad, C. C., Cruz, I. F., Romano, F., Pereira, L. A., & Franchini, E. (2016). Strength and power qualities are highly associated with punching impact in elite amateur boxers. *Journal of Strength and Conditioning Research, 30*(1), 109–116.
40. Loturco, I., Pereira, L. A., Kobal, R., Fernandes, V., Reis, V. P., Romano, F., Alves, M., Freitas, T. T., & McGuigan, M. (2021). Transference Effect of Short-Term Optimum Power Load Training on the Punching Impact of Elite Boxers. *Journal of strength and conditioning research, 35*(9), 2373–2378.
41. López-Laval, I., Cirer-Sastre, R., Corbi, F., & Sitko, S. (2021). Characteristics of pedaling muscle stiffness among cyclists of different performance levels. *Medicina, 57*(6), 606.
42. McHugh, M. P., Alexander Cohen, J., Orishimo, K. F., & Kremenic, I. J. (2024). Effect of Countermovement Depth on the Neuromechanics of a Vertical Jump. *Translational sports medicine*, *2024*, 7113900.
43. Microgate Srl. (2019). *Gyko Repower User Manual (Version 1.1.1)* [Software user manual]. Microgate Srl. https://microgate.it
44. Microgate Srl. (2021). *OptoJump Next User Manual (Version 1.12)* [Software user manual]. Microgate Srl. https://microgate.it
45. Murtagh, C. F., Stubbs, M., Vanrenterghem, J., O'Boyle, A., Morgans, R., Drust, B., & Erskine, R. M. (2018). Patellar tendon properties distinguish elite from non-elite soccer players and are related to peak horizontal but not vertical power. *European journal of applied physiology*, *118*(8), 1737–1749.
46. Omcirk, D., Vetrovsky, T., Padecky, J., Vanbelle, S., Malecek, J., & Tufano, J. J. (2021). Punch Trackers: Correct Recognition Depends on Punch Type and Training Experience. *Sensors (Basel, Switzerland), 21*(9), 2968.

47. Omcirk, D., Vetrovsky, T., Padecky, J., Malecek, J., & Tufano, J. J. (2023). Validity of commercially available punch trackers. *Journal of Strength and Conditioning Research, 37*(11), 2273–2281.
48. Page, M. J., McKenzie, J. E., Bossuyt, P. M., Boutron, I., Hoffmann, T. C., Mulrow, C. D., ... & Moher, D. (2021). The PRISMA 2020 statement: an updated guideline for reporting systematic reviews. *International Journal of Surgery*, 88, 105906.
49. Pereira, L. A., Romano, F., Alves, M., Mercer, V. P., Bishop, C., Franchini, E., & Loturco, I. (2023). Variations in Power Performance and Perceptual Responses to Training in Olympic Boxers Over a 7-Month Training Period. *International journal of sports physiology and performance*, *18*(4), 414–419.
50. Pinto, M., Crisóstomo, J., Kirk, C., Abián-Vicén, J., & Monteiro, L. (2025). Influence of Anthropometric Characteristics and Muscle Performance on Punch Impact. *Sports, 13*(8), 281.
51. Pruyn, E. C., Watsford, M., & Murphy, A. (2014). The relationship between lower-body stiffness and dynamic performance. *Applied physiology, nutrition, and metabolism = Physiologie appliquee, nutrition et metabolisme*, *39*(10), 1144–1150.
52. Pruyn, E. C., Watsford, M. L., & Murphy, A. J. (2015). Differences in lower-body stiffness between levels of netball competition. *Journal of strength and conditioning research, 29*(5), 1197–1202.
53. Ruddock, A., James, L., French, D., Rogerson, D., Driller, M., & Hembrough, D. (2021). High-Intensity Conditioning for Combat Athletes: Practical Recommendations. *Applied Sciences, 11*, 10658.
54. Satkunskiene, D., Bruzas, V., Mickevicius, M., Snieckus, A., & Kamandulis, S. (2024). Impact of leg strength on the force produced during a cross-punch in highly trained amateur boxers. *Journal of Strength and Conditioning Research, 38*(10), 1739-1744.
55. Schaffarczyk, M., Baumeister, J., Reer, R., & Pfeiffer, M. (2022). Validity of the Polar H10 sensor for heart rate variability analysis during resting state and incremental exercise in recreational men. *Sensors, 22*(17), 6536.
56. Secer, E., Bayram, K., & Kaya, D. O. (2026). Intra- and inter-session reliability of the MyotonPro in measuring the biomechanical and viscoelastic properties of the knee extensor and flexor muscles. *BMC sports science, medicine & rehabilitation*, *18*(1), 312.

57. Secomb, J. L., Lundgren, L. E., Farley, O. R., Tran, T. T., Nimphius, S., & Sheppard, J. M. (2015). Relationships Between Lower-Body Muscle Structure and Lower-Body Strength, Power, and Muscle-Tendon Complex Stiffness. *Journal of strength and conditioning research, 29*(8), 2221–2228.
58. Slimani, M., Chaabène, H., Davis, P., Franchini, E., Cheour, F., & Chamari, K. (2017). Performance Aspects and Physiological Responses in Male Amateur Boxing Competitions: A Brief Review. *Journal of Strength & Conditioning Research*, *31*(4), 1132–1141.
59. Söyler, M., Gürkan, A. C., Kayantaş, İ., Aydın, S., Karataş, B., Eraslan, M., Şahin, M., Küçük, H., Badau, A., & Badau, D. (2025). Investigation of the effects of different plyometric training protocols on punching force and muscle performance in male boxers. *Applied Sciences, 15*(12), 6532.
60. Stanley, E., Thomson, E., Smith, G., & Lamb, K. L. (2018). An analysis of the three-dimensional kinetics and kinematics of maximal effort punches among amateur boxers. *International Journal of Performance Analysis in Sport, 18*(5), 835–854.
61. Stewart, C., Cornett, R., Baker, J. S., Gu, Y., Dutheil, F., & Ugbolue, U. C. (2025). The Role of Lower Limb Kinetics in Boxing Punches and the Impact of Fatigue on Biomechanical Performance. *Bioengineering, 12*(12), 1355.
62. Tajibaev, S., Omonov, D., Khojiev, S., & Abdurahmanov, M. (2026). Increasing the maximum angular velocity of the jab punch in amateur boxers. *Pedagogy of Physical Culture and Sports*, *30*(1), 38–51.
63. Tas, S., & Salkin, Y. (2019). An investigation of the sex-related differences in the stiffness of the Achilles tendon and gastrocnemius muscle: Inter-observer reliability and inter-day repeatability and the effect of ankle joint motion. *The Foot, 41*, 44–50.
64. Taş, S., Yüzbaşıoğlu, Ü., Ekici, E., & Katmerlikaya, A. (2025). Sex-related differences in human tendon stiffness: A systematic review and meta-analysis. *Indian Journal of Orthopaedics*, *59*(7), 876–887.
65. Thiessen, J. S., Guluzade, N. A., Faricier, R., & Keir, D. A. (2025). (Re)assessment of the COSMED Quark CPET and VO2Master Pro Systems for Measuring Pulmonary Gas Exchange and Ventilation. *Scandinavian Journal of Medicine & Science in Sports, 35*(2), e70019.

66. Thomas, C., Jones, P. A., & Dos'Santos, T. (2022). Countermovement Jump Force-Time Curve Analysis between Strength-Matched Male and Female Soccer Players. *International journal of environmental research and public health*, *19*(6), 3352.
67. Thomson, E. D., & Lamb, K. L. (2017a). Reproducibility of the Internal Load and Performance-Based Responses to Simulated Amateur Boxing. *Journal of strength and conditioning research*, *31*(12), 3396–3402.
68. Thomson, E. D., & Lamb, K. L. (2017b). Quantification of the physical and physiological load of a boxing-specific simulation protocol. *International Journal of Performance Analysis in Sport, 17*(1-2), 136-148.
69. Turner, A. N., Baker, E., & Miller, S. C. (2011). Increasing the Impact Force of the Rear Hand Punch. *Strength & Conditioning Journal, 33*(6), 2-9.
70. Usher, A., & Babraj, J. (2024). Use of NIRS to explore skeletal muscle oxygenation during different training sessions in professional boxing. *European journal of applied physiology*, *124*(2), 595–606.
71. Venckunas, T., Bruzas, V., Stasiulis, A., Snieckus, A., Mockus, P., & Kamandulis, S. (2022). Cardiorespiratory Responses to Specific and Nonspecific Exercise in High-Profile Amateur Boxers. *Journal of strength and conditioning research*, *36*(3), 717–722.
72. Wang, D., De Vito, G., Ditroilo, M., & Delahunt, E. (2017). Effect of sex and fatigue on muscle stiffness and musculoarticular stiffness of the knee joint in a young active population. *Journal of sports sciences*, *35*(16), 1582–1591.
73. Wdowski, M. M., Rosicka, K., & Hill, M. (2023). Influence of lower-limb muscular and tendon mechanical properties and strength on countermovement jump performance. *The Journal of sports medicine and physical fitness*, *63*(1), 16–22.
74. Wilson, D. C., Ruddock, A., Ranchordas, M. A., Thompson, S. W., & Rogerson, D. (2020). Physical profile of junior and senior amateur boxers. *Journal of Physical Education and Sport, 20* (6), 3452-3459.
75. World Medical Association. (2013). World Medical Association Declaration of Helsinki: Ethical principles for medical research involving human subjects. *JAMA, 310*(20), 2191–2194.
76. Xu, Q., Fei, J., Mao, R., Liu, L., & Fei, C. (2025a). Effects of BFR-RST on upper limb performance in boxers: a study based on physiological indices, anthropometric

measurement indices, anaerobic power, and punching performance. *Frontiers in physiology*, *16*, 1453153.

77. Xu, Q., Wang, Z., Liu, L., Mao, R., Xi, C., & Shi, G. (2025b). The relationship between training and competition load characteristics of female boxers-a case study based on collegiate boxers. *Frontiers in psychology, 16*, 1517102.
78. Xu, Q., Xi, C., & Mao, R. (2024). Comparison of kinematic performance and analysis of the effect of punching speed of rear hook of college boxers of different sexes. *International Journal of Performance Analysis in Sport, 24*(1), 44–57.
79. Yue, F., Wang, Y., Yang, H., & Zhang, X. (2025). Effects of high-intensity interval training on aerobic and anaerobic capacity in olympic combat sports: a systematic review and meta-analysis. *Frontiers in physiology*, *16*, 1576676.
80. Zhou, Z., Chen, C., Yi, W., Chen, X., Cui, W., Wu, R., & Wang, D. (2023). Relationships between isokinetic knee and shoulder peak strength with maximal punch force in boxing athletes. *Isokinetics and Exercise Science, 31*(3), 233-240.