

UČINCI RAZLIČITIH INTERVALA ODMORA U TRENINGU S OTPOROM NA JAKOST I DEBLJINU MIŠIĆA TE DULJINU I KUT PRUŽANJA SNOPOVA MIŠIĆNIH VLAKANA

Damjan, Bruno

Doctoral thesis / Disertacija

2023

Degree Grantor / Ustanova koja je dodijelila akademski / stručni stupanj: **University of Zagreb, Faculty of Kinesiology / Sveučilište u Zagrebu, Kineziološki fakultet**

Permanent link / Trajna poveznica: <https://um.nsk.hr/um:nbn:hr:117:930305>

Rights / Prava: [Attribution-NonCommercial-NoDerivatives 4.0 International/Imenovanje-Nekomercijalno-Bez prerada 4.0 međunarodna](#)

Download date / Datum preuzimanja: **2024-07-27**



Repository / Repozitorij:

[Repository of Faculty of Kinesiology, University of Zagreb - KIFoREP](#)





Sveučilište u Zagrebu

KINEZIOLOŠKI FAKULTET

Bruno Damjan

**UČINCI RAZLIČITIH INTERVALA ODMORA U
TRENINGU S OTPOROM NA JAKOST I DEBLJINU
MIŠIĆA TE DULJINU I KUT PRUŽANJA SNOPOVA
MIŠIĆNIH VLAKANA**

DOKTORSKI RAD

Zagreb, 2023



University of Zagreb

FACULTY OF KINESIOLOGY

Bruno Damjan

**THE EFFECTS OF DIFFERENT RESISTANCE
TRAINING REST INTERVALS ON MUSCLE STRENGTH
AND THICKNESS, AS WELL AS THE PENNATION
ANGLE AND FASCICLE LENGTH**

DOCTORAL THESIS

Zagreb, 2023



Sveučilište u Zagrebu

KINEZIOLOŠKI FAKULTET

BRUNO DAMJAN

**UČINCI RAZLIČITIH INTERVALA ODMORA U
TRENINGU S OTPOROM NA JAKOST I DEBLJINU
MIŠIĆA TE DULJINU I KUT PRUŽANJA SNOPOVA
MIŠIĆNIH VLAKANA**

DOKTORSKI RAD

Mentor: izv.prof.dr.sc. Saša Vuk

Zagreb, 2023



University of Zagreb

FACULTY OF KINESIOLOGY

Bruno Damjan

**THE EFFECTS OF DIFFERENT RESISTANCE
TRAINING REST INTERVALS ON MUSCLE STRENGTH
AND THICKNESS, AS WELL AS THE PENNATION
ANGLE AND FASCICLE LENGTH**

DOCTORAL THESIS

Supervisor: Assoc.Prof. Saša Vuk, Ph.D.

Zagreb, 2023

ŽIVOTOPIS MENTORA

Izv. prof. dr. sc. Saša Vuk rođen je 02. prosinca 1979. godine u Zagrebu, oženjen je i otac jedne djevojčice i jednog dječaka. Državljanin je Republike Hrvatske i po nacionalnosti Hrvat.

Zaposlen je 2007. godine na Kineziološkom fakultetu Sveučilišta u Zagrebu kao znanstveni novak u suradničkom zvanju asistent na predmetu Osnovne kineziološke transformacije i predmetima smjera Fitnes. Doktorirao je 2011. godine s temom „Procjena funkcije mišićnog sustava nogu: odnos vanjskih opterećenja i mehaničkih izlaza“ na Kineziološkom fakultetu Sveučilišta u Zagrebu. 2017. godine izabran je u znanstveno-nastavno zvanje docent, a od veljače 2023. je izvanredni profesor.

Voditelj je specijalističkog diplomskog stručnog studija za izobrazbu trenera smjera fitnes, te prijediplomskog stručnog i diplomskog specijalističkog studija za izobrazbu trenera smjera taekwondo. Od 2017. godine koordinator (voditelj) je studenata na prijediplomskom stručnom studiju za izobrazbu trenera. Od 2019.-2022. godine je, kao vanjski suradnik, nositelj predmeta Mjerenje i procjenjivanje fitnesa na Fakultetu za odgojne i obrazovne znanosti, danas Kineziološkom fakultetu Osijek, Sveučilište Josipa Jurja Strossmayera u Osijeku.

U dosadašnjem radu je objavio 29 znanstvenih i 8 stručnih radova. Kao izvođač je sudjelovao na četiri, a kao voditelj na tri znanstveno-istraživačka projekta iz područja kineziologije. Objavio je priručnik „Osnove treninga s otporom“ za nastavu predmeta Osnovne kineziološke transformacije 1, te Metodika treninga fitnesa 1 i 2. Aktivno sudjeluje i prezentira radove na brojnim međunarodnim i domaćim znanstveno-stručnim konferencijama. Na poziv uredništava, recenzirao je radove za najuglednije časopise u području sportskih znanosti. Tajnik je i urednik sekcije „Biomehanika i motorička kontrola“ zbornika radova međunarodne znanstveno-stručne konferencije o kineziologiji – „Kinesiology“.

Aktivno se bavio taekwondo u kojem je bio višestruki državni prvak, te preko 15 godina trener u nekoliko zagrebačkih taekwondo klubova. Od 2010. godine aktivno se bavi kaskaderstvom i glumom.

ZAHVALE

Bogu hvala na svemu.

Na svim predivnim trenucima, usponima i padovima koje sam proživio u životu i na ovom akademskom putovanju.

Hvala najboljem mentoru, ali još i boljem čovjeku Saši Vuku koji me nakon diplomskog rada prihvatio trpiti još i kroz cijeli doktorski studij. Hvala mu što je uvijek bio tu za mene te svojim trudom i vremenom dao nezamisliv doprinos ovom projektu.

Hvala članovima povjerenstva za ocjenu dokorskog rada, izv. prof. dr. sc. Davoru Šentiji, izv. prof. dr. sc. Mariu Kasoviću i prof. dr. sc. Nejc Šarabonu, što su svojim idejama i konstruktivnim savjetima ovaj rad učinili još kvalitetnijim.

Posebna hvala svakom članu moje obitelji, svi su me uvijek u životu podržavali i pomagali na sve moguće načine pa tako i na ovom putu prema tituli doktora znanosti. Ponosan sam na vas i zauvijek zahvalan na svemu.

Hvala i mojim najdražim prijateljima koji su našim druženjima, FIFA-ma i ostalim egzibicijama produžili moje doktoriranje za minimalno godinu dana.

Voli vas Bruno.

UČINCI RAZLIČITIH INTERVALA ODMORA U TRENINGU S OTPOROM NA JAKOST I DEBLJINU MIŠIĆA TE DULJINU I KUT PRUŽANJA SNOPOVA MIŠIĆNIH VLAKANA

SAŽETAK

Osnovni cilj disertacije bio je usporediti učinke jednakih programa treninga s otporom različitih trajanja intervala odmora na debljinu mišića, jakost i arhitekturu mišića. Vezano uz ovaj opći cilj, postavljena je opća istraživačka hipoteza: jednaki programi treninga s otporom s različitim trajanjem intervala odmora imati će različiti utjecaj na debljinu mišića, jakost i arhitekturu mišića.

Tako postavljen opći cilj raščlanjen je na tri specifična cilja: vrednovati specifične učinke jednakih programa treninga s otporom različitih trajanja intervala odmora na: 1) debljinu mišića; 2) maksimalni mehanički izlaz jakosti (vršni moment sile) donjih i gornjih ekstremiteta pri sporim (60 °/s) i brzim (120 °/s) mišićnim akcijama; te 3) arhitekturu mišića (duljinu i kut pružanja snopova mišićnih vlakana).

Prigodni uzorak ispitanika bile su mlade, zdrave i tjelesno aktivne muške osobe, studenti Kineziološkog fakulteta Sveučilišta u Zagrebu (n = 26) koji su slučajnim odabirom podijeljeni u: 1) eksperimentalnu skupinu treninga s otporom s pauzom između serija u trajanju od jedne minute, i 2) eksperimentalnu skupinu treninga s otporom s pauzom između serija u trajanju od tri minute.

Svaka od eksperimentalnih skupina bila je podvrgnuta programiranom progresivnom treningu s otporom tri puta tjedno kroz osam tjedana koji je uključivao sedam vježbi. Intenzitet je odgovarao opterećenju od 70% 1RM u svakoj vježbi što je omogućilo ~12 ponavljanja po seriji izvedenih do točke trenutnog koncentričnog mišićnog otkaza. Ukupni relativni volumen treninga s obzirom na 1RM progresivno se povećao i bio je izjednačavan između grupa. Jedina akutna programska varijabla koja se razlikovala između eksperimentalnih grupa bila je trajanje intervala odmora između serija.

Rezultati su pokazali kako osmotjedni trenažni programi jednako povećavaju vršni i normalizirani vršni moment sile, debljinu mišića, i kut penacije, bez obzira na duljinu trajanja intervala odmora. Samo je grupa s dužim intervalom odmora značajno povećala duljinu snopova mišićnih vlakana. Sveukupno, rezultati ove disertacije ne podržavaju postavljenu opću hipotezu, već sugeriraju da, kada je cilj treninga maksimiziranje mišićne jakosti, intervali odmora budu "dovoljno dugi" da omoguće zadržavanje visokih intenziteta opterećenja tijekom svake serije. Kada je cilj treninga postići hipertrofiju mišića, čini se kako su i dugi i kratki intervali odmora učinkoviti za povećanje mišićne hipertrofije pod uvjetom da su programi treninga s otporom koji se provode velikog trenažnog volumena. I konačno, oba trenažna procesa, bez obzira na trajanje intervala odmora dovode do povećanja kuta penacije, ali samo dulji intervali odmora dovode do značajnog porasta duljine snopova mišićnih vlakana.

Ključne riječi: mišićna hipertrofija, dizajn mišića, arhitektura mišića, moment sile, kut penacije, duljina snopova mišićnih vlakana.

THE EFFECTS OF DIFFERENT RESISTANCE TRAINING REST INTERVALS ON MUSCLE STRENGTH AND THICKNESS, AS WELL AS THE PENNATION ANGLE AND FASCICLE LENGTH

ABSTRACT

The main goal of the dissertation was to compare the effects of equal resistance training programs with different durations of rest intervals on muscle thickness, strength, and muscle architecture. Related to this general goal, a public research hypothesis was made: equal resistance training programs with different durations of rest intervals will affect muscle thickness, strength, and architecture differently.

The general goal set is broken down into three specific objectives: to evaluate the particular effects of equal training programs with a resistance of different durations of rest intervals on 1) muscle thickness; 2) maximum mechanical strength output (peak moment of force) of the lower and upper extremities during slow (60 °/s) and fast (120 °/s) muscle actions; and 3) muscle architecture (length and angle of extension of bundles of muscle fibers).

The appropriate sample of subjects were young, healthy, and physically active men, students of the Faculty of Kinesiology, University of Zagreb (n = 26) who were randomly divided into: 1) an experimental group of resistance training with a one-minute break between sets, and 2) an experimental group of resistance training with a three-minute break between sets.

Each experimental group underwent programmed progressive resistance training three times a week for eight weeks, including seven exercises. The intensity corresponded to a load of 70% 1RM in each exercise, which allowed ~12 repetitions per set performed to the point of instantaneous concentric muscle failure. Total relative training volume concerning 1RM increased progressively and was equalized between groups. The only acute program variable that differed between experimental groups was the rest interval duration between sets.

The results showed that eight-week training programs equally increased peak and normalized peak moment of force, muscle thickness, and pennation angle, regardless of the rest interval length. Only the group with a longer rest interval significantly increased the length of muscle fiber bundles. Overall, the results of this dissertation do not support the stated general hypothesis but rather suggest that when the goal of training is to maximize muscle strength, the rest intervals should be "long enough" to allow high load intensities to be maintained during each set. When training aims to achieve muscle hypertrophy, long and short rest intervals are effective for increasing muscle hypertrophy, provided the resistance training programs performed are of high training volume. Finally, regardless of the rest interval duration, both training processes increase the pennation angle. However, only longer rest intervals lead to a significant increase in the length of muscle fiber bundles.

Keywords: muscle hypertrophy, muscle design, muscle architecture, force moment, pennation angle, length of muscle fiber bundles.

SADRŽAJ

1. UVOD.....	1
1.1. Trening s otporom.....	2
1.1.1. Dobrobiti treninga s otporom i njegov utjecaj na mišićnu jakost.....	2
Osnovna načela progresije.....	3
Načelo progresivnog preopterećenja.....	3
Načelo specifičnosti.....	4
Načelo varijacije.....	5
1.1.2. Utjecaj treninga s otporom na hipertrofiju mišića.....	5
Sastav i građa skeletnih mišića.....	6
Metode procjene hipertrofije skeletnih mišića.....	6
1. Makroskopska mjerenja mišićne hipertrofije.....	7
Ultrazvučna dijagnostika – procjena debljine mišića.....	7
Dvoenergetska rendgenska apsorpciometrija.....	8
Kompjuterizirana tomografija.....	8
Periferna kvantitativna kompjuterizirana tomografija.....	9
Magnetska rezonanca.....	9
2. Mikroskopska procjena mišićne hipertrofije.....	10
3. Molekularna procjena mišićne hipertrofije.....	10
1.1.3. Utjecaj treninga s otporom na arhitekturu mišića.....	13
1.1.4. Oblikovanje programa treninga s otporom - akutne programske varijable.....	16
Vrste mišićnih akcija.....	16
Sadržaji – izbor vježbi.....	17
Redosljed izvođenja vježbi i struktura vježbanja.....	19
Veličina trenažnog opterećenja (intenzitet) i broj ponavljanja.....	20
Volumen treninga.....	22
Brzina ponavljanja.....	24
Učestalost treninga.....	25
Interval odmora.....	26
1.2. Problemi vezani uz interval odmora.....	29
1.3. Problem rada.....	33
2. CILJEVI I HIPOTEZE.....	34
3. METODE ISTRAŽIVANJA.....	35
3.1. Eksperimentalni nacrt.....	35
3.2. Ispitanici.....	37
3.3. Mjerni instrumenti.....	39
3.3.1. Debljina i arhitektura mišića.....	39

3.3.2. Mišićna jakost	47
3.4. Intervencija – program progresivnog treninga s otporom	52
3.4.1. Sadržaji – izbor i redoslijed izvođenja vježbi	53
3.4.2. Veličina trenažnog opterećenja	60
3.4.3. Ukupni relativni volumen treninga	62
3.4.4. Učestalost treninga	62
3.4.5. Vrste mišićnih akcija i brzina ponavljanja	63
3.4.6. Intervali odmora između serija	63
3.5. Statistička analiza podataka	64
4. REZULTATI	66
4.1. Mišićna jakost	66
4.1.1. Vršni moment sile	66
4.1.2. Normalizirani vršni moment sile	70
4.2. Debljina i arhitektura mišića	74
5. RASPRAVA	79
5.1. Utjecaj trajanja intervala odmora na jakost mišića	79
5.2. Utjecaj trajanja intervala odmora na debljinu mišića	81
5.3. Utjecaj trajanja intervala odmora na arhitekturu mišića	83
5.4. Ograničenja studije	84
5.5. Zaključna rasprava	86
6. ZAKLJUČAK	88
7. LITERATURA	91
8. ŽIVOTOPIS I POPIS JAVNO OBJAVLJENIH RADOVA AUTORA	117

1. UVOD

Skeletni mišići čine najveću masu tkiva u ljudskom tijelu i neophodni su održavanje posture i za kretanje (Schäfer i sur., 2022). Kretanje uključuje vrlo različite živčano-mehaničke izlaze mišićnog sustava, pa stoga osnovni dizajn, arhitektura, kao i prilagodba svakog pojedinog mišića omogućuje proizvodnju mehaničkog izlaza u vidu mišićne sile, brzine mišićne kontrakcije i snage (Hill, 1949). Sposobnost proizvodnje sile prilikom savladavanja nekog vanjskog otpora naziva se mišićna jakost (Jones i Comfort, 2020), a povećanje veličine skeletnih mišića praćeno povećanjem količine minerala, proteina ili supstrata naziva se mišićna hipertrofija (Haun i sur., 2019).

Mišićnu jakost i hipertrofiju moguće je razviti treningom s otporom.

1.1. Trening s otporom

1.1.1. Dobrobiti treninga s otporom i njegov utjecaj na mišićnu jakost

Trening s otporom je modalitet vježbanja koji bilježi značajan porast popularnosti u posljednjih nekoliko desetljeća, osobito radi svoje uloge u poboljšanju živčane i mišićne prilagodbe (Seynnes i sur., 2007) i sportskih performansi povećanjem mišićne jakosti, snage i brzine, hipertrofije, lokalne mišićne izdržljivosti, ravnoteže i koordinacije (Kraemer i sur., 2002). Danas je sve raširenija svijest i o zdravstvenim prednostima i dobrobitima koje pruža trening s otporom u sposobnosti obavljanja svakodnevnih aktivnosti (Fitzgerald i sur., 2004) kao i značajnom poboljšanju dobrobiti i cjelokupnog zdravlja (Lasevicius i sur., 2018), te ga preporučuju i nacionalne zdravstvene organizacije kao što su *American College of Sports Medicine* (ACSM) i *American Heart Association* većini populacija, uključujući adolescente, zdrave odrasle osobe, starije osobe, ali i kliničku populaciju (npr. osobe s srčano-žilnim ili živčano-mišićnim bolestima i sl.) (American College of Sports Medicine, 2009; Kraemer i sur., 2002; Pollock i sur., 1998). Pa tako ACSM navodi brojne zdravstvene dobrobiti kao što su poboljšanja u sastavu tijela, u morfologiji mišića u vidu povećanja poprečnog presjeka mišića, poboljšane živčane aktivacije (Hakkinen i sur., 1996), poboljšane miogene regeneracije stanica, povećane duljine snopova mišićnih vlakana i povećanog kuta penacije (Aagaard i sur., 2002; Franchi i sur., 2014; Kraemer i sur., 2002), zatim poboljšanja u krvnom tlaku, profilu lipida u krvi, toleranciji glukoze, osjetljivosti na inzulin i porastu koštane mase (Garber i sur., 2011; Hansen i sur., 2010; Moraes i sur., 2012). Sa stajališta sportaša, trening s otporom je vrijedan alat za poboljšanje sportskih performansi bez obzira na vrstu sporta jer se njegova primjena može prilagoditi specifičnim zahtjevima svakoga sporta.

Rezultati nedavne meta-analize (Schoenfeld, Grgic, i sur., 2017) o utjecaju treninga s otporom na izlaz mišića u vidu mišićne jakosti su oprečni ovisno o modalitetu testiranja. Velika vanjska opterećenja pokazuju jasnu prednost u porastu maksimalne jakosti (u vidu jednog maksimalnog ponavljanja – 1RM) u usporedbi s manjim opterećenjima (Hopkins i sur., 2009). Međutim, i veća i manja opterećenja pokazala su velike učinke porasta 1RM (35,4% za veća i 28,0% za manja) (Schoenfeld, Grgic, i sur., 2017). Iako su potrebna velika vanjska opterećenja kako bi se postigao maksimalan porast u izotoničkoj jakosti, moguće je generalizirati da manja opterećenja također potiču značajna povećanja ovog ishoda, uz napomenu da se rezultati istraživanja dominantno

temelje na netreniranoj populaciji ispitanika (Schoenfeld, Grgic, i sur., 2017). Nadalje, istraživanja sugeriraju kako veća vanjska opterećenja mogu imati važniju ulogu za maksimalni porast jakosti u treniranoj populaciji, međutim, oskudnost podataka o toj temi ograničava konačnu generalizaciju.

Trening do trenutnog mišićnog otkaza s velikim opterećenjem bi mogao biti učinkovitiji od treninga s manjim opterećenjima jer zahtijeva manji ukupni volumen i kraće vrijeme treninga.

Da bi došlo do poboljšanja mišićnih performansi, odnosno da bi ljudsko tijelo bilo "prisiljeno" stalno se prilagođavati promijenjenim podražajima, trenažni se program mora sustavno mijenjati (Kraemer i Ratamess, 2004) kontinuirano modificirajući akutne programske varijable i tako progresivno preopterećivati mišiće. To je moguće poštujući osnovna načela progresije.

Osnovna načela progresije

Prema Kraemer i sur. (2002) postoje tri osnovna načela treninga s otporom koja treba koristiti pri programiranju treninga: 1) načelo progresivnog preopterećenja, definirano kao progresivni prirast stresa na aktivne mišiće s vremenom kako bi se potaknula mišićna prilagodba; 2) načelo specifičnosti, definirano kao tjelesni odgovor i prilagodba određenom programu; i 3) načelo varijacije, definirano kao promjena trenažnog programa kako bi se spriječila stagnacija i održao optimalan poticaj treninga.

Načelo progresivnog preopterećenja

Progresivno preopterećenje opisuje postupno povećanje stresa na tijelo tijekom vježbanja. S obzirom na to da se fiziološke prilagodbe u standardnom protokolu treninga s otporom (protokolu bez varijacija u bilo kojoj programskoj varijabli) mogu dogoditi u relativno kratkom vremenskom razdoblju, za daljnji je razvoj potrebno sustavno povećavati zahtjeve koje se postavljaju na tijelo (Kraemer i Ratamess, 2004).

Postoji nekoliko načina progresije u treningu s otporom s ciljem razvoja mišićne jakosti, hipertrofije, lokalne mišićne izdržljivosti i/ili snage, i to: 1) povećanjem otpora (opterećenja), 2)

povećanjem broja ponavljanja, 3) promjenom brzine izvedbe (s obzirom na cilj), 4) promjenom trajanja intervala odmora, 5) povećanjem volumena treninga (u razumnim granicama), i/ili 6) bilo kojom kombinacijom svega navedenog.

Važnost progresivnog preopterećenja može se primijetiti u interakciji između živčanih i mišićnih prilagodbi tijekom treninga jakosti i snage. Živčani sustav igra značajnu ulogu u povećanju jakosti u ranim fazama prilagodbe na trening i to kroz povećanje broja aktiviranih motoričkih jedinica, učestalosti aktiviranja motoričkih jedinica i sinkronizacije rada motoričkih jedinica (Komi, 2003). Hipertrofija mišića postaje vidljiva u relativno kratkom vremenskom razdoblju, već nakon četiri do osam tjedana (Phillips, 2000), iako se promjene u kvaliteti proteina, vrsti mišićnih vlakana (Kraemer i sur., 1995) i brzini sinteze proteina (Phillips, 2000) događaju i puno ranije.

Nakon ove početne faze, dolazi do interakcije između živčanih prilagodbi i hipertrofije u akutnoj proizvodnji mišićne jakosti (Komi, 2003). Kako je sada, nakon što je došlo do hipertrofijskih prilagodbi, potrebno aktivirati manju količinu mišićne mase za savladavanje jednakog vanjskog opterećenja (Ploutz i sur., 1994), potrebno je progresivno povećavati veličinu vanjskog opterećenja da bi se postigle daljnje živčane prilagodbe (Hakkinen i sur., 1985; Ploutz i sur., 1994). Ovi nalazi ukazuju na to da je progresivno preopterećenje nužno za maksimalno aktiviranje mišićnih vlakana, a time i za povećanje hipertrofije i jakosti mišića.

Načelo specifičnosti

Načelo specifičnosti navodi da bi vrsta treninga koja se provodi trebala biti specifična za vježbača i njegove ciljeve, drugim riječima, trening bi trebao biti organiziran na temelju specifičnog cilja koji se želi postići (Baker i sur., 1994). Sve trenažne prilagodbe specifične su za primijenjeni podražaj, pa su tako fiziološke prilagodbe na trening s otporom specifične za 1) vrstu mišićnih akcija, 2) izbor vježbi, 3) redoslijed izvođenja vježbi i strukturu vježbanja, 4) veličinu trenažnog opterećenja, 5) volumen treninga, 6), brzinu ponavljanja, 7) učestalost treninga, i 8) trajanje intervala odmora između serija (vidi 1.1.4.) (Rhea i sur., 2002; Campos i sur., 2002; Schlumberger i sur., 2001).

Načelo varijacije

Kako bi trenažni stimulus ostao optimalan potrebno je povremeno uvoditi promjene u jednoj ili više akutnih programskih varijabli (Kraemer i Ratamess, 2004). Istraživanja pokazuju kako su sustavne varijacije u volumenu treninga i veličini trenažnog opterećenja najučinkovitije za dugoročnu progresiju u usporedbi s programima u kojima ne dolazi do variranja u niti jednoj akutnoj programskoj varijabli (Fleck, 1999).

Kako postoje tri osnovna mehanizma izgradnje mišićne hipertrofije uzrokovane treningom (metaboličko oštećenje, mišićna napetost (sila) i oštećenje mišića; za detalje vidi 1.1.2.), u kontekstu progresivnog preopterećenja, učinkovito se „napada“ varijabla mišićne napetosti povećavajući opterećenje i uzrokujući prilagodbu jakosti mišića tijekom vremena. Taj dodatni stres stavljen na mišiće osigurati će jači rad i regrutaciju većeg broja mišićnih vlakana kako bi se vježba mogla izvesti.

1.1.2. Utjecaj treninga s otporom na hipertrofiju mišića

Etimologija pojma hipertrofija otkriva podrijetlo iz engleskog izraza "*hyper-*", koji označava "iznad" ili "izvan", i grčkog izraza "*-trophia*", koji označava "rast" ili "prehranu" (Haun i sur., 2019). U kontekstu treninga s otporom, hipertrofija skeletnih mišića općenito je definirana kao povećanje mišićne mase i područja poprečnog presjeka mišića na razini cijelog tkiva i stanica (Russell i sur., 2000). Povijesno gledano, pretpostavlja se da se mišićna hipertrofija javlja kao odgovor na nakupljanje kontraktilnih ili strukturnih proteina zbog paralelnog povećanja broja sarkomera u već postojećim miofibrilama mišićnih vlakana, što rezultira povećanjem površine poprečnog presjeka vlakana (Russell i sur., 2000).

Da bi se bolje razumio mehanizam mišićne hipertrofije potrebno je poznavati sastav i građu skeletnih mišića.

Sastav i građa skeletnih mišića

Skeletno mišićno tkivo može se kategorizirati u sljedeće razine organizacije: 1) cijeli mišić obložen fascijom (tj. epimizij), 2) snopovi mišićnih vlakana (tj. peri- i endomizij), 3) miofibrile unutar pojedinačnih mišićna vlakna, 4) sarkomere unutar pojedinačnih miofibrila i 5) proteine (npr. aktin, miozin i titin) unutar pojedinačnih sarkomera (Haun i sur., 2019).

Cijeli skeletni mišić obložen je vezivnim tkivom, koje se prvenstveno sastoji od proteina kolagena, dok oko 75% volumena predstavlja tekućina (Kjaer, 2004). Skeletni mišići mogu se podijeliti na unutarstanične (tj. unutar membrane mišićnog vlakna) i izvanstanične komponente (tj. izvan membrane mišićnog vlakna). Izvanstanična komponenta prvenstveno se sastoji od vezivnog i cirkulacijskog sustava, a vezivno tkivo općenito zauzima između ~1-20% ljudskog skeletnog mišića što dalje dijeli mišiće na snopove mišićnih vlakana i pojedinačna mišićna vlakna (Kjaer, 2004). Značajno je da je komponenta vezivnog tkiva također prilagodljiva i može varirati u svom doprinosu veličine i jakosti skeletnih mišića. Mišićna vlakna se prvenstveno sastoje od miofibrila, mitohondrija i specijalizirane strukture poznate kao sarkoplazmatski retikulum. To su tri glavne komponente mišićnih vlakana (Lindstedt i sur., 1998), iako glikogen također čini ~2-3%, a unutarmišićni trigliceridi ~5% u prosjeku (Gallagher i sur., 2005; van Loon i sur., 2003).

U skladu s tim, logično je pretpostaviti da bi istraživanja koja izvještavaju o povećanju veličine mišića i promjenama miofibrilarnih proteina jasno pokazala ovaj fenomen. Međutim, iako se hipertrofija skeletnih mišića smatra karakterističnom prilagodbom dovoljno dugog treninga s otporom, u znanstvenoj literaturi postoje nedosljedna opažanja koja ovise o prijavljenim varijablama ishoda. To je djelomično vjerojatno zbog brojnih metoda koje se koriste za procjenu hipertrofije skeletnih mišića, a svaka od tih metoda procjenjuje različite karakteristike skeletnih mišića.

Metode procjene hipertrofije skeletnih mišića

Načelno, tehnike mjerenja mišićne hipertrofije mogu se podijeliti u sljedeće kategorije (Haun i sur., 2019): 1) makroskopska mjerenja, 2) mikroskopska mjerenja i 3) molekularna mjerenja.

1. Makroskopska mjerenja mišićne hipertrofije

Budući da skeletni mišići imaju tendenciju zauzimanja velikog postotka nemasne mase, smatra se da uočeno povećanje nemasne mase temeljeno na ovim metodama ukazuje na to da je došlo do hipertrofije, iako to nije nužno slučaj s obzirom da mnogi drugi čimbenici doprinose nemasnoj masi (npr. tekućina). Ove se tehnike prvenstveno koriste za procjenu masti i nemasne mase i uključuju pletizmografiju (npr. Bod Pod), hidrostatsko vaganje, bioelektričnu impedanciju, mjerenje kožnih nabora i druge antropometrijske mjere mjernim trakama i drugim alatima (Haun i sur., 2019).

Ultrazvučna dijagnostika – procjena debljine mišića

Ultrazvučna dijagnostika predstavlja relativno pristupačnu, neinvazivnu, *in vivo* metodu za procjenu morfoloških i mehaničkih svojstava mišića i tetiva (Franchi, Raiteri, i sur., 2018). Pionirske studije koje su koristile ultrazvuk za proučavanje strukture i funkcije mišićno-koštanog sustava provedene su 1960-ih (Sarto i sur., 2021); međutim, njegova sustavna uporaba postala je istaknutija 1990-ih (Fukashiro i sur., 1995; Kawakami i sur., 1993; Narici i sur., 1996). Konkretno, *B-mode* tehnika ultrazvuka (eng. *Brightness mode* – koristi nijanse sive boje različite svjetline za prikaz dvodimenzionalne slike) je postala široko prihvaćena za kvantificiranje mišićne mase i arhitekture skeletnih mišića (Kawakami i sur., 1993; Narici i sur., 1996; Rutherford i Jones, 1992) i njihov odnos s funkcijom mišića (Lieber i Fridé, 2000; Narici, 1999) u različitim populacijama. Osim toga, napredak u ultrazvučnoj tehnologiji, kao što je tehnika proširenog vidnog polja (eng. *Extended Field of View* – EFOV), 3D ultrazvuk, snimanje *Shearwave* elastografijom (SWE) i napredak u obradi podataka omogućili su dublji uvid u strukturalna i funkcionalna svojstva mišića i tetiva.

Debljina mišića se najčešće mjeri kao linearna udaljenost između duboke i površinske aponeuroze na sredini trbuha željenog mišića (Franchi, Raiteri, i sur., 2018). Iako se pokazalo da je mjera debljine mišića vrlo pouzdana u nizu mišića (ICC = 0,65-0,94) (Thoirs i English, 2009), ograničena je po tome što mjeri samo jednu dimenziju mišića. Također, potrebno je naglasiti kako mjerenje

ultrazvukom uvelike ovisi o vještini mjerioca, s obzirom na to da razlike u pritisku sonde na kožu mogu rezultirati značajnim varijacijama u mjerenjima.

Dakle, ultrazvučne mjere debljine mišića pružaju brzu i praktičnu te jednostavnu, pouzdanu i sigurnu metodu procjene jednodimenzionalne veličine mišića i utvrđivanja mišićnih promjena (Scott i sur., 2017).

Dvoenergetska rendgenska apsorpcijometrija

Dvoenergetska rendgenska apsorpcijometrija (eng. *Dual-Energy X-ray Absorptiometry*, DEXA ili DXA) izvorno je osmišljena za mjerenje mineralnih parametara kostiju, a danas je široko korištena metoda za procjenu promjena mase skeletnih mišića (Haun i sur., 2019). DXA skenovi cijelog tijela prikazuju dvodimenzionalne slike, a ti skenovi mogu dati i procjene mase i gustoće. Pokazalo se da noviji DXA skeneri imaju izvrsnu pouzdanost procjene nemasne mase tijekom skeniranja cijelog tijela (Kephart i sur., 2016). Međutim, za razliku od jednodimenzionalnih ultrazvučnih procjena i nekih drugih metoda, DXA ne može razlikovati mišićne skupine, mišićno tkivo i unutar-mišićnu tekućinu, niti je dovoljno osjetljiva da otkrije unutar-mišićno masno tkivo. DXA također može biti pod velikim utjecajem statusa hidracije i drugih čimbenika (Nana i sur., 2015).

Međutim, bez obzira na navedeno, DXA se može koristiti kao neinvazivna procjena ukupne i segmentne veličine mišića.

Kompjuterizirana tomografija

Kompjuterizirana tomografija (CT) uvedena je ranih 1970-ih (Hounsfield, 1995) i ima mogućnost pružanja dvodimenzionalnih slika visokog kontrasta s intenzitetom piksela koji je povezan s gustoćom tkiva. Tkiva koja se često mjere uključuju masno tkivo i skeletne mišiće (Heymsfield i sur., 2014). Kada se koriste za mjerenje mišićne hipertrofije, uobičajeno je da se slike ručno segmentiraju za određene mišiće ili mišićne skupine i zatim kvantificiraju. CT se smatra pouzdanom i valjanom metodom procjene promjena poprečnog presjeka mišića (Verdijk i sur.,

2009), no nedostatak CT skeniranja je, uz to što je to skupa metoda, da su ispitanici izloženi većim dozama zračenja u odnosu na DXA (Prado i Heymsfield, 2014).

Periferna kvantitativna kompjutorizirana tomografija

Periferna kvantitativna kompjutorizirana tomografija (pQCT) izvorno je razvijena za mjerenje gustoće kostiju (Gasser, 1995), ali je potvrđena i njena valjanost pri mjerenju treningom izazvanih promjena veličine mišića (Defreitas i sur., 2010). Prednost ove metode mjerenja ogleda se u mogućnosti otkrivanja koncentracije unutar-mišićne masti koja bi mogla ukazivati na kvalitetu skeletnih mišića (Sherk i sur., 2014). Međutim, slično kao i kod DXA i CT, ograničenje pQCT je što ne može razlikovati mišićno tkivo od unutar-mišićne tekućine. Stoga vjerojatno odražava promjene u kontraktilnom proteinu kao i potencijalne promjene u promjenama tekućine izazvane treningom ili promjenama glikogena. Također se čini da ne postoje standardizirani protokoli za snimanje ili analizu, pa je usporedba između studija ograničena (Erlandson i sur., 2016).

Magnetska rezonanca

Magnetska rezonanca (MR) je neinvazivna dijagnostička radiološka metoda koja pruža izvrsnu rezoluciju i omogućuje razlikovanje između pojedinačnih mišića te se obično smatra referentnim standardom za regionalnu procjenu mišićne mase (Smeulders i sur., 2010). Ona koristi radiopulsne valove za induciranje nuklearne vrtnje atomskih čestica – posebno onih u vodik – a elektromagnetska polja se koriste za lokalizaciju tih čestica (Haun i sur., 2019). Stoga je MR posebno korisna za proučavanje mekog tkiva poput skeletnih mišića i masti. Vrijednosti test-retesta za odabrane mišiće gornjeg i donjeg dijela tijela dale su iznimno visoke ICC (npr. 0,99) (Leblanc i sur., 2000; Smeulders i sur., 2010). Iako su ove mjere najpreciznije u smislu bilježenja promjena ukupne veličine mišića, oprema za MR nije široko dostupna, a skeniranja su skupa; stoga je njegova uporaba u literaturi oskudnija. Nadalje, iako se MR smatra zlatnim standardom za procjenu dvodimenzionalnog područja ili segmentalnog volumena određene mišićne skupine, ona ne prikuplja molekularne prilagodbe koje se događaju unutar vlakana niti otkriva metaboličku i funkcionalnu prirodu tkiva u usporedbi s drugim metodama (Hellerstein i Evans, 2017).

2. Mikroskopska procjena mišićne hipertrofije

Hipertrofiju skeletnih mišića moguće je procijeniti na mikrostrukturnoj razini pomoću mjerenja poprečnog presjeka mišićnog vlakna i histokemijskog bojenja nakon što su uzorci izrezani i pričvršćeni na mikroskopska stakalca. Ova se tehnika koristi za procjenu strukture i veličine uzoraka mišića od kasnih 1800-ih.

3. Molekularna procjena mišićne hipertrofije

Molekularni potpis koji koincidira s hipertrofijom skeletnih mišića kao odgovor na trening s otporom uglavnom je bio nedovoljno istražen, ali se može zaključiti analizom promjena u subfrakcijama proteina unutar biopsiranog tkiva kroz protokole diferencijalnog centrifugiranja nakon kojih slijede jednostavni biokemijski testovi, elektroforeza u poliakrilamidnom gelu, imunobloting specifičnih proteina ili procjene temeljene na proteomima većih razmjera. Iako teoretski jednostavne, ove metode stvaraju praktične izazove koji često sprječavaju laboratorije da ih primijenjuju (Haun i sur., 2019).

Sveukupno gledajući, iako su izravne usporedbe različitih navedenih metoda procjene hipertrofije mišića rijetke, postoje podaci koji sugeriraju da se makroskopski, mikroskopski, ultramikroskopski i/ili biokemijski indeksi hipertrofije skeletnih mišića nakon treninga s otporom međusobno slabo slažu (Franchi, Longo, i sur., 2018).

Što uzrokuje hipertrofiju mišića?

Pretpostavlja se da su za treningom s otporom izazvane hipertrofične odgovore odgovorna tri primarna mehanizma, odnosno čimbenika: mehanička napetost, mišićno oštećenje i metabolički stres (Evans, 2002; Vandenburg, 1987).

Pa se tako **mehanički izazvana napetost** dobivena stvaranjem sile i istežanjem smatra ključnom za rast mišića, a čini se da kombinacija tih podražaja ima izražen aditivni učinak (Goldspink, 1999;

Hornberger i Chien, 2006; Vandeburgh, 1987). Vjeruje se da mišićna napetost u treningu s otporom narušava integritet skeletnog mišića, uzrokujući mehano-kemijski transducirane molekularne i stanične odgovore u mišićnim vlaknima i satelitskim stanicama (Toigo i Boutellier, 2006). Tijekom ekscentričnih mišićnih akcija razvija se pasivna mišićna napetost zbog produljenja ekstramiofibrilarnih elemenata, osobito sadržaja kolagena u izvanstaničnoj matrici i titinu (Toigo i Boutellier, 2006). To povećava aktivnu napetost koju su razvili kontraktilni elementi, pojačavajući hipertrofični odgovor. Iako samo mehanička napetost može proizvesti hipertrofiju mišića, malo je vjerojatno da će biti jedina koja je odgovorna za porast hipertrofije u treningu s otporom (Jones i Rutherford, 1987). Zapravo, pokazalo se da određene vrste treninga s otporom koje koriste visoki stupanj mišićne napetosti u velikoj mjeri izazivaju živčane prilagodbe bez vidljive mišićne hipertrofije (Vissing i sur., 2008).

Nadalje, trening s otporom može rezultirati lokaliziranim **oštećenjem mišićnog tkiva** koji je potencijalno odgovoran za provociranje hipertrofičnog odgovora (Evans, 2002; Hill i Goldspink, 2003). Oštećenja mogu biti specifična za samo nekoliko makromolekula tkiva ili rezultirati velikim kidanjima u sarkolemi, bazalnoj lamini i potpornom vezivnom tkivu izazivajući ozljede kontraktilnih elemenata i citoskeleta (Vierck i sur., 2000). Time se deformiraju membrane, posebno T-tubule, što dovodi do poremećaja homeostaze kalcija i posljedično oštećenja zbog kidanja membrana i/ili otvaranja rastezljivo aktiviranih kanala (Anderson i Behm, 2004). Jednom kada tijelo percipira oštećenje, neutrofilni migriraju u područje mikrotraume, a sredstva se zatim oslobađaju oštećenim vlaknima koja privlače makrofage i limfocite. Makrofagi uklanjaju stanične ostatke kako bi pomogli u održavanju ultrastrukture vlakana i proizvode citokine koji aktiviraju mioblaste, makrofage i limfocite. Vjeruje se da to dovodi do oslobađanja različitih čimbenika rasta koji reguliraju proliferaciju i diferencijaciju satelitskih stanica (Vandeburgh, 1987; Vierck i sur., 2000). Nadalje, područje ispod mioneuralnog spoja sadrži visoku koncentraciju satelitskih stanica, za koje se pokazalo da posreduju u rastu mišića. To daje vjerodostojnost mogućnosti da živci koji utječu na oštećena vlakna mogu potaknuti aktivnost satelitskih stanica, čime se potiče hipertrofija (Vierck i sur., 2000).

Brojne studije podržavaju anaboličku ulogu **metaboličkog stresa** izazvanog vježbanjem (Schott i sur., 1995; Smith i Rutherford, 1995), a neke su nagađale da nakupljanje metabolita može biti važnije od mehaničke napetosti u optimizaciji hipertrofičnog odgovora na trening (Shinohara i sur.,

1998). Iako se čini da metabolički stres nije bitna komponenta mišićnog rasta (Folland i sur., 2002), veliki broj dokaza pokazuje da može imati značajan hipertrofični učinak (Schoenfeld, 2010). Metabolički stres nastaje kao rezultat anaerobnog treninga koristeći glikolizu u proizvodnji ATP-a koji rezultira nakupljanjem metabolita kao što su laktati, vodikovi ioni, anorganski fosfat, kreatin i drugi (Suga i sur., 2009). Pretpostavlja se da su mehanizmi odgovorni za posredovanje hipertrofičkog odgovora upravo promjene nastale u hormonalnom miljeu, oticanje stanica, proizvodnja slobodnih radikala i povećana aktivnost transkripcijskih čimbenika usmjerenih na rast (Gordon i sur., 1994; Takarada i sur., 2000). Također se pretpostavlja da kiseliije okruženje glikolitičkog treninga može dovesti do povećane razgradnje vlakana i veće stimulacije simpatičke živčane aktivnosti, čime se posreduje u povećanom adaptivnom hipertrofičnom odgovoru (Buresh i sur., 2009).

Koliko je vremena potrebno da se hipertrofija mišića može uočiti?

Phillips (2000) je naveo da se hipertrofija izazvana treningom s otporom smatra sporim procesom, i da je potrebno 6-7 tjedana prije nego što se može pokazati značajna hipertrofija na razini cijelog mišića. Međutim, novije su studije otkrile hipertrofiju ranije u njihovim programima treninga. Seynnes i sur. (2007) su pronašli značajno povećanje površine poprečnog presjeka kvadricepsa femorisa nakon samo 20 dana treninga. Abe i sur. (2005) su izvijestili o povećanju poprečnog presjeka i volumena mišića natkoljenice nakon 2 tjedna niskointenzivnog okluzijskog treninga s otporom, dok su DeFreitas i sur. (2011) uočili značajan porast poprečnog presjeka mišića već nakon dva treninga. Međutim, jedno od mogućih razloga uočavanja rane hipertrofije mišića je ujedno i ograničenje studije koja je koristila pQCT skener koji ne može razlikovati mišićno tkivo od unutar-mišićne tekućine. Kao posljedica toga, moguće je da povećanje poprečnog presjeka mišića nije samo odražavalo povećanje kontraktilnog proteina, već i upalne reakcije izazvane treningom. No, kako je poprečni presjek mišića pokazao porast sa svakim sljedećim tjednom, a razumno je nagađati da je mišićni edem bio najveći tijekom prvog tjedna te da bi ostao jednak ili se smanjivao iz tjedna u tjedan, ovaj kontinuirani porast poprečnog presjeka tijekom vremena sugerira da je također došlo do povećanja kontraktilnog proteina (DeFreitas i sur., 2011). Konkretno, najveći porast je pronađen između trećeg i četvrtog tjedna.

Potrebno je spomenuti kako postoji uvjerenje da se mišićna hipertrofija ne događa istodobno s porastom jakosti. Vjeruje se da su živčani čimbenici kao što su aktivacija mišića agonista, podražljivost neurona, sinkronizacija motoričkih jedinica, koaktivacija mišića antagonista, i dr. primarni čimbenici porasta jakosti do kojih dolazi tijekom prvih nekoliko tjedana treninga s otporom kod prethodno netreniranih osoba (DeFreitas i sur., 2011). No, malo je razloga vjerovati da bi hipertrofija čekala da se dogode živčane prilagodbe, jer se te dvije prilagodbe međusobno ne isključuju. Možda su neka od ranih otkrića koja su upućivala na to da je hipertrofija spor proces bila ometena metodološkim ograničenjima. Tako na primjer, Blazevich i sur. (2007) nisu otkrili nikakvu promjenu u veličini mišića kvadriceps femoris nakon 5 tjedana treninga. Međutim, treba napomenuti da mnoge studije poput njihove koje nisu otkrile hipertrofiju možda nisu upotrijebili dovoljan podražaj za induciranje promjena (npr. unilateralni trening niskog intenziteta), a poznato je da ukupna količina uključene mišićne mase i/ili ukupni obavljani rad utječe na sistemske anaboličke hormonske odgovore koji su neophodni za rast mišića (Hansen i sur., 2001; Mulligan i sur., 1996). Još jedan razlog zašto je vremenski tijek hipertrofije slabo dokumentiran je taj što nekoliko studija koje su implementirale program treninga s otporom visokog intenziteta ili nisu provodile mjerenje dovoljno često tijekom studije (npr. mjere samo prije i poslije trenažnog programa) ili su koristile tehnike procjene hipertrofije koje su manje osjetljive na promijene od trenutne dostupne tehnologije (npr. koristili su antropometrijske metode).

1.1.3. Utjecaj treninga s otporom na arhitekturu mišića

Arhitektura mišića se definira kao makroskopski raspored mišićnih vlakana unutar mišića u odnosu na os generiranja sile (Lieber i Fridé, 2000). Prethodno je opisana kao "strukturno svojstvo cijelog mišića koje dominira njegovom funkcijom" (Lieber i Fridé, 2000). Kada je sonda ultrazvuka ispravno poravnata s ravninom snopova mišićnih vlakana, moguće je u potpunosti razlučiti orijentaciju tih snopova zbog visokog kontrasta između vezivnog i mišićnog tkiva (Cronin i Lichtwark, 2013). Stoga je to pravilno poravnanje sonde ključno za kvalitetu slike budući da iskorištava anizotropnu prirodu mišića. Duljina snopova mišićnih vlakana i kut penacije (tj. kut pružanja snopova mišićnih vlakana u odnosu na duboku aponeurozu), predstavljaju parametre arhitekture mišića koji se mogu otkriti ultrazvukom (Franchi i sur., 2018; Narici i sur., 2016), a njihove mjere općenito se smatraju pouzdanim i valjanim (Kwah i sur., 2013).

Arhitektura mišića je ranije bila prepoznata kao jedna od primarnih odrednica mišićne funkcije (Lieber i Fridé, 2000). Teoretski, duljina snopova mišićnih vlakana ovisi o duljini i broju sarkomera povezanih u seriju (Franchi i sur., 2014, 2017; Lieber i Fridé, 2000), dok se kut penacije uglavnom smatra strategijom koja omogućuje smještaj većeg broja kontraktilnog materijala duž duboke aponeuroze mišića, odnosno čime se povećava broj paralelno raspoređenih sarkomera (Kawakami i sur., 1993). Arhitektonske karakteristike mogu utjecati na odnose sila-duljina mišića i sila-brzina (Lieber i Fridé, 2000; Narici, 1999; Narici i sur., 2016). Lieber i Fridé (2000) su teoretski objasnili da kraća mišićna vlakna imaju nižu maksimalnu brzinu skraćivanja što vjerojatno utječe na brzinu kontrakcije na razini cijelog mišića. Nasuprot tome, maksimalna sila koju razvija mišić proporcionalna je broju paralelnih sarkomera, a time i njihovom kutu penacije (Narici i sur., 2016). Međutim, usprkos tim teorijskim razmatranjima, izvješća koja pokazuju jasan linearni odnos između funkcionalnih parametara i mišićne arhitekture *in vivo* su kontroverzna.

Pa se tako u različitim sportskim aktivnostima često uočava povezanost između parametara mišićne arhitekture i veličine mišića sa sportskom izvedbom. Pionirske studije pronašle su značajne negativne korelacije između duljina snopova vlakana mišića vastus lateralis i gastrocnemius i osobnih rekorda profesionalnih atletičara i atletičarki u sprintu na 100-m (Abe i sur., 2001; Kumagai i sur., 2000). Nasuprot tome, značajna pozitivna veza između duljina snopova istih mišića i sprinta slobodnim plivačkim stilom uočena je kod mladih plivača (Nasirzade i sur., 2014). Nadalje, nedavni sustavni pregled i meta-analiza pokazali su povezanost između visine skoka s debljinom mišića, ali ne i s mišićnom arhitekturom donjih ekstremiteta (Ruiz-Cárdenas i sur., 2018). Unatoč tome, postoje neke studije koje izvještavaju o pozitivnim vezama između visine skoka i mišićne arhitekture kod sportaša koji pripadaju različitim sportovima (Methenitis i sur., 2016; Secomb i sur., 2015).

Također, u nekim longitudinalnim studijama postotne veličine promjena mjera učinkovitosti pozitivno su povezane s postotnim veličinama promjena morfoloških mišićno-koštanih parametara. Na primjer, u studiji provedenoj kod igračica *softballa* pronađeni su značajni odnosi između promjena u mišićnoj arhitekturi (debljini mišića i duljini snopova mišićnih vlakana) mišića vastus lateralis i promjena u sportsko-specifičnoj izvedbi sprinta (tj. vrijeme za dostizanje prve i druge baze) tijekom natjecateljske sezone (Nimphius i sur., 2012). Slično tome, kod mladih natjecatelja bacača kugle uočena je značajna korelacija između postotne promjene povećanja debljine mišića

vastus lateralis i postotne promjene povećanja rezultata u testu specifičnog bacanja kugle, nakon prilagođenog programa treninga (Methenitis i sur., 2016).

Međutim, navedene rezultate treba razmotriti s oprezom, budući da studije provedene u kontroliranim laboratorijskim uvjetima pokazuju kontradiktorne rezultate. Uzimajući u obzir odnose između funkcionalnih parametara i mišićnih svojstava, neki autori su pronašli čvrste uzročno-posljedične veze (Blazevich, Cannavan, i sur., 2007), dok drugi nisu (Noorkõiv i sur., 2014). Osim povezanosti sa sportskim performansama, poznato je da su morfološka i mehanička svojstva mišića i tetiva pod utjecajem treninga. Na primjer, poznato je da se hipertrofija skeletnih mišića javlja kao odgovor na trening jakosti (Franchi i sur., 2014; Narici i sur., 1989; Seynnes i sur., 2007). Nadalje, različite prilagodbe u mišićnoj arhitekturi (Franchi i sur., 2016) zabilježene su nakon ekscentričnih, koncentričnih (Franchi i sur., 2014; Franchi i sur., 2018), ili izometrijskih (Alegre i sur., 2014) modaliteta treninga.

Treningom s otporom inducirane promjene u strukturi mišićne morfologije mogu se uočiti ispitivanjem mišićne arhitekture, posebno kutom penacije i duljine snopova mišićnih vlakana (Maden-Wilkinson i sur., 2020). Tako su brojne studije otkrile kako kut penacije raste nakon treninga s otporom (Aagaard i sur., 2001; Balshaw i sur., 2017; Matta i sur., 2015; Baroni i sur., 2013; Blazevich i sur., 2007; Blazevich i sur., 2003; Scanlon i sur., 2014), te da je kut penacije veći kod trenirane nego netrenirane populacije (Fukutani i Kurihara, 2015; Kawakami i sur., 1993; Seynnes i sur., 2013).

Istraživanja o promjenama duljina mišićnih vlakana nakon kratkoročnog treninga s otporom i dalje su kontroverzna. Postoje istraživanja s izvješćima o nikakvoj promjeni nakon izometrijskog treninga s otporom (Alegre i sur., 2014) ili konvencionalnog izoinercijskog treninga (koncentričnog i ekscentričnog) (Blazevich i sur., 2007; Ema i sur., 2013; Erskine i sur., 2010, 2011; Wakahara i sur., 2015) te povećanjem duljine vlakana nakon izometrijskog (Noorkoiv i sur., 2010) i izoinercijskog treninga s otporom (Alegre i sur., 2006; Ullrich i sur., 2015).

Iz svega navedenog moguće je naslutiti kako su promjene u jakosti, hipertrofiji i arhitekturi mišića moguće i da ih je moguće u većoj ili manjoj mjeri postići treningom s otporom. Ključni čimbenik uspješnog treninga s otporom bez obzira na dob ili trenutačno trenažno stanje vježbača je odgovarajući dizajn trenažnog programa (Kraemer i Ratamess, 2004). On podrazumijeva pravilnu

izvedbu vježbi (tj., tehniku, disanje, pravilno korištenje opreme i sl.), postavljanje željenih ciljeva (definiranje određenih područja interesa), metode mjerenja i procjenjivanja napretka trenažnog programa s obzirom na postavljene ciljeve, uključivanje specifičnih metoda treninga kao i pravilan odabir akutnih programskih varijabli. Važno je i da trening s otporom nadziru kvalificirani stručnjaci iz tog područja (Mazzetti i sur., 2000) koji moraju dobro poznavati individualni status vježbača, ciljeve treninga, neke od važnijih koncepata napredovanja koje je preporučio ACSM, te oblikovanje programa treninga s otporom i sve s njime povezane čimbenike (Ratamess i sur., 2009).

1.1.4. Oblikovanje programa treninga s otporom - akutne programske varijable

Osmišljavanje i oblikovanje programa treninga s otporom složen je proces koji se uvelike vrti oko manipulacije varijablama treninga koje je Kraemer (1983) popularno nazvao „*akutnim programskim varijablama*“. Pravilno programiranje treninga s otporom uključuje manipulaciju svakom pojedinom akutnom programskom varijablom specifičnom za zadane ciljeve (Kraemer i Ratamess, 2004; Schoenfeld i sur., 2017). Promjenom jedne ili više ovih varijabli može se značajno utjecati na podražaje treninga i tako potencijalno pogodovati uvjetima za održavanje, odnosno povećanje motivacije vježbača. Postoje brojni načini manipuliranjem akutnim programskim varijablama, a program treninga s otporom svojevrsan je njihov kompozit koji uključuje: 1) vrstu mišićnih akcija, 2) izbor vježbi, 3) redoslijed izvođenja vježbi i strukturu vježbanja, 4) veličinu trenažnog opterećenja, 5) volumen treninga, 6), brzinu ponavljanja, 7) učestalost treninga, i 8) trajanje intervala odmora između serija (Kraemer i sur., 2002).

Vrste mišićnih akcija

Većina programa treninga s otporom uključuju prvenstveno dinamička ponavljanja s koncentričnim i ekscentričnim mišićnim akcijama, dok izometrične mišićne akcije igraju sekundarnu ulogu (Kraemer i Ratamess, 2004). U odnosu na koncentrične mišićne akcije, ekscentričnim mišićnim akcijama mogu se proizvesti veće sile, potrebno je aktivirati manje motoričkih jedinica (Komi i sur., 1987), zahtijevaju manje energije i ključne su za optimalnu

hipertrofiju, ali mogu rezultirati većom zakašnjelom pojavom mišićne boli (eng. *Delayed Onset Muscle Soreness* – DOMS) (Ebbeling i Clarkson, 1989).

Najveći porast dinamičke mišićne jakosti javlja se kada su ekscentrične mišićne akcije uključene u trenažni program (Kraemer i Ratamess, 2004). Uloga manipulacije vrstom mišićnih akcija tijekom treninga s otporom je minimalna s obzirom na to da većina programa uključuje obje, i koncentričnu i ekscentričnu mišićnu akciju, osim ako se ne koriste neke napredne metode treninga s otporom.

Sadržaji – izbor vježbi

U treningu s otporom mogu se odabrati dvije opće vrste vježbi, osnovne i izolirajuće, odnosno višezglobne i jednozglobne (Vuk, 2022). Izolirajuće vježbe su rotacijske u izlazu i jednozglobne su, te aktiviraju jednu mišićnu skupinu ili jedan mišić, dok su osnovne vježbe općenito linearne u izlazu kao rezultat rotacije koja se odvija na više zglobova i aktiviraju veći broj mišića ili mišićnih skupina (Gentil i sur., 2017).

Rutherford i Jones (1986) te Chilibeck i sur. (1998) su sugerirali da se hipertrofija mišića javlja ranije kada se koriste izolirajuće vježbe u usporedbi s osnovnim vježbama zbog dugotrajnih neuroloških prilagodbi potrebnih za izvođenje osnovnih vježbi. Kao rezultat toga, mnogi treneri i vježbači vjeruju da je potrebno dodavanje izolirajućih vježbi u trenažni program za optimizaciju mišićne hipertrofije i jakosti. Doista, trenutne preporuke ACSM-a sugeriraju da bi treninzi s otporom trebali uključivati osam do deset i osnovnih i izolirajućih vježbi (*American College of Sports Medicine*, 2009; Garber i sur., 2011). Međutim, s obzirom na to da je nedostatak vremena najčešće navođena prepreka u pridržavanju redovitosti treniranja (Gómez-López i sur., 2010), vremenska obveza koja proizlazi iz ovih preporuka ACSM-a možda neće biti prikladna ili praktična za mnoge ljude.

Studije koje su uspoređivale porast hipertrofije i jakosti mišića gornjih ekstremiteta nisu pronašle razlike između utjecaja osnovnih i izolirajućih vježbi, niti dodatne učinke uključivanjem izolirajućih vježbi programu vježbanja osnovnih vježbi (Gentil i sur., 2017). Jedno od ograničenja u trenutnoj literaturi je da metode koje se koriste za mjerenje veličine mišića (dijagnostički

ultrazvuk i opsezi) ne uzimaju u obzir neujednačenu lokalnu hipertrofiju mišića (Gentil i sur., 2013). Budući da su prethodna istraživanja sugerirala da osnovne i izolirajuće vježbe rezultiraju različitim obrascima hipertrofije mišića (Wakahara i sur., 2012, 2013), moguće je sugerirati da su rezultati usporedbe ograničeni na analiziranu regiju i nisu nužno reprezentativni za odgovor cijelog mišića. Na temelju toga može se tvrditi da bi izvođenje izolirajuće vježbe bilo potrebno za potpuni razvoj mišića. Međutim, sporno je bi li se to postiglo samo uključivanjem izolirajuće vježbe ili bi jednostavno variranje između osnovnih vježbi donijelo iste prilagodbe. Fonseca i sur. (2014) su utvrdili da je izvođenje većeg broja osnovnih vježbi (čućanja, mrtvog dizanja i nožnog potiska) u usporedbi s izvođenjem samo jedne osnovne vježbe (čućanja) proizvelo slično povećanje ukupne površine poprečnog presjeka kvadricepsa. Međutim, upotreba varijacije više osnovnih vježbi proizvela je hipertrofiju u svim mišićima kvadricepsa, dok je upotreba samo čučnja povećala vastus medialis i rectus femoris.

Još jedna zanimljivost je da se vremenski tijek hipertrofičnih prilagodbi u mišićima nadlaktice i trupa razlikuje nakon treninga potiska s ravne klupe. Prema rezultatima istraživanja Ogasaware i sur. (2012) debljina mišića pectoralis major značajno se povećala nakon jednog tjedna, dok je povećanju debljine mišića tricepsa trebalo pet tjedana da dosegne značajan porast. Rezultati pokazuju da se vremenski tijek hipertrofičnog odgovora mišića razlikuje između mišića ruku i trupa kao odgovor na osnovne vježbe. Ako je tome tako, izolirajuće vježbe mogle bi biti korisne u treningu početnika iz estetskih razloga, jer je za takve promjene potrebno manje vremena. Ipak, ovaj zaključak je ograničen jer studija nije uspoređivala učinke treninga osnovnih i izolirajućih vježbi; stoga nije moguće potvrditi da je odgođeni odgovor posljedica upotrebe osnovnih vježbi ili je karakteristika svojstvena mišiću triceps brahii.

Nadalje, osnovne vježbe uključuju složeniju živčano-mišićnu aktivaciju i koordinaciju, a zbog veće uključenosti aktivne mišićne mase i većeg vanjskog opterećenja, ove se vježbe općenito smatraju najučinkovitijim vježbama za povećanje mišićne jakosti i snage (Kraemer i Ratamess, 2004). Vježbe koje uključuju veći broj mišića i aktivaciju velikih mišićnih skupina pokazale su i najveće akutne metaboličke odgovore (Adeel i sur., 2022). Na primjer, pokazalo se da vježbe kao što su čučanj, nožni potisak i ispružanje potkoljenica izazivaju veće stope potrošnje kisika od vježbi kao što su rameni potisak, potisak s ravne klupe i pregib podlaktica stojeći (Adeel i sur., 2022). Osim toga, ove vježbe su izazvale i najveće akutne hormonske odgovore (Komi, 2003).

Dakle, količina mišićne mase uključene u pokret značajno utječe na akutne metaboličke zahtjeve i anabolički hormonski odgovor koji imaju izravne implikacije na programe treninga s otporom usmjerene na razvoj lokalne mišićne izdržljivosti i smanjenje tjelesne mase i ukupne tjelesne masti.

Analizom trenutne literature čini se da je uključivanje izolirajućih vježbi u program treninga s otporom opravdan samo kako bi se ispravile neravnoteže između različitih mišićnih skupina. To bi mogao biti slučaj tijekom pripreme bodybuildera za natjecanje, jer se tamo procjenjuje njihova mišićna simetrija i uravnotežen razvoj mišića. Druga mogućnost korištenja izolirajućih vježbi bila bi u rehabilitacijskim programima ako postoji mišić ili mišićna skupina koja predstavlja neravnotežu i time povećani rizik od ozljede ili boli, kao što je to kod mišića rotatorne manžete (Giannakopoulos i sur., 2004), stražnje strane natkoljenica (Maniar i sur., 2016; Timmins i sur., 2016), ili posterolateralne muskulature kuka (Fukuda i sur., 2010, 2012).

Zaključno, izbor vježbi važan je korak pri dizajniranju programa treninga s otporom, međutim, postoje mnoge kontroverze pri njihovom izboru, osobito pri odlučivanju između osnovnih i izolirajućih vježbi. Neki autori sugeriraju da bi izolirajuće vježbe mogle potaknuti veći porast mišića jer se manje oslanjaju na neuronske čimbenike (Chilibeck i sur., 1998; Rutherford i Jones, 1986). S druge strane, neki autori (*American College of Sports Medicine*, 2009; Kraemer i sur., 2002) sugeriraju da su osnovne vježbe učinkovitije jer omogućuju savladavanje većeg vanjskog otpora. Stoga, kontroverza o preferiranju osnovnih i izolirajućih vježbi ostaje jer su studije koje uspoređuju kronične učinke jednih i drugih vježbi na povećanje jakosti i hipertrofiju mišića oskudne.

Redoslijed izvođenja vježbi i struktura vježbanja

Redoslijed izvođenja vježbi i broj mišićnih skupina aktiviranih tijekom treninga značajno mogu utjecati na veličinu akutne proizvodnje sile, odnosno jakost mišića (Sforzo i Touey, 1996). Načelno, postoje tri osnovne strukture vježbanja: 1) treninzi za cijelo tijelo (eng. *Total Body Workout*), 2) treninzi za gornji/donji dio tijela (eng. *Upper Lower Full Body Workout*) i 3) treninzi podijeljeni prema regiji tijela ili mišićnoj skupini (eng. *Split Routine Workout*).

Treninzi za cijelo tijelo uključuju izvođenje vježbi koje aktiviraju sve važne mišićne skupine (tj. jednu do dvije vježbe za svaku veću mišićnu skupinu). Treninzi za gornji/donji dio tijela uključuju izvođenje vježbi za gornji dio tijela tijekom jednog treninga i vježbi za donji dio tijela tijekom drugog. Treninzi podijeljeni prema regiji tijela ili mišićnoj skupini uključuju izvođenje vježbi za određene mišićne skupine tijekom istog treninga (npr. trening prsa/biceps u kojem se izvode sve vježbe za prsa, a zatim se izvode sve vježbe za biceps).

Sve tri strukture vježbanja učinkovite su za poboljšanje mišićnog fitnesa, a izbor vrste treninga često ovisi o individualnim ciljevima, vremenu raspoloživom za trening, učestalosti treninga i osobnim preferencijama. Glavne razlike između navedenih struktura vidljive su u broju vježbi koje je moguće izvesti po svakom treningu (tj. tri do četiri vježbe za određenu mišićnu skupinu mogu se izvoditi tijekom treninga podijeljenom prema regiji tijela za razliku od jedne do dvije vježbe po mišićnoj skupini u treningu za cijelo tijelo), te u trajanju oporavka između treninga (tj. glavna mišićna skupina može se trenirati jednom do dva puta tjedno za trening podijeljen prema regiji tijela, dva do tri puta tjedno za trening za gornji/donji dijela tijela i tri ili više puta tjedno za trening cijelog tijela).

Nakon što se definira odgovarajuća struktura vježbanja, izabiru su sadržaji ovisno o ciljnoj usmjerenosti treninga (tj., za razvoj mišićne jakosti, hipertrofije ili lokalne mišićne izdržljivosti). Za razvoj mišićne jakosti i hipertrofije preporuča se izvođenje osnovnih vježbi na početku treninga dok još nije nastupio prevelik umor, za razliku od treninga usmjerenog na razvoj lokalne mišićne izdržljivosti gdje je umor jedna od njegovih važnijih karakteristika.

U treningu jakosti se prilikom definiranja redoslijeda izvođenja vježbi preporuča izvođenje višezglobnih vježbi velikih mišićnih skupina i vježbi većeg intenziteta (veći postotak od 1RM) prije izvođenja jednozglobnih vježbi malih mišićnih skupina i manjeg intenziteta, te izmjenjivanje vježbi gornjeg i donjeg dijela tijela ili agonističko-antagonističke mišićne skupine.

Veličina trenažnog opterećenja (intenzitet) i broj ponavljanja

Veličina trenažnog opterećenja opisuje veličinu podignutog tereta ili savladanog otpora neke vježbe i uvelike ovisi o drugim akutnim programskim varijablama kao što su redoslijed izvođenja

vježbi, volumen, učestalost treninga, vrsta mišićne akcije, brzina izvođenja pojedinog ponavljanja i duljina intervala odmora. Stoga ona može značajno utjecati na akutne metaboličke, hormonalne, živčane i srčano-dišne odgovore na trening (Komi, 2003). Odabir odgovarajuće veličine opterećenja ovisi o individualnom trenažnom stanju i ciljevima. Na primjer, manja vanjska opterećenja, manja od 45-50% od 1RM, mogu povećati dinamičku mišićnu jakost netreniranih osoba, jer tu početnu fazu razvoja jakosti karakterizira poboljšanje u vidu motoričkog učenja i koordinacije. Velika vanjska opterećenja nisu potrebna za razvoj jakosti na ovoj razini treniranosti dok početnik uči ispravnu formu i tehniku. Međutim, potrebno je postupno povećavati opterećenje da bi se povećala i maksimalna jakost i prešlo sa srednje na naprednu razinu treniranosti. Hakkinen i sur. (1985) su utvrdili da su opterećenja veća od 80-85% od 1RM potrebna za proizvodnju daljnjih živčanih prilagodbi tijekom naprednog treninga s otporom. To je važno iz razloga što su živčane prilagodbe ključne za razvoj maksimalne jakosti jer prethode razvoju hipertrofije, koja pak rezultira manjom potrebom za aktivnošću motoričkih jedinica potrebnih za stvaranje određene sile (Ploutz i sur., 1994). Maksimiziranje jakosti i hipertrofije mišića može se postići samo kada se regrutira maksimalan broj motoričkih jedinica. Stoga je kod iskusnih vježbača potrebno veliko vanjsko opterećenje za regrutiranje motoričkih jedinica visokog praga podražaja koje se možda neće aktivirati korištenjem laganih do umjerenih opterećenja.

Također, prema Hennemanovom principu veličine, regrutiranje motoričkih jedinica odvija se od najmanjih do najvećih, stoga se vjeruje da opterećenja manja od 65% od 1RM nisu dovoljna za promicanje značajne hipertrofije mišića. U skladu s tim, mnoge studije su preporučile korištenje umjerenog intenziteta od oko 65% do 75% 1RM, što je ekvivalent 8-12 ponavljanja do točke trenutnog mišićnog otkaza (*American College of Sports Medicine*, 2009).

Međutim, postoje studije koje su dokazale da korištenje niskih intenziteta također može rezultirati povećanom mišićnom masom. Tako su Bird i sur. (2010) pokazali da je korištenje niskih intenziteta (kao što je 30% od 1RM) uz izvođenje vježbe do trenutnog mišićnog otkaza učinkovitije u proizvodnji akutnog anabolizma mišića od treninga visokog intenziteta i malog volumena rada.

Postoji obrnuto proporcionalna veza između veličine vanjskog opterećenja i broja ponavljanja (Kraemer i Ratamess, 2004). Nekoliko je istraživanja pokazalo da je trening s opterećenjima koji odgovaraju 80-85% od 1RM i više (npr. 1-6 RM) bio najučinkovitiji za povećanje maksimalne dinamičke jakosti (Campos i sur., 2002). Čini se da ovaj raspon opterećenja maksimalno regrutira

mišićna vlakna i specifično razvija maksimalnu jakost (Hakkinen i sur., 1985; Peterson i sur., 2004). Iako su zabilježena značajna povećanja jakosti pomoću opterećenja koja odgovaraju 70-80% od 1RM (npr. 6-12 RM) (Kraemer, 1997), vjeruje se da taj raspon možda nije toliko učinkovit u povećanju maksimalne jakosti kod naprednih vježbača u treningu s otporom u usporedbi s većim opterećenjem (npr. 85% od 1RM).

Raspon opterećenja od 6 do 12 RM obično se koristi u programima čiji je cilj razvoj mišićne hipertrofije. Iako su velika vanjska opterećenja učinkovita za porast mišića (Campos i sur., 2002), sugerira se da raspon opterećenja od 6-12 RM može pružiti najbolju kombinaciju opterećenja i volumena (Kraemer i sur., 2002; Lasevicius i sur., 2018). Opterećenja manja od toga (12-15 RM i lakše) rijetko povećavaju maksimalnu jakost (Campos i sur., 2002; Peterson i sur., 2004), ali su vrlo učinkovita za povećanje apsolutne lokalne mišićne izdržljivosti (Campos i sur., 2002; Stone i Coulter, 1994). Stoga *American College of Sports Medicine* (2009) zaključuje da je najbolji način za optimizaciju hipertrofije mišića korištenje različitih veličina opterećenja, od 30% do 80% 1RM, kako bi se zadovoljili i mehanički i metabolički čimbenici.

Volumen treninga

Ukupni volumen treninga se općenito procjenjuje iz ukupnog broja serija i broja ponavljanja izvedenih tijekom vježbanja. Pokazalo se da su neki sustavi, uključujući živčani, metabolički, hormonalni i mišićni, osjetljivi na volumen treninga (Kraemer, 1997; Kraemer i sur., 2000). Promjena volumena treninga može se postići promjenom broja izvedenih vježbi, broja ponavljanja unutar serija ili broja izvedenih serija po vježbi. Stoga se velika vanjska opterećenja s malim brojem ponavljanja i umjerenim do velikim brojem serija (tj. karakterističnih za trening jakosti i snage) (Hakkinen i sur., 1985) općenito smatraju programima malog volumena zbog malog broja ponavljanja koja se izvode po seriji. Također, ako se ne mijenja intenzitet, volumen se može povećati povećanjem broja izvedenih serija i/ili vježbi ili povećanjem učestalosti treninga. Umjerena do velika opterećenja, umjeren do velik broj ponavljanja i višestruke serije po vježbi karakteristični su za trening hipertrofije i općenito se smatraju programima velikog volumena kada se izvodi nekoliko vježbi po treningu (npr. najmanje šest do osam vježbi) (Peterson i sur., 2004).

Ukupni volumen treninga odgovoran je ne samo za porast jakosti, već i za razvoj mišićne hipertrofije (Moss i sur., 1997). To je djelomično potkrijepljeno većom hipertrofijom povezanom s programima velikog volumena i višestrukim serijama u usporedbi s programima manjeg volumena i programima s jednom serijom kod vježbača u treningu s otporom (Kraemer, 1997; Kraemer i sur., 2000; Nindl i sur., 2003; Rhea i sur., 2003). Tradicionalni trening jakosti s velikim vanjskim opterećenjem i malim brojem ponavljanja može dovesti do značajnog porasta hipertrofije (Campos i sur., 2002; K. Hakkinen i sur., 1985); međutim, pretpostavlja se da ukupni rad uključen u tradicionalni trening jakosti možda nije dovoljan za njenu maksimizaciju (Fleck i Kraemer, 2004). S druge pak strane, vrlo lagana do umjerena opterećenja koja se izvode u više serija s velikim brojem ponavljanja karakteristična su za trening lokalne mišićne izdržljivosti i smatraju se vrlo visokog ukupnog volumena, ali ne i optimalnim za razvoj mišićne hipertrofije (Kraemer i Ratamess, 2004).

Stoga bi se ukupni volumen treninga trebao temeljiti na ciljevima i individualnom trenažnom statusu jer postoje brojne mogućnosti za učinkovit razvoj mišićne jakosti i hipertrofije. Velik broj znanstvenih radova je istraživao optimalan broj izvedenih serija po vježbi i općenito je utvrđeno kako dvije do šest serija po vježbi pružaju značajno povećanje mišićne jakosti trenirane i netrenirane populacije (Campos i sur., 2002; Housh i sur., 1992; Kraemer, 1997; Rhea i sur., 2003).

Međutim, problem koji se javlja u većini studija je da trenažni volumeni nisu bili izjednačeni između grupa, a nekoliko studija koje su nastojale izjednačiti volumene su koristile trenažni volumen grupe visokog intenziteta kao standard za grupu niskog intenziteta, što je u konačnici rezultiralo manjim volumenima u obje grupe, a time su se i potencijalno ograničile i mišićne prilagodbe (Lasevicius i sur., 2018). Dobro je poznato da volumen igra važnu ulogu u mišićnim prilagodbama, s dokazima o odnosu doza-odgovor između volumena i hipertrofije (Schoenfeld, Ogborn i Krieger, 2017). Stoga, kada se izvode različiti intenziteti treninga s otporom, volumen mora biti dovoljno dobro izjednačen između grupa kako bi se osigurali maksimalni odgovori u svakoj eksperimentalnoj grupi. Stoga je zanimljiv nalaz Laseviciusa i sur. (2018) koji su utvrdili jednake hipertrofične učinke kod grupa koje su imale izjednačene ukupne volumene, a različite veličine opterećenja (40% nasuprot 80% 1RM), odnosno, zaključuju kako protokoli osmišljeni za maksimiziranje metaboličkog stresa (tj. veliki broj ponavljanja i niskog do umjerenog intenziteta)

i protokoli osmišljeni za maksimiziranje mehaničke napetosti (mali broj ponavljanja i visokog intenziteta) pružaju slična hipertrofična povećanja kada su volumeni opterećenja izjednačeni.

Također, potrebno je istaknuti da procjena ukupnog volumena treninga iz ukupnog broja serija i broja ponavljanja izvedenih tijekom vježbanja, iako vrlo jednostavna za računanje, čak i za vrlo velike skupine sportaša, nudi lošu procjenu stvarnog trenažnog stimulusa. Primjenjiviji pristup je uzeti u obzir i veličinu opterećenja tijekom svakog ponavljanja koji se naziva volumenskim opterećenjem (Scott i sur., 2016). Volumensko opterećenje je proširenje navedene metode koja jednostavno uključuje umnožak broja izvedenih ponavljanja određene vježbe s apsolutnim opterećenjem savladanim u tim ponavljanjima. Apsolutno volumensko opterećenje za svaku različitu vježbu izvedenu tijekom treninga može se zbrojiti kako bi se izračunala ukupna težina podignuta tijekom treninga. Međutim, mora se uzeti u obzir da i ovaj pristup ima nekoliko ograničenja. Nije moguće usporediti apsolutne mjere volumenskog opterećenja između pojedinaca, s obzirom na to da ova mjera ne odražava relativni intenzitet tereta koji podiže svaki pojedinac (Scott i sur., 2016). Stoga je predloženo povoljnije rješenje u vidu umnoška broja ponavljanja izvedenih s relativnim, a ne apsolutnim opterećenjem koje se koristi, čime se volumen opterećenja mjeri u odnosu na sposobnosti svakog sudionika. Ovom se metodom ispravljaju varijacije u jakosti između pojedinaca, dok se još uvijek dobiva indeks stvarnog podražaja vježbanja u proizvoljnim jedinicama (Scott i sur., 2016).

Brzina ponavljanja

Brzina kojom se izvode dinamička ponavljanja (tj. kadenca) može imati utjecaj na živčane (Hakkinen i sur., 1985), hipertrofične (Housh i sur., 1992) i metaboličke (Adeel i sur., 2022) odgovore u treningu s otporom.

Postoje dvije vrste sporih mišićnih akcija u treningu s otporom: nenamjerne i namjerne. Nenamjerne spore kontrakcije koriste se tijekom ponavljanja visokog intenziteta u kojima su ili opterećenje i/ili umor odgovorni za brzinu izvedbe. Konkretnije, vježbač proizvodi maksimalnu silu, ali je brzina izvedbe zbog velikog opterećenja ili pojave umora, spora. U studiji Mookerjee i Ratamess (1999) prikazan je utjecaj veličine opterećenja i umora na brzinu ponavljanja kod osoba

koje izvode svako ponavljanje maksimalnim naporom: ispitanici su tijekom potiska s ravne klupe s opterećenjem od 5 RM koncentričnu fazu u prvih tri ponavljanja izvodili 1,2-1,6 sekundi, dok su posljednja dva ponavljanja, zbog umora, izvodili 2,5 odnosno 3,3 sekunde.

S druge strane, namjerne spore kontrakcije se izvode submaksimalnim opterećenjima gdje vježbač ima veću kontrolu nad brzinom izvedbe. No, pokazalo se da je proizvodnja koncentričnih sila bila za otprilike trećinu manja (npr. 771 naspram 1167 N) pri namjerno sporijoj kontrakciji (5 sekundi koncentrična i 5 sekundi ekscentrična) u usporedbi s tradicionalnom (umjerenom) brzinom s odgovarajućom nižom neuronskom aktivacijom (Keogh i sur., 1999). To sugerira da aktivnost motoričkih jedinica može biti ograničena pri namjernim sporim mišićnim akcijama. Iako namjerne spore mišićne akcije mogu pružiti određenu korist u razvoju lokalne mišićne izdržljivosti i u hipertrofijskom treningu, manja opterećenja možda neće pružiti optimalan podražaj za poboljšanje maksimalne jakosti trenirane populacije (iako početnici mogu imati koristi u početnim fazama treninga). Također je utvrđeno da su izvedbe serija od 10 ponavljanja pomoću vrlo sporih mišićnih akcija (10 sekundi koncentrična i 5 sekundi ekscentrična) u usporedbi sa sporim mišićnim akcijama (2 sekunde koncentrična i 4 sekunde ekscentrična) rezultirale smanjenjem vanjskog opterećenja za 30% i da je to dovelo do znatno manjeg razvoja jakosti u većini testiranih vježbi nakon 10 tjedana treninga (Keeler i sur., 2001). U usporedbi sa sporim brzinama, pokazalo se da su umjerenе (1-2 sekunde koncentrična i 1-2 sekunde ekscentrična) i brze (1 sekunda koncentrična i 1 sekunda ekscentrična) mišićne akcije učinkovitije za poboljšanje mišićnih performansi kao što su ukupni broj ponavljanja, ukupni rad i izlazna snaga, te volumen (Morrissey i sur., 1998) i povećanje stope porasta jakosti (Hay i sur., 1983).

Učestalost treninga

Broj treninga s otporom koji se izvode tijekom određenog vremenskog razdoblja (npr. jednoga tjedna) također može utjecati na veličinu mišićne prilagodbe. Učestalost uz broj treninga također uključuje i koliko se puta izvode određene vježbe, odnosno koliko se često određene mišićne skupine treniraju tjedno (Kraemer i Ratamess, 2004). Učestalost treninga ovisi o nekoliko čimbenika kao što su volumen i veličina trenažnog opterećenja, izbor vježbi, trenutno trenažno stanje, sposobnost oporavka, unos nutrijenata i ciljevi treninga. Tako, na primjer, trening s velikim

vanjskim opterećenjima produžuje nužno vrijeme oporavka prije sljedećeg treninga, osobito nakon osnovnih vježbi koje uključuju slične mišićne skupine. Korištenje iznimno velikih vanjskih opterećenja može zahtijevati i do 72 sata oporavka, dok velika i umjerena opterećenja mogu zahtijevati kraće vrijeme oporavka. Brojne studije o treningu s otporom koristile su učestalost od 2-3 naizmjenična dana tjedno kod netreniranih osoba (Hickson i sur., 1994). Pokazalo se da je to učinkovita frekvencija za početnike, dok je 1-2 treninga tjedno dovoljno za održavanje razine jakosti trenirane populacije (Graves i sur., 1988; Peterson i sur., 2004). U nekoliko studija je pokazano kako su 4-5 treninga tjedno superiornija od 3 treninga; dok su se 3 treninga tjedno pokazala superiornijim od 1 i 2, a 2 treninga tjedno superiornija od 1 za povećanje maksimalne jakosti (Graves i sur., 1988). Povećanje učestalosti treninga može pružiti bolju specijalizaciju kao što je veći izbor vježbi i veći trenažni volumen po mišićnoj skupini u skladu sa specifičnim ciljevima.

Međutim, potrebno je napomenuti kako se učestalost vježbanja između naprednijih vježbača može znatno razlikovati. Pokazalo se da napredni dizači utega (eng. *Weightlifting*) i *bodybuilderi* koriste visokofrekventni trening (četiri do šest treninga tjedno), dok je frekvencija kod vrhunskih *bodybuildera* još i veća (Kraemer i Ratamess, 2004).

Interval odmora

Interval odmora označava vrijeme posvećeno oporavku između serija i vježbi, s naglaskom na vrijeme između serija. Trajanje intervala odmora između serija i vježbi ovisi o većem broju faktora kao što je veličina trenažnog opterećenja, ciljevi, razina treniranosti i željeni energetske sustav, a njegovo definiranje važan je čimbenik pri oblikovanju treninga s otporom jer može značajno utjecati na metaboličke, hormonalne i srčano-žilne odgovore tijekom treninga s otporom, kao i na umor, oporavak mišića, cilj treninga, izvedbu dodatnih serija, ukupno trajanje treninga ili neke druge prilagodbe u treningu (Pincivero i sur., 1997; Robinson i sur., 1995; Fleck i Kraemer, 2004). Istraživanja su pokazala da trajanje intervala odmora može imati značajan utjecaj na proizvodnju sile u mišiću, konkretno, kratki intervali odmora od jedne minute mogu značajno smanjiti mehanički izlaz sile i snage u mišiću (Kraemer, 1997), dok su ti isti kratki intervali korisni za razvoj hipertrofije i lokalne mišićne izdržljivosti. Primjerice, Kraemer (1997) je izvijestio o razlikama u

izvedbi s intervalima odmora od tri naspram jedne minute. Svi su ispitanici mogli izvesti 10 ponavljanja (opterećenje od 10 RM) u tri serije kada su intervali odmora u vježbama nožni potisak i potisak s ravne klupe trajali tri minute. Međutim, kada su intervali odmora smanjeni na jednu minutu, izveli su 10, 8 i 7 ponavljanja po seriji.

Interval odmora može značajno utjecati na relativni doprinos tri energetska sustava. U treningu jakosti se kao izvor energije dominantno koristi kreatin-fosfat (PC), a u treningu hipertrofije uglavnom kreatin-fosfat i glikoliza uz manje doprinose aerobnog metabolizma (Kraemer i Ratamess, 2004).

Performanse jakosti uvelike ovise o anaerobnom oslobađanju energije, prvenstveno putem PC. Studije pokazuju da je vrijeme poluraspada ATP-PC sustava otprilike 20 sekundi (pa sve do 36-48 sekundi); stoga je potrebno osigurati maksimalnu dostupnost energije i potpuni odmor od otprilike 2 do 4 minute između serija da se osiromašene ATP i PC unutar-mišićne zalihe obnove. To naglašava važnost značajki oporavka tijekom treninga jakosti. Važno je napomenuti da će se duljina intervala odmora razlikovati ovisno o ciljevima određene vježbe, ali i da ne zahtijevaju sve vježbe jednaki interval odmora. Jakost mišića može se povećati pomoću kratkih intervala odmora, ali sporije u usporedbi s dugim razdobljima odmora, čime se pokazuje potreba za utvrđivanjem ciljeva.

Aktiviranje glikolitičkih i kreatin-fosfatnih energetske sustava može poboljšati trening za razvoj mišićne hipertrofije. Čini se da su kraći intervali odmora u trajanju od jedne do dvije minute snažan aktivator anaboličkih hormona i stimulator lokalnog protoka krvi te rezultiraju značajnom proizvodnjom metabolita (npr. laktata) (Kraemer, 1997). Već dugo je poznata važnost lokalnog protoka krvi za povećanje sinteze mišićnih proteina (Biolo i sur., 1995). Biolo i sur. (1995) su pokazali povećanje transporta aminokiselina od 60-120% (ovisno o aminokiselini) tri sata nakon treninga s otporom. To djelomično može biti jedno od objašnjenja učinkovitosti programa *bodybuildera* koji koriste umjereno opterećenje i veliki volumen s kratkim intervalima odmora za povećanje hipertrofije mišića. Međutim, s obzirom na to da su vježbe velikog opterećenja učinkovite za porast hipertrofije, čini se da se maksimalna hipertrofija može postići kombinacijom treninga jakosti i hipertrofije (npr. varijacije u duljini trajanja intervala odmora ovisno o vanjskom opterećenju).

Prilikom odabira intervala odmora između serija također je potrebno uzeti u obzir i broj vježbi koje se izvode po mišićnoj skupini tijekom treninga. Više studija koristilo je isti protokol koji se je sastojao od četiri serije i četiri vježbe (čućanj, potisak s ravne klupe, veslanje u pretklonu i rameni potisak) koristeći 70% 1RM za 10 ponavljanja po seriji s intervalima odmora od dvije minute između svih serija. S obzirom na to da je sa 70% od 1RM moguće izvesti više od 10 ponavljanja, primijetili su kako dvije minute odmora nisu dovoljne da se neke od navedenih vježbi izvedu kroz svih 10 ponavljanja. Konkretno, u svim istraživanjima uočena su značajna smanjenja opterećenja za vježbu rameni potisak. To se pojavljuje zbog činjenice da su ispitanici prethodno umorili mišiće ramena i tricepsa vježbom potisak s ravne klupe. Stoga su opterećenja znatno smanjena, a interval odmora od dvije minute nije bio dovoljan jer su sa svakom sljedećom serijom bila potrebna daljnja smanjenja opterećenja. Stoga će intervali odmora varirati za svaku vježbu u treningu, a treba uzeti u obzir umor povezan s prethodnim vježbama prilikom izvođenja vježbi koje slijede tijekom treninga.

Longitudinalne studije koje su proučavale utjecaj trajanja intervala odmora na razvoj jakosti pokazale su veći porast jakosti koristeći duge intervale odmora između serija, odnosno 2-3 minute naspram kratkih intervala, odnosno 30-40 sekundi (Pincivero i sur., 1997; Robinson i sur., 1995). U treningu razvoja apsolutne jakosti osnovnim vježbama, preporučaju se intervali odmora od najmanje 3-5 minuta (*American College of Sports Medicine*, 2009). Robinson i sur. (1995) su izvijestili o povećanju izvedbe čučnjeva za 7% nakon pet tjedana treninga kada su korišteni intervali odmora od tri minute u usporedbi sa samo 2% povećanjem kada su korišteni intervali odmora od 30 sekundi. Pincivero i sur. (1997) su izvijestili o znatno većem porastu jakosti (5-8%) kada su korišteni intervali odmora od 160 sekundi u usporedbi s intervalima od 40 sekundi.

1.2. Problemi vezani uz interval odmora

Kao što je gore spomenuto, trening s otporom široko se primjenjuje kao primarna strategija za povećanje mišićne jakosti i hipertrofije, a na te mišićne adaptacije je moguće utjecati ispravnom manipulacijom akutnim programskim varijablama (*American College of Sports Medicine*, 2009; Longo i sur., 2020).

Međutim, iako je trajanje intervala odmora značajna akutna programska varijabla, često se zanemaruje prilikom oblikovanja programa treninga s otporom, a znanstvenih dokaza o njenom utjecaju na mišićnu jakost i hipertrofiju nedostaje (Grgic, 2017). Do danas, tek je nekoliko studija istražilo utjecaj različitih trajanja intervala odmora između serija na mišićnu prilagodbu (jakost i hipertrofiju), međutim, rezultati su kontradiktorni. Pa se tako preporučuju dugi intervali odmora (2-3 minute) za povećanje jakosti i kratki intervali odmora (kraći od 1 minute) za povećanje hipertrofije mišića (*American College of Sports Medicine*, 2009; Grgic i sur., 2017; Henselmans i Schoenfeld, 2014; Wernbom i sur., 2007). Te se preporuke temelje na pretpostavci da bi dugi intervali odmora trebali omogućiti optimalan oporavak za zadržavanje visokog intenziteta i volumena opterećenja, dok bi kratki intervali trebali osigurati veće sistemsko povišenje koncentracije anaboličkih hormona (uglavnom hormona rasta) povezanih s hipertrofijom mišića (*American College of Sports Medicine*, 2009; Wernbom i sur., 2007).

Međutim, longitudinalna istraživanja na tu temu su kontradiktorna, gdje neke studije daju prednost dugim intervalima odmora za povećanje jakosti (Hill-Haas i sur., 2007; Schoenfeld, Pope, i sur., 2016) i hipertrofije (Fink i sur., 2017; Macinnis i sur., 2017; Schoenfeld, Pope, i sur., 2016), dok druge ne pokazuju nikakvu razliku u jakosti (Ahtiainen i sur., 2005; Buresh i sur., 2009; Fink i sur., 2017; Macinnis i sur., 2017) i hipertrofiji (Ahtiainen i sur., 2005; Hill-Haas i sur., 2007; Ogasawara i sur., 2013) između dugih i kratkih intervala odmora.

U pogledu utjecaja na mišićnu jakost, neke studije ukazuju na značajniji porast jakosti primjenom programa vježbanja koji koriste kratke intervale odmora (1 minuta) (Villanueva i sur., 2015), neke studije programe koji koriste duge intervale odmora (3 minute) (Schoenfeld, Wilson, i sur., 2016), dok ostale studije ukazuju kako nema razlika u utjecaju na porast jakosti između kratkih (1, odnosno 2 minute) i dugih (2,5 i 5 minuta) intervala odmora (Ahtiainen i sur., 2005; Buresh i sur., 2009).

Slično je i s utjecajem programa različitog trajanja intervala odmora na hipertrofiju mišića. Dok neki autori (Hill-Haas i sur., 2007; Villanueva i sur., 2015) navode kako su kratki intervali odmora (20 sekundi, odnosno 1 minuta) omogućili veći porast mišićne mase, neki autori (Buresh i sur., 2009; Schoenfeld, Wilson, i sur., 2016) prednost daju dužim intervalima odmora (2,5 i 3 minute), dok pojedini autori (Ahtiainen i sur., 2005; Fink i sur., 2017; Piirainen i sur., 2011) navode kako korištenje različitih (kratkih, 30-120 s ili dugih, 2-5 minuta) intervala odmora ne utječe značajno na mišićnu prilagodbu.

Takva odstupanja mogu se pripisati heterogenosti u eksperimentalnim nacrtima. Hill-Haas i sur. (2007) su usporedili intervale odmora od 20 i 80 sekundi; Fink i sur. (2017) su usporedili intervale od 30 sekundi u odnosu na intervale od 3 minute; Schoenfeld i sur. (2016) su usporedili intervale od 1 minute u odnosu na 3 minute, a Ahtiainen i sur. (2005) su usporedili intervale od 2 minute naspram 5 minuta. Štoviše, različite metodološke razlike mogle su dodatno utjecati na konfliktnost rezultata spomenutih studija. Tako su Fink i sur. (2017) uz razlike u trajanju intervala odmora manipulirali i intenzitetom opterećenja pri čemu je grupa s kratkim intervalom odmora trenirala s lakšim opterećenjima, dok je skupina s dužim intervalom odmora trenirala s težim opterećenjima. Također, Ahtiainen i sur. (2005) su koristili eksperimentalni nacrt s ukriženim ustrojem kojim su ispitanici trenirani s kratkim intervalom odmora tijekom 3 mjeseca te dugim intervalom odmora iduća 3 mjeseca, ali bez perioda za ispiranje između njih. Ostali čimbenici kao što su dob ispitanika i trajanje istraživanja također su se razlikovali između istraživanja (Ahtiainen i sur., 2005; Hill-Haas i sur., 2007; Schoenfeld, Pope, i sur., 2016).

Važno je napomenuti da su se studije koje su primijetile bolje rezultate hipertrofije mišića korištenjem dugih intervala odmora provodile s ponavljanjima do trenutnog mišićnog otkaza, što je najvjerojatnije rezultiralo i većim ukupnim volumenom opterećenja (Buresh i sur., 2009; Fink i sur., 2017; Schoenfeld, Pope, i sur., 2016). Doista, pokazalo se da je povećanje hipertrofije mišića koje proizlazi iz treninga s otporom usko povezano s volumenom opterećenja (*American College of Sports Medicine*, 2009; Krieger, 2010; Schoenfeld, Ogborn, i sur., 2017). Stoga bi programi treninga s otporom koji koriste slične veličine opterećenja izvedene s većim volumenom opterećenja i dugim intervalima odmora potencijalno mogli potaknuti veći porast mišićne hipertrofije. S druge strane, nisu sve studije koje su koristile duge intervale odmora (što je dovelo i do većeg ukupnog volumena opterećenja) pokazale dodatne učinke na jakost mišića u usporedbi

s kratkim intervalima odmora (Buresh i sur., 2009; Fink i sur., 2017). To bi moglo biti povezano sa specifičnošću treninga, pri čemu je poznato da treninzi s otporom većeg intenziteta potiču veći porast mišićne jakosti, neovisno o ukupnom volumenu ili trajanju intervala odmora između serija (Lasevicius i sur., 2018; MacInnis i sur., 2017; Mitchell i sur., 2012; Schoenfeld i sur., 2015; Willardson, 2006). S druge strane, studije koje su dobile slične ili čak bolje rezultate korištenjem kratkih intervala odmora koristile su treninge jednakih volumena (Ahtiainen i sur., 2005; West i sur., 2010). Kada se trening izvodi do mišićnog otkaza, duži intervali odmora omogućuju trening s povećanim vremenom pod mišićnom napetošću i većeg volumena, odnosno trening s većim mehaničkim stresom. S druge strane, kraći intervali odmora trebali bi osigurati povećani metabolički stres, koji bi trebao povećati hipertrofiju mišića putem poboljšanog uključivanja mišićnih vlakana, intrinzičnih odgovora i oticanja mišića (Schoenfeld i sur., 2015).

Nadalje, razlike u istraživanjima mogu biti uvjetovane i razlikama između uzoraka ispitanika, od mlade i tjelesno aktivne populacije (Buresh i sur., 2009; Fink i sur., 2017; Piirainen i sur., 2011), preko trenirane populacije (Schoenfeld i sur., 2016) do starije populacije (Villanueva i sur., 2015).

Također, provedeni programi su se međusobno razlikovali u izboru sadržaja. Dok su neka istraživanja koristila samo osnovne višezglobne vježbe (Robinson i sur., 1995), druga su koristila samo jednozglobne izolirajuće vježbe (Senna i sur., 2017).

Treba napomenuti kako definiranje trajanja intervala odmora proizvoljno na „kratke“ i „duge“ nije dovoljno precizno jer pojedini autori jednako trajanje intervala odmora različito definiraju kao kratko, odnosno dugo. Tako Ahtiainen i sur. (2005) trajanje intervala odmora od 2 minute smatraju kratkim, dok Piirainen i sur. (2011) isti period od 2 minute definiraju kao dugi interval odmora. Stoga Schoenfeld i sur. (2015) predlažu da se trajanje intervala odmora definira u apsolutnim vrijednostima, odnosno, da se precizno navede trajanje svakog intervala.

Također, različite su metode korištene i za procjenu mišićne jakosti i hipertrofije. Dok de Salles i sur. (2016) direktno mjere 1RM, Buresh i sur. (2009) mišićnu jakost i potreban broj ponavljanja procjenjuju odgovarajućom formulom, a Piirainen i sur. (2011) maksimalnu jakost (1RM ispužanja potkoljenica) mjere dinamometrom. Nadalje, dok neki autori mišićnu hipertrofiju procjenjuju na temelju opsega (Hill-Hass, 2007) i kožnih nabora (Buresh i sur., 2009), te mjerenjem bioelektrične impedancije (Piirainen, 2011), drugi koriste pouzdanije metode. Tako Schoenfeld i

sur. (2016) porast mišićne mase utvrđuju ultrazvukom, Fink i sur. (2017) magnetskom rezonancom, a Villanueva i sur. (2015) koristeći DXA-u.

Sveukupno, s obzirom na značajan utjecaj trenažnog volumena, ali i drugih akutnih programskih varijabli treninga s otporom na mišićne prilagodbe u vidu hipertrofije mišića i mišićne jakosti, važno je da prilikom usporedbe dva programa treninga sve akutne programske varijable između grupa budu što je moguće više izjednačene kako bi se adekvatno procijenila uloga intervala odmora na prilagodbe mišića. Potrebno je napomenuti da do danas nije istraženo kako programi vježbanja različitih trajanja intervala odmora utječu na mišićnu prilagodbu u vidu arhitekture mišića.

1.3. Problem rada

Iako su akutne programske varijable ekstenzivno proučavane u zadnjih nekoliko desetljeća, još uvijek nije sasvim jasan utjecaj i važnost intervala odmora na mišićne performanse. Proučavanje utjecaja trajanja intervala odmora na mišićnu jakost, hipertrofiju i arhitekturu mišića pokazalo je brojne kontradikcije. Uzroci oprečnih rezultata najčešće su metodološke prirode, pa je osnovno pitanje koje se nameće: kakav utjecaj ima trajanje intervala odmora između serija u treningu s otporom na performanse mišića ukoliko se ti metodološki problemi uklone?

S aplikativnog stajališta, ukoliko bi se što je moguće više izjednačile sve akutne programske varijable, moguće je utvrditi utjecaj različitih trajanja intervala odmora na mišićne performanse. Stoga se postavlja pitanje: imaju li trenažni programi koji su izjednačeni po svim akutnim programskim varijablama osim po trajanju intervala odmora različit utjecaj na mišićnu jakost, debljinu mišića i njegovu arhitekturu?

U ovom će se istraživanju rješavati upravo ti problemi. Prije svega potrebno je utvrditi hoće li program treninga s otporom s dužim trajanjem intervala odmora izazvati veći porast 1) debljine mišića; 2) mišićne jakosti; i 3) duljine i kuta pružanja snopova mišićnih vlakana, od programa treninga s kraćim intervalom odmora?

2. CILJEVI I HIPOTEZE

Opći cilj:

Opći cilj ove disertacije je usporediti učinke jednakih programa treninga s otporom s različitim trajanjem intervala odmora (izjednačenih po svim akutnim programskim varijablama osim intervala odmora) na debljinu mišića, jakost i arhitekturu mišića.

Vezano uz ovaj opći cilj postavljena je **opća istraživačka hipoteza**:

Jednaki programi treninga s otporom s različitim trajanjem intervala odmora imati će različiti utjecaj na debljinu mišića, jakost i arhitekturu mišića.

Sukladno općem cilju i općoj hipotezi postavljeni su specifični ciljevi i pripadajuće hipoteze:

Specifični ciljevi:

Vrednovati specifične učinke jednakih programa treninga s otporom s različitim trajanjem intervala odmora na: **Cilj 1**: debljinu mišića; **Cilj 2**: maksimalni mehanički izlaz jakosti (vršni moment sile) donjih i gornjih ekstremiteta pri sporim (60 °/s) i brzim (120 °/s) mišićnim akcijama; **Cilj 3**: arhitekturu mišića (duljinu i kut pružanja snopova mišićnih vlakana).

Istraživačke hipoteze vezane uz specifične ciljeve glase:

Specifične hipoteze:

Program treninga s otporom s dužim trajanjem intervala odmora izazvati će statistički značajno veći porast:

H-1: debljine mišića; **H-2**: jakosti sporih i brzih mišićnih akcija pregibanja i ispružanja lakta i koljena; **H-3**: duljine i kuta pružanja snopova mišićnih vlakana, od programa treninga s kraćim intervalom odmora.

3. METODE ISTRAŽIVANJA

3.1. Eksperimentalni nacrt

U ovom randomiziranom, longitudinalnom istraživanju korišten je složeni (faktorijalni) eksperimentalni nacrt s dvije nezavisne varijable, odnosno faktora. Prvi faktor predstavljalo je vrijeme, tj. utjecaj osmotjednog programa vježbanja na zavisne varijable (inicijalno i finalno stanje), a drugi faktor grupe, tj. utjecaj trajanja intervala odmora (G1 i G3).

Inicijalno i finalno mjerenje svih ispitanika provedeno je u Laboratoriju za motoričku kontrolu i izvedbu, i teretani Kineziološkog fakulteta Sveučilišta u Zagrebu. U osam je ispitanika (po četiri iz svake grupe) dodatno mjerena debljina mišića 24/48 sati nakon prvog mjerenja, u isto doba dana kako bi se procijenila pouzdanost, odnosno ponovljivost mjerenja debljine mišića dijagnostičkim ultrazvukom. Sva mjerenja, inicijalna i finalna, provedena su za svakog ispitanika u isto doba dana kako bi se izbjegla mogućnost utjecaja varijacija u cirkadijskom ritmu na jakost (Grgic i sur., 2019).

Ispitanici su bili upućeni da izbjegavaju bilo kakve iscrpljujuće vježbe unutar 48 sati prije svih mjerenja. Svaki je ispitanik prošao obuku i bio upoznat s protokolom mjerenja prije inicijalnog testiranja.

Inicijalna testiranja svih ispitanika provedena su u prvome tjednu. Ona su služila za utvrđivanje osnovnih antropometrijskih karakteristika, mjerenje inicijalnog stanja debljine i arhitekture mišića dijagnostičkim ultrazvukom, maksimalne koncentrične jakosti dominantne ruke i noge na izokinetičkom dinamometru, te jednog maksimalnog ponavljanja (1RM) svih vježbi koje su se provodile u trenažnom programu.

Idućih osam tjedana ispitanici su prolazili trenažni program, tri puta tjedno, u teretani Kineziološkog fakulteta Sveučilišta u Zagrebu.

Finalna testiranja koja su obuhvatila mjerenja debljine mišića i arhitekturu, te izokinetičku dijagnostiku u Laboratoriju za motoričku kontrolu i izvedbu provedena su kroz deseti tjedan, preciznije, 3-5 dana od posljednjeg treninga kako bi se spriječilo da bilo kakvo oticanje pridonese mjerama debljine mišića i njegove arhitekture (Chilibeck i sur., 2004), što je u skladu s istraživanjem koje pokazuje da se akutno povećanje debljine mišića vraća na početnu vrijednost

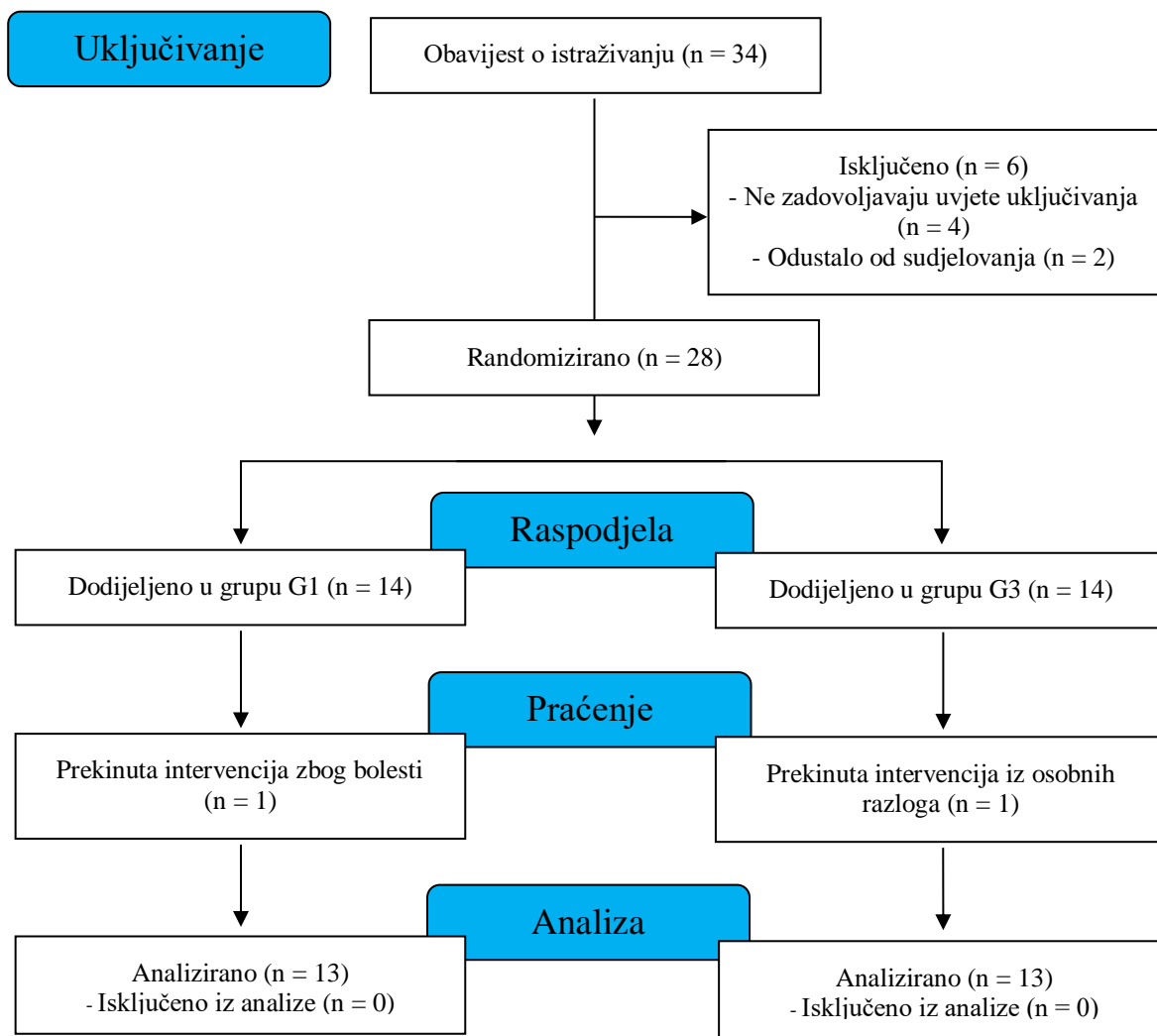
unutar 48 sati nakon treninga s otporom (Ogasawara i sur., 2012). Tijekom tog zadnjeg tjedna ispitanici su upućeni da ne sudjeluju u drugim vježbama ili intenzivnim aktivnostima koje bi mogle utjecati na konačne rezultate istraživanja.

3.2. Ispitanici

A priori analizom statističke snage provedenom u *G*Power* programu (Njemačka, Düsseldorf, verzija 3.1.9.7) na temelju dvofaktorske analize varijance za ponovljena mjerenja, minimalne, praktično značajne standardizirane veličine učinka od 0,20 za varijablu debljina mišića *m. vastus lateralis*, uz alfa razinu od 0,05, statističku snagu od 0,80, te korelaciju između ponovljenih mjerenja od 0,7 dobivena je potrebna veličina uzorka od ukupno 22 ispitanika.

Konačni prigodni uzorak ispitanika predstavljale su mlade, zdrave i tjelesno aktivne muške osobe, studenti Kineziološkog fakulteta Sveučilišta u Zagrebu ($n = 26$). Prilikom uključivanja ispitanika u istraživanje postavljeni su kriteriji koji su obuhvaćali minimalno znanje i iskustvo u treningu s otporom, da su zdravi i bez postojećih neuroloških i mišićno-koštanih poremećaja, povijesti ozljeda (sa „skrivenim“ ili zaostalim simptomima boli) trupa, gornjih i/ili donjih ekstremiteta, te su izjavili da nisu za vrijeme istraživanja niti unatrag šest mjeseci uzimali anaboličke steroide ili bilo koje druge nezakonite tvari za koje se zna da povećavaju mišićnu masu. Njihova dob, tjelesna masa, visina i trenajno iskustvo iznosile su 20 ± 1 godina (raspon 18-22 godina), $81,5 \pm 8,8$ kg, $184,4 \pm 6,1$ cm i $4 \pm 1,7$ godina (aritmetička sredina \pm SD). Svi su biti upoznati s ciljevima i rizicima istraživanja te su potpisali pristanak za sudjelovanje u eksperimentu. Istraživanje je u potpunosti bilo u skladu s Helsinškom deklaracijom, a eksperimentalni protokol je potvrdila Znanstvena i Etička komisija Kineziološkog fakulteta Sveučilišta u Zagrebu. Ispitanici nisu smjeli uzimati lijekove ili konzumirati ikakve dodatke prehrani, niti sudjelovati u bilo kojem drugom sustavnom treningu tijekom provedbe eksperimenta osim u njihovim uobičajenim nastavnim aktivnostima.

Slučajnim odabirom ispitanici su podijeljeni u: (1) eksperimentalnu skupinu treninga s otporom s pauzom između serija u trajanju od jedne minute (grupa G1; $n = 14$), i (2) eksperimentalnu skupinu treninga s otporom s pauzom između serija u trajanju od tri minute (grupa G3; $n = 14$). Dvojica ispitanika odustala su od eksperimenta: jedan iz grupe G1 zbog bolesti, te jedan iz grupe G3 zbog osobnih razloga. Stoga je ukupni broj analiziranih ispitanika koji su završili istraživanje 26, sa po 13 ispitanika po grupi. CONSORT dijagram tjeka provedbe istraživanja prikazan je na Slici 1.



Slika 1. CONSORT dijagram tijeka ispitanika kroz sve faze provedbe istraživanja

3.3. Mjerni instrumenti

3.3.1. Debljina i arhitektura mišića

Mjerenje debljine i arhitekture mišića (kuta penacije i duljine snopa mišićnih vlakana) provedeno je dijagnostičkim ultrazvučnim aparatom (Siemens, Sonoline G40) (Slika 2). Postavke aparata optimizirane su za kvalitetu slike u skladu s korisničkim priručnikom proizvođača i ostale su nepromijenjene tijekom svih testiranja. U provedbi mjerenja korištena je linearna sonda VF10-5 (10-5 MHz; otvora 39×5 mm) koja se postavljala okomito na kožu te okomito (za *m. biceps brachii* zajedno s *m. brachialis*, *m. triceps brachii*, *m. rectus femoris* i *m. biceps femoris*), odnosno uzdužno (za *m. vastus lateralis*) na smjer pružanja mišićnih vlakana (Slike 3-7). Whittaker i sur. (2007) predlažu veće frekvencije, veće od 7,5 MHz za površinske mišiće i niže frekvencije, niže od 5 MHz za dublje mišiće; u ovome se istraživanju frekvencija od 8 MHz pokazala kao optimalna za mjerenje debljine svih mišića. Mjerenja su provedena na preferiranim ekstremitetima (određeno na temelju ruke kojom ispitanik piše i noge kojom udara loptu).

Kako bi se povećala pouzdanost mjerenja debljine mišića, za svaki su se mišić snimile po dvije slike, a prosječna vrijednost mjera uzela se u daljnju analizu. Pri snimanju optimalne ultrazvučne slike posebna pozornost posvećena je nanošenju kontaktnog gela kako bi se minimizirao pritisak sonde na kožu i na taj način mehanički utjecalo na tkivo i u konačnici na vjerodostojnost rezultata.



Slika 2. Dijagnostički ultrazvučni aparat *Siemens, Sonoline G40*.



Slika 3. Određivanje lokacije i mjerenje debljine mišića *biceps brachii* i *brachialis*



Slika 4. Određivanje lokacije i mjerenje debljine mišića *triceps brachii*



Slika 5. Određivanje lokacije i mjerenje debljine mišića *rectus femoris*



Slika 6. Određivanje lokacije i mjerenje debljine mišića *biceps femoris* – duga glava



Slika 7. Određivanje lokacije i mjerenje debljine i arhitekture mišića *vastus lateralis*

Prilikom mjerenja *m. rectus femoris* i *m. vastus lateralis* ispitanici su potpuno opuštenih mišića ležali na leđima pogrčenih nogu u koljenom zglobu pod kutom od 10° (kut je određen goniometrom, a kako bi se zadržao jednaki kut cijelo vrijeme mjerenja pod koljeno je podložen čvrsti jastuk). Za mjerenje debljine *m. biceps femoris* ispitanici su ležali potrbuške ispruženih nogu. Za mjerenje debljine mišića nadlaktice ispitanici su sjedili opuštenih i ispruženih ruku uz tijelo.

Prije provedbe mjerenja ultrazvukom, mjerne točke svih mišića pažljivo su izmjerene i označene flomasterom, a za ponovljenu sesiju mjerenja pouzdanosti korištene su iste mjerne točke. Konkretno, debljina mišića *m. biceps brahii* zajedno s *m. brachialis* te *m. triceps brahii* – lateralna glava izmjerena je na 60% udaljenosti distalno između lateralnog epikondila humerusa i akromiona (Ogasawara i sur., 2012). Mjerenje mišića *vastus lateralis* i *rectus femoris* provedeno je prema uputama Noorkoiv i sur. (2010) na sredini mišića, odnosno na 50% udaljenosti linije koja spaja središnju točku patele i spinu ilijaku anterior superior. Mjerna točka za *m. biceps femoris* – duga glava, bila je na 50% udaljenosti na liniji između velikog obrtača i središnje točke patele (Franchi i sur., 2019).

Debljine mišića izmjerene su kao najkraća vertikalna udaljenost od donjeg ruba površinske aponeuroze do gornjeg ruba duboke aponeuroze, odnosno gornjeg ruba kosti (Slika 8). Također je,

uz debljinu m. vastus lateralis, određena i njegova arhitektura u vidu duljine i kuta pružanja snopova mišićnih vlakana, i to na sredini mišića gdje se pretpostavlja da nema zakrivljenosti snopova vlakana ili aponeuroze (Blazevich, 2006).

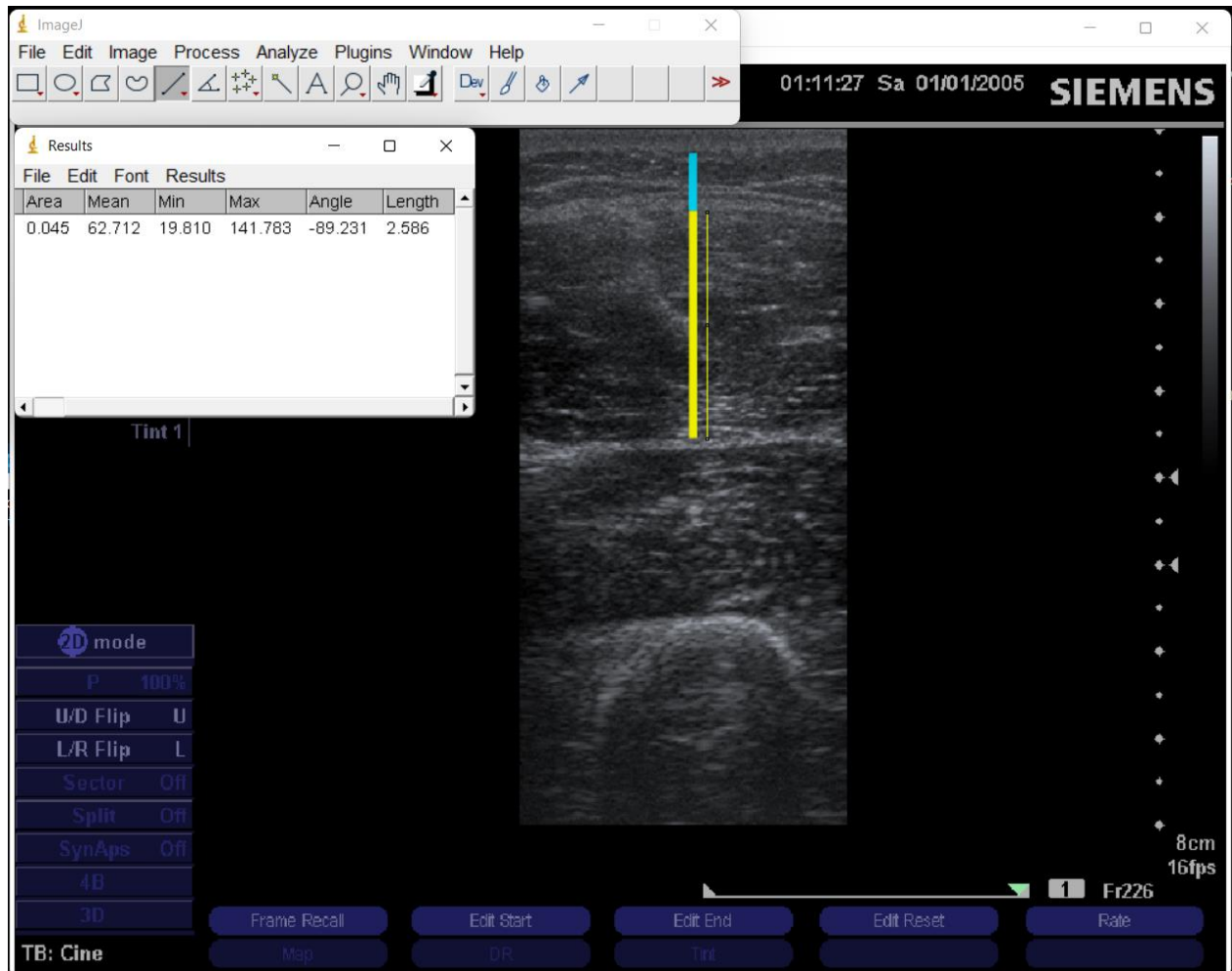
Dobivene slike pohranjene su za daljnju analizu u programu *ImageJ* (verzija 1.53c; National Institutes of Health, USA).

Ponovljivost mjerenja debljine mišića određena je u dva odvojena dana na osam ispitanika, na četiri ispitanika iz grupe G1 i četiri iz grupe G3. Pokazatelji intraklasnog koeficijenta korelacije (ICC) i 95% intervala pouzdanosti, koeficijent varijacije (CV), te standardna pogreška mjerenja (SEM) debljina svih mjerenih mišića prikazani su u tablici 1.

Tablica 1. Pokazatelji intraklasnog koeficijenta korelacije (ICC) i 95% intervala pouzdanosti, koeficijenta varijacije (CV), te standardne pogreške mjerenja (SEM) debljina svih mjerenih mišića

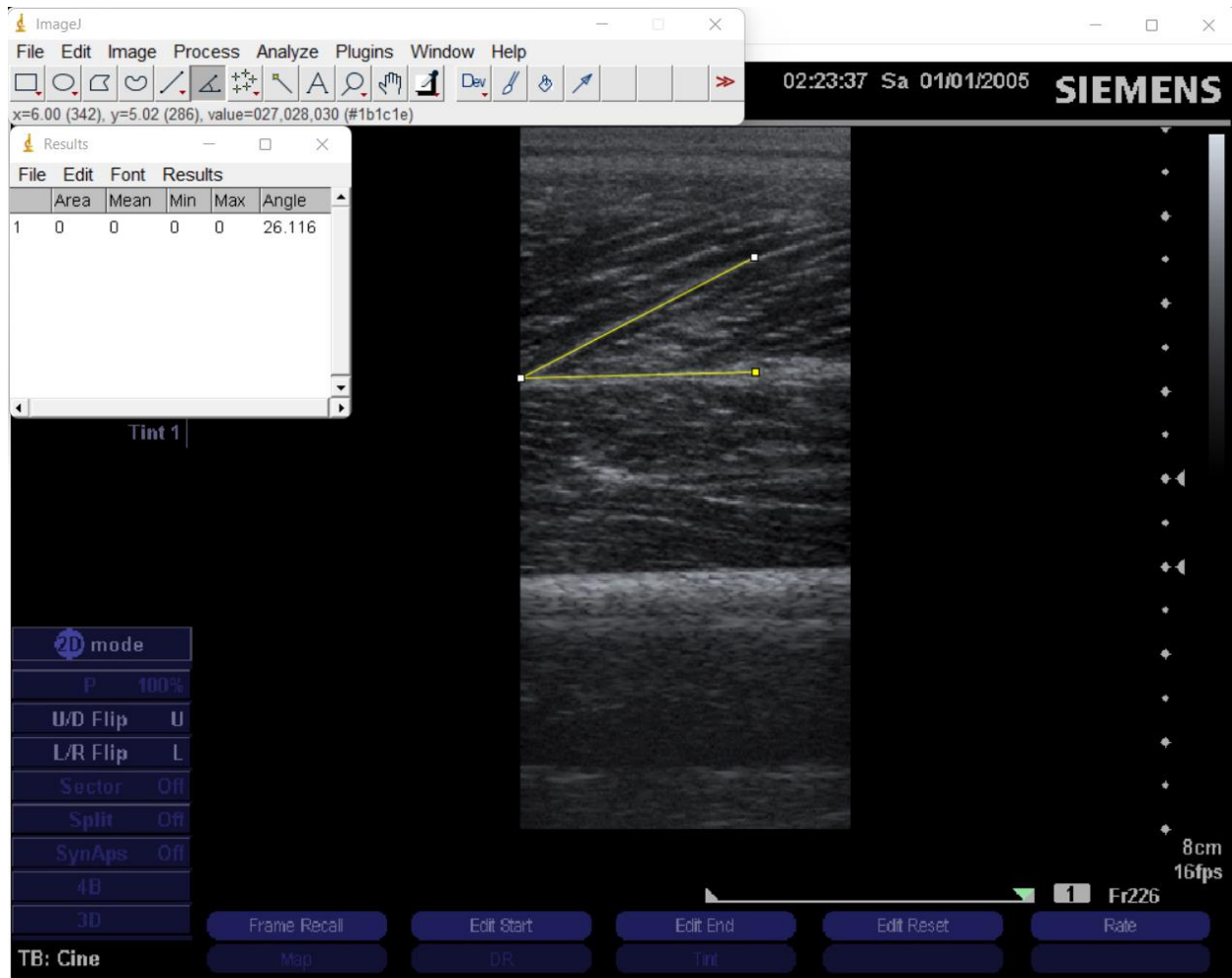
MIŠIĆ	ICC	95% interval pouzdanosti		CV (%)	SEM (mm)
		Donja granica	Gornja granica		
<i>Biceps brachii</i>	0,996	0,983	0,999	14,36	0,91
<i>Triceps brachii</i>	0,999	0,994	1,000	18,14	0,57
<i>Rectus femoris</i>	0,993	0,967	0,998	7,31	0,61
<i>Vastus lateralis</i>	0,997	0,987	0,999	13,68	0,75
<i>Biceps femoris</i>	0,996	0,964	0,999	13,07	0,83

Legenda: ICC = intraklasni koeficijent korelacije; CV = koeficijent varijacije; SEM = standardna pogreška mjerenja.

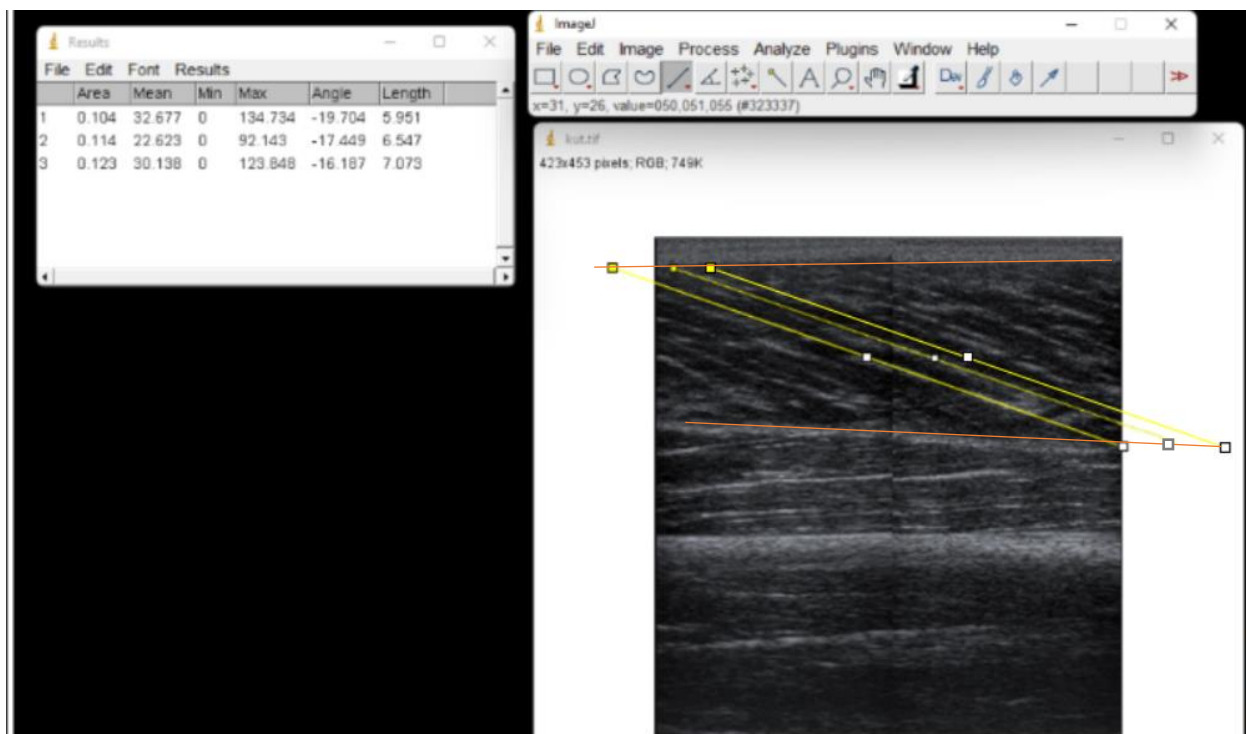


Slika 8. Primjer mjerenja debljine mišića rectus femoris programom *ImageJ*

Kut penacije, odnosno kut pružanja snopova mišićnih vlakana određen je kao kut između duboke aponeuroze i jasno vidljivog snopa mišićnih vlakana (Slika 9).



Slika 9. Primjer mjerenja kuta pružanja snopova mišićnih vlakana mišića *vastus lateralis* programom *ImageJ*



Slika 10. Primjer mjerenja duljine snopa mišićnih vlakana na kolažu dvaju susjednih slika mišića *vastus lateralis* programom *ImageJ*

Kako bi se mogla izmjeriti duljina snopa mišićnih vlakana stvoren je „kolaž“ slika spajanjem dvije susjedne slike (način rada ultrazvuka: „*Side-by-Side*“) koja je omogućila veće vidno polje, odnosno dulji prikaz snopova mišićnih vlakana na jednoj slici (Reeves i sur., 2004) (Slika 10 i Slika 7).

Duljina snopa mišićnih vlakana *m. vastus lateralis* odredila se kao udaljenost pružanja snopa između duboke i površinske aponeuroze. Ukoliko kolaž slika nije uspjela obuhvati vlakna u cijelosti od polazišta do hvatišta, duljina je bila procijenjena linearnom ekstrapolacijom; mjerenjem linearne udaljenosti od vidljivog kraja snopa vlakana do sjecišta linije povučene u produžetku snopa vlakana i linije povučene u produžetku površinske aponeuroze (Blazevich i sur., 2006) (Slika 10). Ova metoda mjerenjem na sredini mišića *vastus lateralis* kao i na mišićima s kraćim snopovima mišićnih vlakana daje pouzdane rezultate s koeficijentom varijacije od 1,7% (1,4 mm) (Blazevich, Cannavan, i sur., 2007; Sarto i sur., 2021). No primjena kod mišića s dužim i složenijim snopovima mišićnih vlakana je ograničena jer zanemaruje zakrivljenost fascikula i aponeuroza pa može biti nepouzdana (Sarto i sur., 2021).

Duljina i kut pružanja snopova mišićnih vlakana izmjereni su na pet mjesta na istoj slici te je kao konačna mjera uzeta aritmetička sredina tih vrijednosti (Marušić i sur., 2020).

3.3.2. Mišićna jakost

Nakon ultrazvučne dijagnostike, izmjerena je **maksimalna koncentrična jakost** mišića ispružaća i pregibača koljena i lakta na izokinetičkom dinamometru (System 4, Biodex Corporation, Shirley, New York, USA; Slika 11) pri dvije kutne brzine (60 i 120°/s). Ovaj sustav omogućava precizno mjerenje proizvedenog vršnog momenta sile (Nm) nasuprot konstantnom opterećenju tijekom cijelog opsega pokreta. Gledale su se vrijednosti vršnog i prosječnog momenta sile, te vrijednosti vršnog i prosječnog momenta sile normaliziranog s tjelesnom masom pri kutnim brzinama od 60 i 120°/s mišića ispružaća i pregibača koljena i lakta.



Slika 11. Izokinetički dinamometar *Biodex System 4*

3.3.2.1. Mjerenje maksimalne koncentrične jakosti mišića ispružaća i pregibača koljena izokinetičkim dinamometrom

Mjerenju maksimalne koncentrične jakosti mišića ispružaća i pregibača koljena (slika 12) je prethodilo standardizirano zagrijavanje koje se sastojalo od laganog trčanja u trajanju od tri minute, dinamičkog istezanja mišića prednje i stražnje strane natkoljenice, te od po deset ponavljanja čučnja u iskoraku svakom nogom i po deset iskoraka svakom nogom unatrag.

Nakon zagrijavanja, ispitanici su sjeli u sjedalo dinamometra te su za njega učvršćeni vezanjem pojasevima. Udaljenost naslona sjedala bila je namještena tako da je omogućila postavljanje osi rotacije lateralnog femoralnog kondila kao anatomske referentne točke u liniju s osi rotacije glave dinamometra. Jastuk kraka dinamometra individualno je postavljen za svakog ispitanika proksimalno od lateralnog maleola. Opseg pokreta kretao se od 90° do 10° pregiba u koljenu, gdje 0° odgovara punoj ekstenziji koljena. Prilagodbe koje se odnose na djelovanje gravitacije potkoljenice i stopala izvršene su vaganjem u kutu koljena od 30° .

Ispitanici su nakon dva probna submaksimalna pokušaja ispružanja i pregibanja potkoljenice izveli tri maksimalna radna ponavljanja. Tijekom svih mjerenja pružano je glasno verbalno poticanje.



Slika 12. Mjerenje maksimalne koncentrične jakosti mišića ispružaća i pregibača koljena izokinetičkim dinamometrom

3.3.2.2. Mjerenje maksimalne koncentrične jakosti mišića ispružaća i pregibača lakta izokinetičkim dinamometrom

Slijedilo je, nakon pauze od oko 20 minuta, mjerenje maksimalne koncentrične jakosti mišića ispružaća i pregibača lakta (Slika 13). Ispitanici su ponovno prolazili standardizirano zagrijavanje koje se ovaj puta sastojalo od trčanja u trajanju od tri minute, dinamičkog istezanja mišića ruku, te unilateralnih pregibanja i ispružanja lakta (po 10 ponavljanja svakom rukom) koristeći elastičnu gumenu traku kao vanjski otpor.



Slika 13. Mjerenje maksimalne koncentrične jakosti mišića ispružaća i pregibača lakta izokinetičkim dinamometrom

Dinamometar je postavljen prema uputama proizvođača. Konkretno, ispitanici su sjeli u sjedalo dinamometra gdje su im ramena, zdjelica i nadlaktica dominantne ruke bili vezani pojasevima, nadlaktica oslonjena na klupicu pod kutom od 30° lateralno u odnosu na sagitalnu ravninu trupa, a visina glave dinamometra je bila postavljena u liniju s poprečnom osi lakatnog zgloba. Ispitanici su čekić hvatom ručke kraka dinamometra izvodili ispružanja i pregibanja lakta u rasponu od $10-130^\circ$ lakatnog zgloba (gdje 0° predstavlja potpuno opružen lakat) pri kutnim brzinama od 60 i $120^\circ/s$. Nakon dva probna submaksimalna pokušaja ispitanici su izveli tri maksimalna ispružanja i pregibanja lakta dominantnom rukom. Tijekom svih mjerenja pružano je glasno verbalno poticanje.

3.3.2.3. Mjerenje jednog maksimalnog ponavljanja

Prije intervencijskog perioda treninga, svi su ispitanici podvrgnuti testiranju jednog maksimalnog ponavljanja (1RM) u svakoj vježbi prema smjernicama koje je uspostavila *National Strength and Conditioning Association* (Haff i sur., 2008) kako bi se odredila individualna početna opterećenja treninga od 70% 1RM za svaku vježbu.

Prije testiranja, ispitanici su proveli opće zagrijavanje koje se sastojalo od trominutnog trčanja sa zadacima i kratkog dinamičkog istežanja. Zatim je izvedena posebna serija zagrijavanja zadane vježbe od po 5 ponavljanja pri 50% procijenjenog 1RM, nakon kojeg su slijedile 1-2 serije od 2-3 ponavljanja s opterećenjem koje odgovara približno 60-80% procijenjenog 1RM. Vanjsko opterećenje je povećavano u narednim serijama od jednog ponavljanja sve dok ispitanici nisu bili u stanju izvesti koncentričnu mišićnu akciju kroz puni opseg pokreta. Dobiveni 1RM se smatrao najvećim podignutim vanjskim opterećenjem koje je savladano pravilnom tehnikom. Između svakog uzastopnog pokušaja omogućen je odmor od 3 minute. Sve vrijednosti 1RM svake pojedine vježbe određene su unutar 5 pokušaja. Prosječne vrijednosti 1RM-a grupe G1 i G3 prikazane su u tablici 2. Nisu utvrđene statistički značajne razlike između grupa u 1RM niti u jednoj vježbi ($p > 0,128$).

Sva testiranja nadzirao je istraživački tim kako bi se postigao konsenzus o uspješnom izvođenju svakog pokušaja.

Tablica 2. Prosječne vrijednosti 1RM-a grupe G1 i G3 (kg)

Grupa	Kosi nožni potisak	Opružanje podlaktica sa čela EZ šipkom na klupi	Pregib podlaktica sa šipkom stojeći	Opružanje potkoljenica na trenažeru sjedeći	Pregib potkoljenica na trenažeru ležeći	Opružanje podlaktica na trenažeru	Pregib podlaktica na Scottovoj klupi
G1	211,5 ± 40,3	28,9 ± 10,7	34,0 ± 5,5	87,7 ± 12,2	75,0 ± 14,4	46,9 ± 11,1	28,1 ± 8,8
G3	226,2 ± 21,8	28,5 ± 6,9	35,8 ± 7,3	96,2 ± 15,0	82,3 ± 10,9	46,6 ± 8,9	27,7 ± 5,5

3.4. Intervencija – program progresivnog treninga s otporom

Jedina akutna programska varijabla koja se razlikovala između grupa bila je trajanje intervala odmora. Stoga su ispitanici bili slučajnim odabirom (korištenjem funkcije generatora slučajnih brojeva u programu Microsoft Excel, tj. „=RAND()“) podijeljeni u dvije jednakobrojne grupe: (1) trening s otporom s kratkim intervalima odmora od 1 minute (G1; n = 14) i (2) trening s otporom s dugim intervalima odmora od 3 minute (G3; n = 14). Intervencija, odnosno program treninga s otporom, dizajniran je u skladu sa svim gore navedenim preporukama, a sve ostale akutne programske varijable bile su što je moguće više izjednačene između grupa. One su navedene i objašnjene u narednim poglavljima.

3.4.1. Sadržaji – izbor i redoslijed izvođenja vježbi

Svaka trenažna jedinica sastojala se od sedam vježbi (osnovnih i izolirajućih, sa slobodnim utegom i/ili na trenažeru) koje su se izvodile uvijek istim redoslijedom, ali su svaki puta, kako bi se isključio utjecaj redoslijeda izvođenja vježbi na zavisne varijable, ispitanici započeli trening drugom vježbom. Odabrane su po dvije vježbe za sve testirane mišićne skupine.

Vježbe koje su se provodile u okviru programa (Vuk, 2022):

1. Kosi nožni potisak (Slika 14)

U ovoj višezglobnoj vježbi ispitanici su, nakon što su postavili odgovarajuće opterećenje, legli na klupu i postavili noge na gazište trenažera u širini ramena sa stopalima otvorenim malo prema van. Ispružili su noge gotovo do kraja i spustili osigurače trenažera. Spuštali su gazište trenažera prema tijelu sve do trenutka kada se zdjelica počela podvlačiti i vraćali ga u početni položaj. Kada su završili s izvedbom podigli su osigurače trenažera i spustili teret.



Slika 14. Izvođenje vježbe kosi nožni potisak

2. Opužanje potkoljenica na trenažeru sjedeći (Slika 15)

Ispitanici su sjeli na trenažer i postavili naslon klupe tako da je omogućio postavljanje koljena u liniju s osi rotacije trenažera, postavili su jastuk trenažera na gležanj i krakom trenažera odredili puni opseg pokreta. Nakon što su postavili zadano opterećenje, ispitanici su uhvatili drške trenažera i ispružali potkoljenice i vraćali ih u početni položaj. Stopala su bila u neutralnom položaju.



Slika 15. Izvođenje vježbe opušanje potkoljenica na trenažeru sjedeći

3. Pregib potkoljenica na trenažeru ležeći (Slika 16)

Nakon postavljanja zadanog opterećenja, ispitanici su namjestili jastuk trenažera na Ahilovu tetivu i legli na klupu. Uхватili su se za drške trenažera i izvodili pregibe u zglobu koljena pazeći da se pritom kukovi ne odižu od klupe. Stopala su bila u neutralnom položaju.



Slika 16. Izvođenje vježbe pregib potkoljenica na trenažeru ležeći

4. Pregib podlaktica sa šipkom stojeći (Slika 17)

Ispitanici su pothvatom uhvatili uteg zadanog opterećenja u širini ramena i skinuli ga sa stalka. Zauzeli su raskoračni stav nešto širi od ramena s blago pogrčenim koljenima i blagim zaklonom trupa. Iz gotovo opruženih ruku u laktu izvodili su pregibe podlaktica i vraćali ih u početni položaj pazeći da pritom nadlaktice ostanu mirne. Kada su završili s izvedbom spustili su uteg na stalak.



Slika 17. Izvođenje vježbe pregib podlaktica sa šipkom stojeći

5. Pregib podlaktica na Scottovoj klupi (Slika 18.)

Nakon što su ispitanici postavili zadano opterećenje, namjestili su klupicu na odgovarajuću visinu. Nakon toga su ustali i uhvatili uteg, pogrčili ruke u laktu, oslonili ih na klupicu i sjeli. U tom su položaju izvodili pregibe u laktu iz gotovo opruženih podlaktica do pune fleksije. Kada su završili s izvedbom, ustali su pogrčenih ruku i spustili uteg na stalak.



Slika 18. Izvođenje vježbe pregib podlaktica na Scottovoj klupi

6. Opružanje podlaktica sa čela EZ šipkom na klupi (Slika 19)

Ispitanici su s utegom zadanog opterećenja legli na klupu zadržavajući neutralni položaj kralješnice i postavili uteg na pružene ruke iznad prsa. Zadržavajući laktove mirnima spuštali su uteg isključivo u zglobu lakta na čelo i ispružali ruke natrag u početni položaj.



Slika 19. Izvođenje vježbe opružanje podlaktica s čela EZ šipkom na klupi

7. Opužanje podlaktica na trenažeru sa sajlama stojeći (Slika 20)

Ispitanici su nakon što su postavili zadano opterećenje uhvatili hvataljku s gornje kolature trenažera i stali u dijagonalni stav ili raskoračni stav širine ramena, otključanih koljena i pretklonom trupa paralelnim sa sajlom. U tom su položaju, zadržavajući laktove u mjestu te ramena i leđa u neutralnom položaju, izvodili opuštanja podlaktica i vraćali ih u početni položaj.

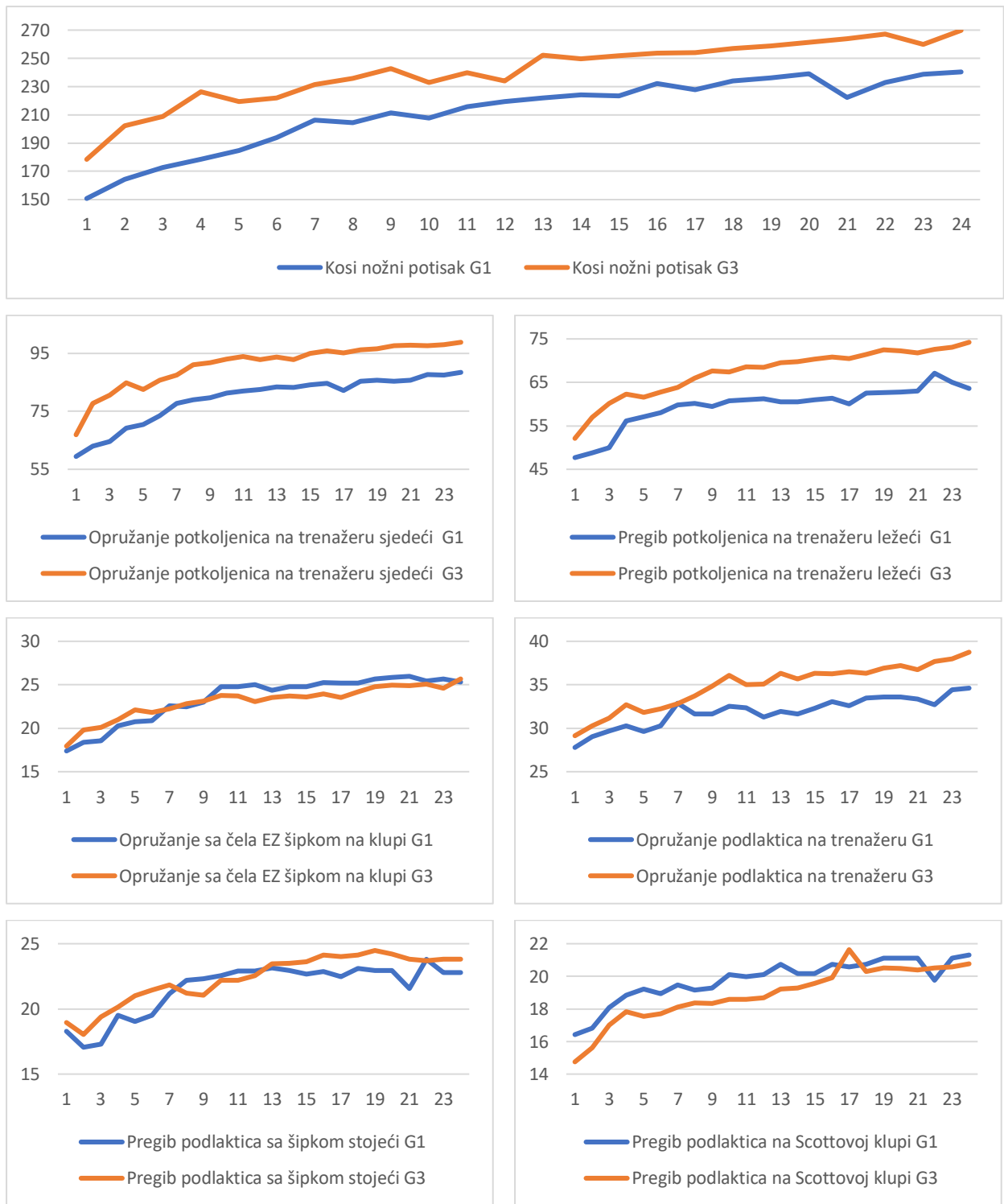


Slika 20. Izvođenje vježbe opuštanje podlaktica na trenažeru sa sajlama stojeći

Trenažni programi uključivali su opće standardizirano zagrijavanje koje se sastojalo od trčanja sa zadacima u trajanju od tri minute nakon kojeg je slijedilo kratko dinamičko istežanje cijeloga tijela (koristeći i drvenu palicu), te specifičnog zagrijavanja izvođenjem jedne serije na svakoj vježbi prije radnih serija s opterećenjem od 30% 1RM po 10 ponavljanja. Sve su vježbe bile izravno nadzirane kako bi se osigurala ispravna izvedba i tehnika.

3.4.2. Veličina trenažnog opterećenja

Intenzitet izvođenja bio je individualiziran i odgovarao je opterećenju od 70% od 1RM u svakoj vježbi. Sve serije izvedene su do točke trenutnog koncentričnog mišićnog otkaza, odnosno do trenutka kada više nije bilo moguće izvesti sljedeće koncentrično ponavljanje uz zadržavanje pravilne tehnike (Zaroni i sur., 2019). Zadano opterećenje je omogućilo u prosjeku 12 ponavljanja po seriji u obje grupe (minimalno 12, a maksimalno 13 ponavljanja). Stoga su, neovisno o promjeni veličine 1RM tijekom intervencije, ispitanici uvijek izvodili vježbe jednakim intenzitetom. Međutim, zbog dužeg trajanja intervala odmora između serija, ispitanici grupe G3 su mogli izvoditi serije sa statistički značajno većim prosječnim opterećenjem od grupe G1 u svim vježbama ($p < 0,004$). Trendovi prosječnih veličina opterećenja svake vježbe obiju grupa svakog treninga prikazani su na slici 21.



Slika 21. Trendovi prosječnih veličina opterećenja (kg) svake pojedine vježbe obiju grupa svakog treninga

3.4.3. Ukupni relativni volumen treninga

Ukupni relativni volumen treninga s obzirom na 1RM izračunat kao *broj serija* × *broj ponavljanja* × *%IRM* (Scott i sur., 2016) progresivno se povećao za po jednu seriju po vježbi nakon drugog i petog tjedna u obje grupe. Računanjem ukupnog volumena svake pojedine vježbe nakon svakog treninga utvrđeno je da je volumen grupe G3 bio veći od volumena G1 radi statistički značajno većeg trenažnog opterećenja (Faraji i sur., 2011). Stoga je bilo potrebno ukupni relativni volumen treninga grupe G1 egzaktno izjednačavati s obzirom na grupu G3. To smo na originalan i jedinstven način postigli tako što se u grupi G1 na zadnjem tjednom treningu svakoj vježbi dodala po jedna radna serija. To je bilo dovoljno da se osigura izjednačavanje ukupnih volumena, odnosno da nisu utvrđene razlike između grupa u ukupnom volumenu treninga ($p = 0,372$).

Pa je tako u prva dva tjedna grupa G3 izvela po tri, od trećeg do petog tjedna četiri, te od šestog do osmog tjedna pet radnih serija po vježbi. Konkretnije, ispitanici su kroz ukupno 8 tjedana trenažnog procesa izveli 24 treninga (100% pridržavanje programa u obje skupine bez prijavljenih ozljeda) u kojima je grupa G3 izvela ukupno 99, a grupa G1 106 serija po svakoj od 7 navedenih vježbi. Prosječni ukupni relativni volumeni obje grupe po pojedinoj vježbi prikazani su u tablici 3.

Tablica 3. Prosječni ukupni relativni volumeni grupa G1 i G3 po pojedinoj vježbi (t = tona)

Grupa	Kosi nožni potisak (t)	Opružanje potkoljenica na trenažeru sjedeći (t)	Pregib potkoljenica na trenažeru ležeći (t)	Opružanje podlaktica sa čela EZ šipkom na klupi (t)	Opružanje podlaktica na trenažeru sa sajlama stojeći (t)	Pregib podlaktica sa šipkom stojeći (t)	Pregib podlaktica na Scottovoj klupi (t)
G1	39,07	16,25	11,57	4,47	3,17	2,96	3,85
G3	39,79	18,04	13,59	4,49	3,52	2,87	3,67

3.4.4. Učestalost treninga

Obje su eksperimentalne grupe bila podvrgnute osmotjednom programiranom trenažnom procesu koji je uključivao treninge s otporom tri puta tjedno (grupa G1: ponedjeljkom, srijedom i petkom, te grupa G3: utorkom, četvrtkom i subotom), što je ukupno osiguralo 24 treninga.

3.4.5. Vrste mišićnih akcija i brzina ponavljanja

Tempo ponavljanja izveden je na kontrolirani način, s koncentričnim i ekscentričnim mišićnim akcijama u trajanju od prosječno ~1,5 sekunde, što je za ukupno trajanje jednog ponavljanja iznosilo približno 3 sekunde.

3.4.6. Intervali odmora između serija

Jedina akutna programska varijabla koja se razlikovala između trenažnih grupa je vrijeme pauze između serija. Strogo se pazilo da grupa G1 ima interval odmora između serija u trajanju od jedne, dok je grupa G3 imala pauze u trajanju od tri minute.

3.5. Statistička analiza podataka

Svi statistički postupci provedeni su *Statističkim paketom za društvene znanosti (IBM Corp. izdano 2016. IBM SPSS Statistics for Macintosh, verzija 24.0. Armonk, NY: IBM Corp.)* i programom za proračunske tablice (*Microsoft Corporation. (2018). Microsoft Excel. Skinuto sa: <https://office.microsoft.com/excel>*). Ultrazvučne snimke obrađene su pomoću javno dostupnog programa za analizu i obradu slika (*ImageJ, verzija 1.53c; National Institutes of Health, USA*).

Za sve su varijable izračunate aritmetičke sredine i standardne devijacije, a normalnost distribucija testirana je Shapiro-Wilk testom.

Kako bi se utvrdilo razlikuju li se grupe u inicijalnim vrijednostima svih izmjerenih varijabli prije početka trenažnog programa korišten je T-test za nezavisne uzorke. Učinci treninga unutar eksperimentalnih grupa procijenjeni su korištenjem serije t-testova za zavisne uzorke sa Bonferroni korekcijom kako bi se pogreška tipa I održala na 0,05 na način da se razina 1 statističke značajnosti podijelila s brojem grupa, odnosno brojem t-testova, čime se pogreška tipa I smanjila na 0,025 za svaki t-test.

Veličina učinaka tretmana unutar grupa procijenjena je Cohenovim indeksom veličine učinka (ES; razlika između finalnog i inicijalnog stanja podijeljena je standardnom devijacijom inicijalnog stanja). Veličina učinka od 0,2 smatra se malim učinkom, 0,5 umjerenim i 0,8 velikim učinkom (Faul i sur., 2007). Učinci su također iskazani i veličinom promjene izražene u postocima (razlika između finalnog i inicijalnog stanja podijeljena je inicijalnim stanjem i sve pomnoženo sa 100).

Razlike između grupa u dobivenim promjenama unutar grupa, ili drugim riječima, razlike učinaka programiranih trenažnih procesa s različitim trajanjima intervala odmora za sve zavisne varijable testirane su serijom dvofaktorske analize varijance za ponovljena mjerenja (eng. *Split-plot ANOVA*, ili *Mixed Design ANOVA*, ili *Two Way Repeated Measures ANOVA*) sa jednim faktorom unutar ispitanika (eng. *Within Subjects*; vrijeme) i drugim faktorom između ispitanika (eng. *Between Subjects*; grupe).

Kako su se grupe međusobno razlikovale u inicijalnim vrijednostima zavisne varijable *kut penacije* ($p = 0,009$), ona je korištena kao kontrolna kovarijabla faktora *vrijeme* u dvofaktorskoj analizi kovarijance (eng. *Two Way ANCOVA*), s drugim faktorom *grupe*.

Parcijalno kvadrirano eta (η^2) korišten je kao mjera veličine učinka i klasificiran je kao mali ($0,02 \leq \eta^2 \leq 0,12$), srednji ($0,13 \leq \eta^2 \leq 0,25$) ili veliki ($\eta^2 \geq 0,26$).

Razina statističke značajnosti postavljena je na $p < 0,05$.

4. REZULTATI

4.1. Mišićna jakost

4.1.1. Vršni moment sile

Vrijednosti maksimalne koncentrične jakosti mišića ispružaća i pregibača koljena i lakta na izokinetičkom dinamometru pri dvije kutne brzine od 60 i 120°/s u vidu proizvedenog vršnog momenta sile (Nm) inicijalnog i finalnog stanja eksperimentalnih grupa G1 i G3, veličina učinka (Cohenov d), veličina promjene (%), statistička značajnost razlika između inicijalnog i finalnog stanja unutar grupa, te statistička značajnost razlika promjena između inicijalnog i finalnog stanja između grupa prikazane su u tablici 4, a vrijednosti inicijalnih i finalnih stanja vršnog momenta sile obaju grupa prilikom ispružanja i pregibanja koljena i lakta pri 60 i 120°/s prikazane su na slikama 22 i 23.

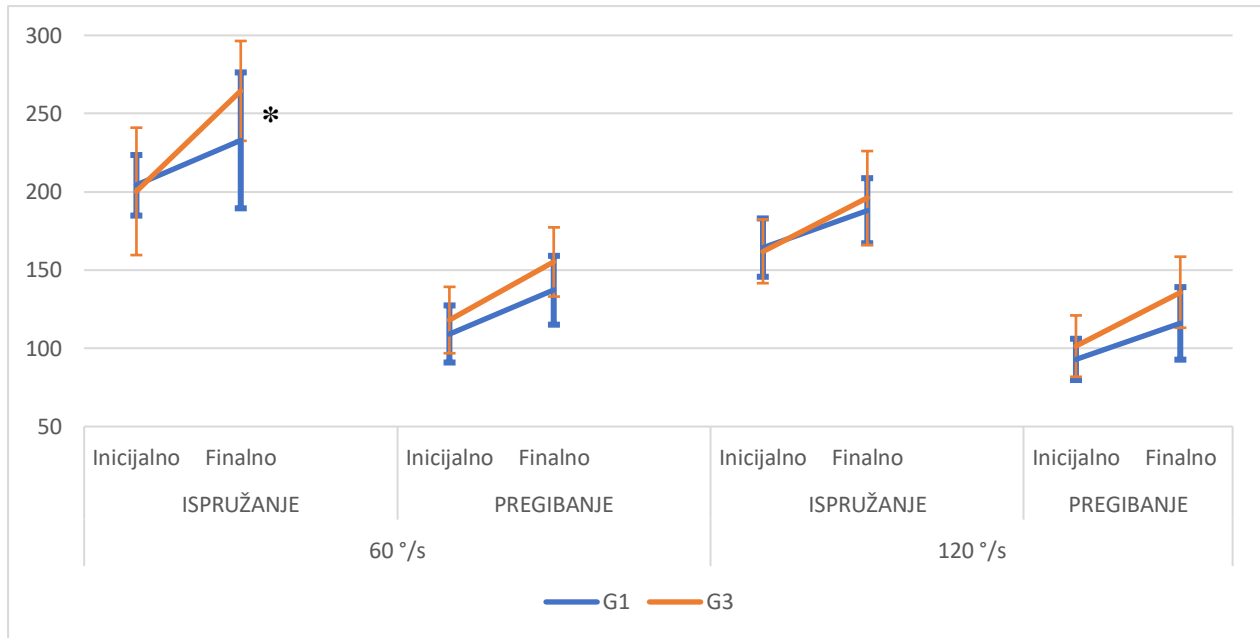
Nije otkrivena statistički značajna razlika inicijalnih vrijednosti vršnih momenata sile između grupa ($p > 0,125$).

Tablica 4. Deskriptivni pokazatelji vršnog momenta sile (Nm/kg) ispružanja i pregibanja koljena i lakta pri kutnim brzinama od 60 i 120°/s inicijalnog i finalnog stanja eksperimentalnih grupa (G1 i G3), veličina učinka (Cohenov d), veličina promjene (%), statistička značajnost razlika inicijalnog i finalnog stanja unutar grupa, i statistička značajnost razlika u promjenama između inicijalnog i finalnog stanja u obje grupe (interakcija grupa × vrijeme)

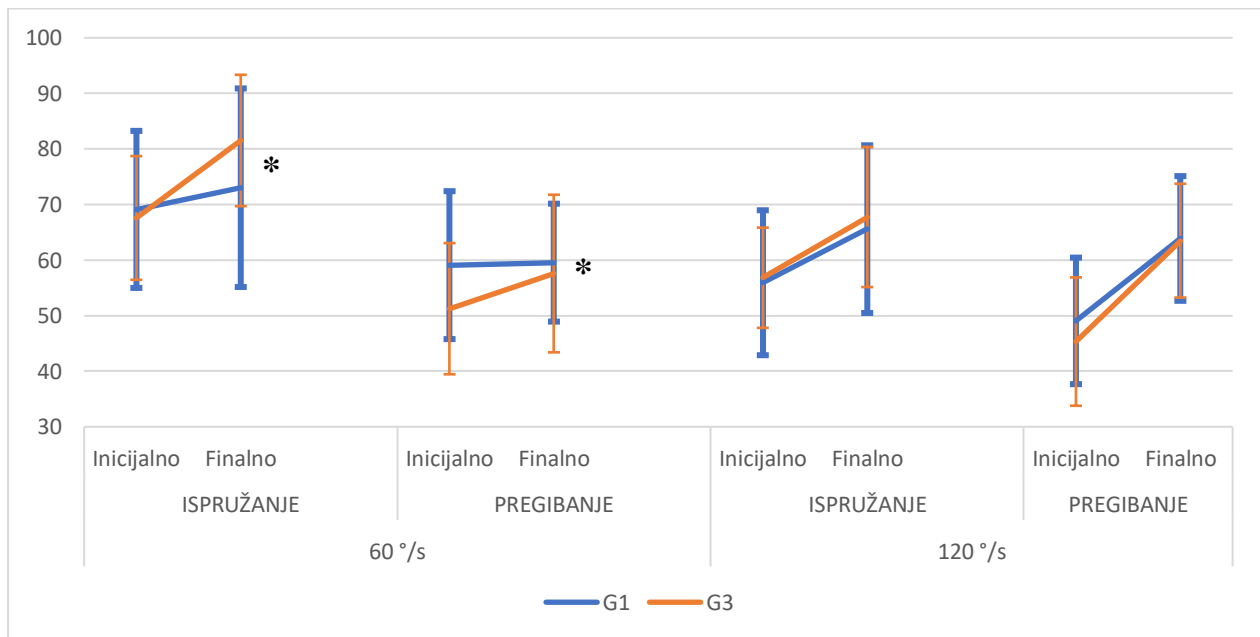
VRŠNI MOMENT SILE (Nm)		G1	VELIČINA UČINKA	VELIČINA PROMJENE	G3	VELIČINA UČINKA	VELIČINA PROMJENE	ANOVA									
								AS ± SD	Cohenov d	%	AS ± SD	Cohenov d	%	Interakcija (grupa × vrijeme)		Grupa	Vrijeme
														F(1,24)	η ² (p)	η ² (p)	η ² (p)
ISPRUŽANJE I PREGIBANJE KOLJENA	60 °/s	ISPRUŽANJE	Inicijalno	204,18 ± 19,36	1,48	14,07	200,31 ± 40,72	1,58*	32,06	4,884	,17 (,037**)	,06 (,227)	,58 (<,001**)				
			Finalno	232,91 ± 43,44										264,53 ± 31,91			
		PREGIBANJE	Inicijalno	109,17 ± 18,24	1,53*	25,59	118,06 ± 21,21	1,75*	31,45	1,562	,06 (,223)	,12 (,079)	,77 (<,001**)				
			Finalno	137,11 ± 22,01										155,19 ± 22,11			
	120 °/s	ISPRUŽANJE	Inicijalno	164,38 ± 18,65	1,26*	14,33	161,99 ± 20,37	1,67*	21,03	1,307	,26 (,052)	,01 (,714)	,62 (<,001**)				
			Finalno	187,95 ± 20,79										196,06 ± 30,02			
PREGIBANJE		Inicijalno	92,92 ± 13,19	1,74*	24,76	101,42 ± 19,62	1,75*	33,94	2,360	,09 (,138)	,15 (,052)	,71 (<,001**)					
		Finalno	115,93 ± 23,19										135,85 ± 22,71				
ISPRUŽANJE I PREGIBANJE KOLJENA	60 °/s	Inicijalno	69,12 ± 14,13	0,28	5,65	67,58 ± 11,13	1,25*	20,62	8,852	,27 (,007**)	,02 (,511)	,54 (<,001**)					

120 °/s	PREGIBANJE	Finalno	73,02 ± 17,87			81,52 ± 11,82						
		Inicijalno	59,09 ± 13,31	0,03	0,76	51,25 ± 11,80	0,54*	12,37	4,477	,16 (,045**)	,04 (,310)	,20 (,023**)
		Finalno	59,54 ± 10,61			57,58 ± 14,18						
	ISPRUŽANJE	Inicijalno	55,92 ± 13,04	0,74*	17,27	56,82 ± 9,02						
		Finalno	65,57 ± 15,09			67,75 ± 12,61						
		PREGIBANJE	Inicijalno	49,06 ± 11,39	0,20	4,53	45,34 ± 11,55	0,48*	12,15	1,310	,05 (,264)	,01 (,619)
Finalno	63,89 ± 11,22		63,49 ± 10,24									

LEGENDA: **p < 0,05; *p < 0,025; G1 = grupa s intervalom pauze u trajanju od jedne minute; G3 = grupa s intervalom pauze u trajanju od tri minute; AS = aritmetička sredina; SD = standardna devijacija.



Slika 22. Usporedba promjena dobivenih trenažnim procesom u vršnom momentu sile (Nm) grupa G1 i G3 prilikom ispružanja i pregibanja koljena pri 60 i 120°/s na izokinetičkom dinamometru. Linije grešaka predstavljaju standardne devijacije (*- interakcijski učinak; $p < 0,05$).



Slika 23. Usporedba promjena dobivenih trenažnim procesom u vršnom momentu sile (Nm) grupa G1 i G3 prilikom ispružanja i pregibanja lakti pri 60 i 120°/s na izokinetičkom dinamometru. Linije grešaka predstavljaju standardne devijacije (*- interakcijski učinak; $p < 0,05$).

Kod ispitanika grupe G3 jasno je vidljiv učinak tretmana na razvoj mišićne jakosti nogu i ruku kroz trend porasta vršnih vrijednosti momenata s vremenom ($p < 0,012$), međutim, u grupi G1 taj je

porast značajan jedino kod pregibanja koljena pri 60°/s, ispružanja i pregibanja koljena pri 120°/s, te kod ispružanja lakta pri 120°/s ($p < 0,009$), dok kod ostalih varijabli nema značajnih razlika ($p > 0,053$). Stoga su i učinci vremena značajni za sve vršne momente sila ispružanja i pregibanja koljena ($F_{1,24} = 33,5-78,3$; $p < 0,001$; $\eta^2 = 0,58-0,77$) i lakta ($F_{1,24} = 5,9-60,2$; $p = 0,00-0,023$; $\eta^2 = 0,20-0,72$). Nema statistički značajnih učinaka između grupa za koljeno ($F_{1,24} = 0,1-4,2$; $p = 0,08-0,71$; $\eta^2 = 0,01-0,15$), niti za lakat ($F_{1,24} = 0,1-1,1$; $p = 0,31-0,75$; $\eta^2 = 0,01-0,04$). Interakcija grupe i vremena statistički je značajna samo za ispružanje koljena pri kutnoj brzini od 60°/s ($F_{1,24} = 4,9$; $p = 0,037$; $\eta^2 = 0,17$), dok za ostale vršne momente sila koljena nema statistički značajnih razlika ($F_{1,24} = 1,3-2,4$; $p = 0,14-0,26$; $\eta^2 = 0,05-0,09$). Interakcija grupe i vremena statistički je značajna za ispružanje i pregibanje lakta pri kutnoj brzini od 60°/s ($F_{1,24} = 4,5-8,9$; $p = 0,007-0,045$; $\eta^2 = 0,16-0,27$), dok za vršne momente sila ispružanja i pregibanja lakta pri 120°/s nema statistički značajnih razlika ($F_{1,24} = 0,2-1,3$; $p = 0,27-0,64$; $\eta^2 = 0,0-0,1$).

4.1.2. Normalizirani vršni moment sile

Vrijednosti maksimalne koncentrične jakosti mišića ispružaća i pregibača lakta i koljena na izokinetičkom dinamometru pri kutnim brzinama od 60 i 120°/s u vidu proizvedenog vršnog momenta sile normaliziranog s tjelesnom masom (Nm/kg) inicijalnog i finalnog stanja eksperimentalnih grupa G1 i G3, te veličina učinka (Cohenov d), veličina promjene (%), statistička značajnost razlika između inicijalnog i finalnog stanja unutar i između grupa prikazane su u tablici 5, a vrijednosti inicijalnih i finalnih stanja normaliziranog vršnog momenta sile obaju grupa prilikom opružanja i pregibanja koljena i lakta pri 60 i 120°/s prikazane su na slikama 24 i 25.

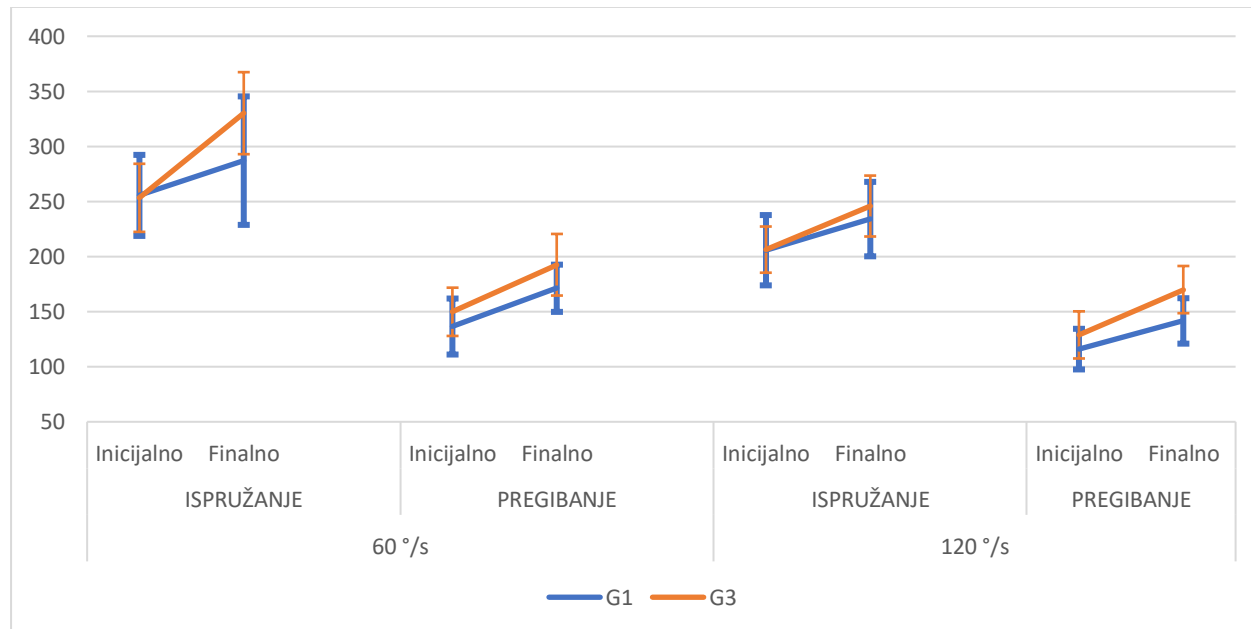
Nisu utvrđene statistički značajne razlike između grupa inicijalnih stanja normaliziranih vršnih momenata sile ($p > 0,125$).

Tablica 5. Deskriptivni pokazatelji (AS i SD) normaliziranog vršnog momenta sile (Nm/kg) ispružanja i pregibanja koljena i lakta pri kutnim brzinama od 60 i 120°/s inicijalnog i finalnog stanja eksperimentalnih grupa (G1 i G3), te veličina učinka (Cohenov d), veličina promjene (%), statistička značajnost razlika između inicijalnog i finalnog stanja unutar grupa, te između grupa (interakcija grupa \times vrijeme)

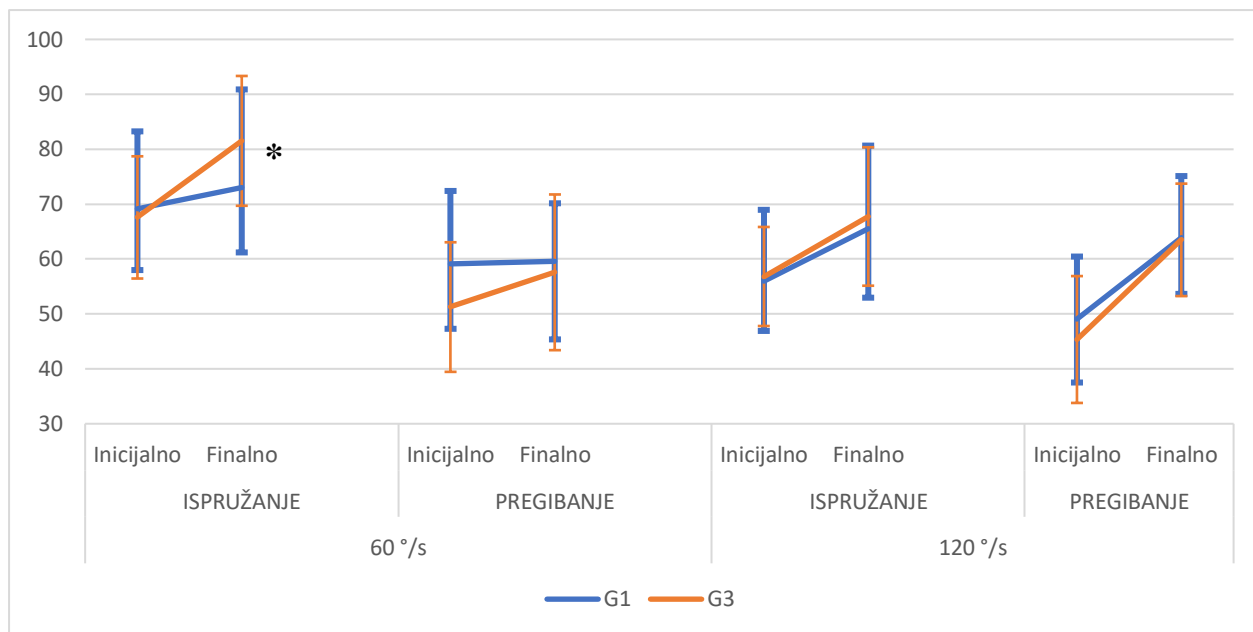
NORMALIZIRANI VRŠNI MOMENT SILE (Nm/kg)		G1	VELIČINA UČINKA	VELIČINA PROMJENE	G3	VELIČINA UČINKA	VELIČINA PROMJENE	ANOVA									
								AS ± SD	Cohenov d	%	AS ± SD	Cohenov d	%	Interakcija (grupa × vrijeme)		Grupa	Vrijeme
														F(1,24)	η ² (p)	η ² (p)	η ² (p)
ISPRUŽANJE I PREGIBANJE KOLJENA	60 °/s	ISPRUŽANJE	Inicijalno	255,53 ± 36,78	0,86	12,35	253,33 ± 30,89	2,49*	30,33	3,966	,14 (,058)	,11 (,101)	,49 (<,001**)				
			Finalno	287,09 ± 58,31										330,18 ± 37,23			
		PREGIBANJE	Inicijalno	136,48 ± 25,42	1,37*	25,45	149,85 ± 21,91	1,95*	28,52	,643	,03 (,430)	,16 (,043)	,72 (<,001**)				
			Finalno	171,22 ± 21,43										192,58 ± 27,97			
	120 °/s	ISPRUŽANJE	Inicijalno	205,78 ± 31,91	0,88*	13,72	206,30 ± 20,97	1,89*	19,18	,985	,04 (,331)	,02 (,536)	,60 (<,001**)				
			Finalno	234,02 ± 33,80										245,86 ± 27,64			
PREGIBANJE		Inicijalno	115,99 ± 18,45	1,39*	22,06	128,89 ± 21,40	1,92*	31,90	3,494	,13 (,074)	,27 (,006**)	,73 (<,001**)					
		Finalno	141,58 ± 20,62										170,01 ± 21,42				
ISPRUŽANJE I PREGIBANJE LAKTA	60 °/s	ISPRUŽANJE	Inicijalno	86,31 ± 19,31	0,22	4,87	85,86 ± 9,98	1,58*	18,42	8,706	0,27 (,007**)	,03 (,374)	,52 (<,001**)				
			Finalno	90,51 ± 19,75										101,68 ± 12,18			

120 °/s	PREGIBANJE	Inicijalno	73,58 ± 17,02	0,01	0,23	64,77 ± 10,47	0,67*	10,86	3,852	,14 (,061)	,05 (,275)	,15 (,050)
		Finalno	73,75 ± 12,11			71,80 ± 11,72						
	ISPRUŽANJE	Inicijalno	69,71 ± 17,00	0,68*	16,54	72,32 ± 9,43	1,38*	17,93	,178	,01 (,676)	,01 (,569)	,68 (<,001**)
		Finalno	81,24 ± 18,90			85,28 ± 14,26						
	PREGIBANJE	Inicijalno	61,03 ± 14,61	0,20	4,69	57,34 ± 11,09	0,55*	10,73	,865	,04 (,362)	,01 (,640)	,21 (,018**)
		Finalno	63,89 ± 11,22			63,49 ± 10,24						

LEGENDA: **p < 0,05; *p < 0,025; G1 = grupa s intervalom pauze u trajanju od jedne minute; G3 = grupa s intervalom pauze u trajanju od tri minute; AS = aritmetička sredina; SD = standardna devijacija.



Slika 24. Prikaz vršnih momenata sile (Nm/kg) ispružanja i pregibanja koljena pri 60 i 120°/s. Linije grešaka predstavljaju standardne devijacije.



Slika 25. Prikaz normaliziranom vršnih momenata sile (Nm/kg) ispružanja i pregibanja lakta pri 60 i 120°/s. Linije grešaka predstavljaju standardne devijacije (*- interakcijski učinak; $p < 0,05$).

Jednako kao i kod vršnog momenta sile, kod ispitanika grupe G3 uočljiv je učinak tretmana kroz trend porasta vršnih vrijednosti normaliziranog momenta sile ruku i nogu s vremenom ($p < 0,020$), međutim, u grupi G1 taj je porast značajan jedino kod pregibanja koljena pri 60°/s, ispružanja i pregibanja koljena pri 120°/s, te kod ispružanja lakta pri 120°/s ($p < 0,014$), dok kod ostalih varijabli nema značajnih razlika ($p > 0,128$). Stoga su i učinci vremena značajni i za sve normalizirane vršne momente sile koljena ($F_{1,24} = 22,7-64,5$; $p < 0,001$; $\eta^2 = 0,49-0,73$) i lakta ($F_{1,24} = 4,2-51,7$; $p = 0,000-0,049$; $\eta^2 = 0,15-0,68$), nema statistički značajnih učinaka između grupa kod ispružanja koljena ($F_{1,24} = 0,4-2,9$; $p = 0,06-0,43$; $\eta^2 = 0,03-0,14$) ni lakta ($F_{1,24} = 0,2-1,3$; $p = 0,275-0,640$; $\eta^2 = 0,01-0,05$), ali ima kod pregibanja koljena ($F_{1,24} = 4,6-9,0$; $p = 0,006-0,043$; $\eta^2 = 0,16-0,27$), dok kod interakcije grupe i vremena nema statistički značajnih razlika za koljeno ($F_{1,24} = 0,6-4,0$; $p = 0,058-0,430$; $\eta^2 = 0,03-0,14$), ali je statistički značajna za ispružanje lakta pri kutnoj brzini od 60°/s ($F_{1,24} = 8,7$; $p = 0,007$; $\eta^2 = 0,27$), dok za preostale normalizirane vršne momente sile u laktu nema statistički značajnih razlika ($F_{1,24} = 0,2-8,7$; $p = 0,061-0,676$; $\eta^2 = 0,00-0,14$).

4.2. Debljina i arhitektura mišića

Vrijednosti inicijalnog i finalnog stanja eksperimentalnih grupa G1 i G3, veličina učinka (Cohenov d), veličina promjene (%), statistička značajnost razlika između inicijalnog i finalnog stanja unutar grupa, te statistička značajnost razlika promjena između inicijalnog i finalnog stanja između grupa za debljine mišića prikazane su u tablici 6, a za arhitekturu mišića *vastus lateralis* u tablici 7.

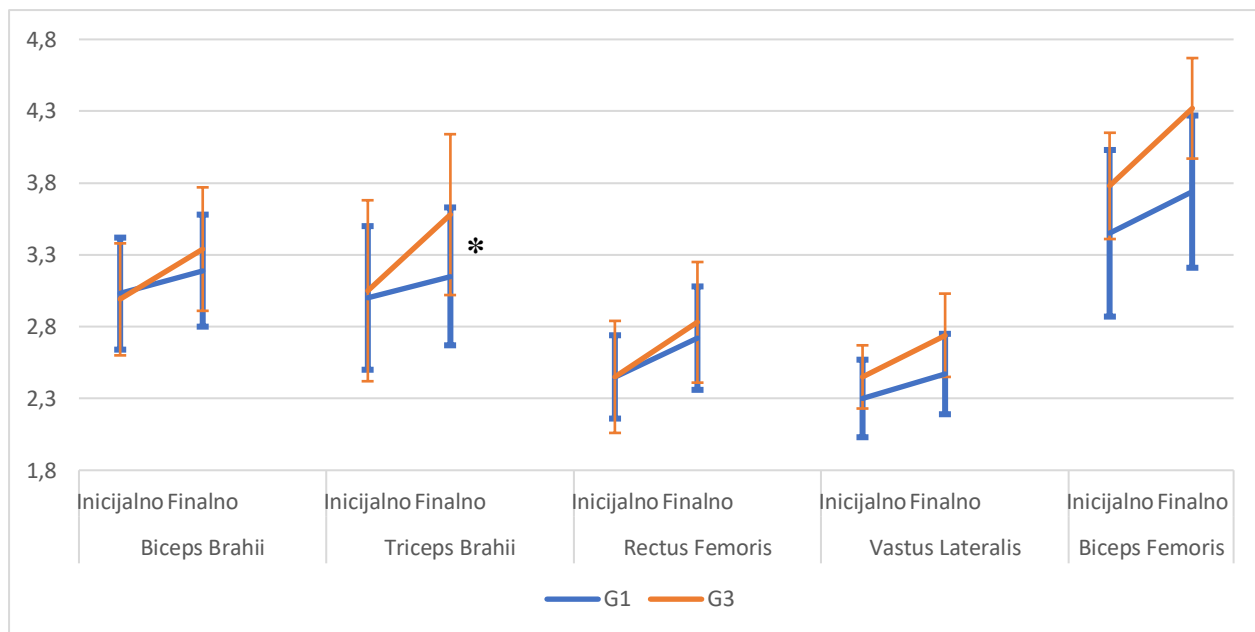
Nadalje, vrijednosti inicijalnih i finalnih stanja duljina snopova mišićnih vlakana *m. vastus lateralis* obaju grupa prikazane su na slici 26, a kutova penacije na slici 27.

Nisu zabilježene statistički značajne razlike između inicijalnih stanja obaju grupa svih izmjerenih debljina mišića ($p > 0,91$) i duljine snopova mišićnih vlakana ($p = 0,87$), dok se kutovi penacije razlikuju ($p = 0,009$) pa je za utvrđivanje razlika između grupa korištena ANCOVA.

Tablica 6. Debljina mišića (cm), razlika između inicijalnog i finalnog stanja unutar i između grupa (interakcija grupa × vrijeme)

DEBLJINA MIŠIĆA (cm)		G1	VELIČINA UČINKA	VELIČINA PROMJENE	G3	VELIČINA UČINKA	VELIČINA PROMJENE	ANOVA	
		AS ± SD	Cohenov d	%	AS ± SD	Cohenov d	%	F (1,24)	P
Biceps Brahii	Inicijalno	3,03 ± ,39	0,42	5,13	2,99 ± ,39	1,02*	10,26	4,17	,052
	Finalno	3,19 ± ,43			3,34 ± ,39				
Triceps Brahii	Inicijalno	3,00 ± ,63	0,23	5,39	3,05 ± ,50	0,91*	11,93	9,64	,005**
	Finalno	3,15 ± ,56			3,58 ± ,48				
Rectus Femoris	Inicijalno	2,45 ± ,39	0,71	4,92	2,45 ± ,29	1,06*	17,40	,57	,459
	Finalno	2,72 ± ,42			2,83 ± ,36				
Vastus Lateralis	Inicijalno	2,30 ± ,22	0,77*	11,22	2,45 ± ,27	1,33*	15,50	1,51	,230
	Finalno	2,47 ± ,29			2,74 ± ,28				
Biceps Femoris	Inicijalno	3,45 ± ,37	0,78*	7,31	3,78 ± ,58	1,05*	11,63	2,90	,101
	Finalno	3,74 ± ,35			4,32 ± ,53				

LEGENDA: **p < 0,05; *p < 0,025; G1 = grupa s intervalom pauze u trajanju od jedne minute; G3 = grupa s intervalom pauze u trajanju od tri minute; AS = aritmetička sredina; SD = standardna devijacija.



Slika 26. Debljina mišića *biceps brachii*, *triceps brachii*, *rectus femoris*, *vastus lateralis* i *biceps femoris*. Linije grešaka predstavljaju standardne devijacije (*- interakcijski učinak; $p < 0,05$).

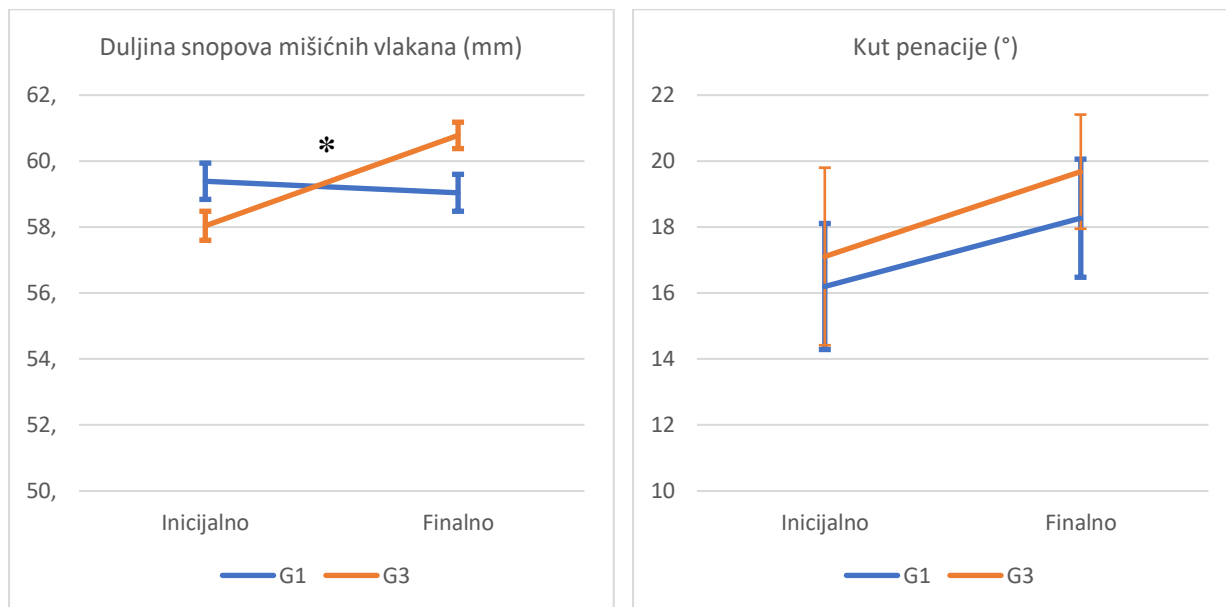
Tablica 7. Arhitektura mišića (duljina, mm; kut pružanja snopova mišićnih vlakana, °), razlika između inicijalnog i finalnog stanja unutar i između grupa (interakcija grupa × vrijeme)

ARHITEKTURA MIŠIĆA		G1	VELIČINA UČINKA	VELIČINA PROMJENE	G3	VELIČINA UČINKA	VELIČINA PROMJENE	ANOVA / ANCOVA			
								AS ± SD	Cohenov d	%	AS ± SD
		F (1,24)	η ² (p)	η ² (p)	η ² (p)						
Duljina snopova (mm)	Inicijalno	59,39 ± 0,55	-0,63	-0,6	58,04 ± 0,44	6,22*	4,72	32,7	,59 (<,001**)	,00 (,921)	,47 (<,001**)
	Finalno	59,04 ± 0,56			60,78 ± 0,40						
Kut penacije (°)	Inicijalno	16,20 ± 1,91	1,08*	12,78	17,11 ± 2,69	0,96*	15,02	0,8	,00 (,374)	,00 (,367)	,42 (<,001**)
	Finalno	18,27 ± 1,79			19,68 ± 1,73						

LEGENDA: **p < 0,05; *p < 0,025; G1 = grupa s intervalom pauze u trajanju od jedne minute; G3 = grupa s intervalom pauze u trajanju od tri minute; AS = aritmetička sredina; SD = standardna devijacija.

Iako je dobiven statistički značajan učinak tretmana na duljinu mišićnih vlakana s vremenom ($F_{1,24} = 19,6$; $p < 0,001$; $\eta^2 = 0,47$), on je značajan na temelju velikog porasta duljine samo u G3 ($p < 0,001$), dok u G1 nije došlo do značajnih promjena duljine vlakana ($p = 0,076$). Stoga je dobivena i statistički značajna interakcija grupe i vremena ($F_{1,24} = 32,7$; $p < 0,001$; $\eta^2 = 0,59$). Nema statistički značajnih učinaka između grupa ($F_{1,24} = 0,01$; $p = 0,921$; $\eta^2 = 0,00$).

Kako su obje grupe statistički značajno povećale kut penacije nakon osmotjednog tretmana ($p < 0,027$), dobiven je i statistički značajan učinak tretmana na kut penacije ($F_{1,24} = 17,2$; $p < 0,001$; $\eta^2 = 0,42$), no nisu utvrđeni statistički značajni učinci između grupa ($F_{1,24} = 0,9$; $p = 0,367$; $\eta^2 = 0,04$), niti njihova interakcija ($F_{1,24} = 0,8$; $p = 0,374$; $\eta^2 = 0,03$).



Slika 27. Prikaz duljine snopova mišićnih vlakana (mm) (lijevo) i kutova penacije (°) (desno) *m. vastus lateralis*. Linije grešaka predstavljaju standardne devijacije (* $p < 0,05$).

5. RASPRAVA

Ovo istraživanje istražuje učinke dvaju progresivnih programa treninga s otporom na mišićnu građu i izvedbu. Vrednovani su specifični učinci jednakih programa treninga s otporom različitih trajanja intervala odmora na debljinu mišića i maksimalni mehanički izlaz jakosti (vršni i normalizirani vršni moment sile) donjih i gornjih ekstremiteta pri sporim (60 °/s) i bržim (120 °/s) mišićnim akcijama; te su istraženi adaptacijski procesi vezani za različiti utjecaj trajanja intervala odmora na arhitekturu mišića (kut penacije i duljinu snopova mišićnih vlakana).

5.1. Utjecaj jednakih programa treninga s otporom različitih trajanja intervala odmora na jakost mišića

Glavni nalazi ovog istraživanja odbacuju hipotezu da će jakost sporijih i bržih mišićnih akcija pri izvedbi pregibanja i ispružanja podlaktica i potkoljenica biti statistički značajno veća nakon programa treninga s otporom s dužim trajanjem intervala odmora u odnosu na program treninga s kraćim intervalom odmora. Razlike su vidljive u tri od osam uvjeta i to pri manjim brzinama: ispružanje koljena, te ispružanje i pregibanje lakta.

Dobiveni nalazi postaju jasniji kada se usporede porasti vršnih momenata između inicijalnih i finalnih stanja unutar svake grupe posebno: porast je statistički značajan u svim uvjetima grupe G3, dok je on u grupi G1 uočen u četiri od osam uvjeta: u pregibanju koljena pri manjim brzinama, ispružanju i pregibanju koljena pri većim brzinama, i pri ispružanju lakta pri većim brzinama.

Nadalje, normalizirajući vršni moment sile s tjelesnom masom ispitanika, razlike između grupa su se smanjile te je statistički značajna razlika dobivena jedino pri ispružanju lakta manjom kutnom brzinom. Stoga se postavljena hipoteza može odbaciti i ponuditi alternativna: jakost sporih i brzih mišićnih akcija pri izvedbi pregibanja i ispružanja potkoljenica i podlaktica biti će sličan kod jednakih programa treninga s otporom neovisno o trajanju intervala odmora između serija.

No promatrajući veličine učinka i veličine promjena s aplikativnog stajališta, iako je vidljiv jasan porast vršnih momenata u obje grupe, potrebno je naglasiti da su ti porasti veći u grupi G3 u svim uvjetima. Konkretno, pronađene su velike veličine učinka i veličine promjena u grupi G3 (21-34%)

u odnosu na grupu G1 (14-26%) pri ispružanju i pregibanju koljena, te 12-20% nasuprot 0-17% grupe G3 u odnosu na grupu G1 pri ispružanju i pregibanju lakta. Čini se kako su ispitanici grupe G3, iako ne statistički značajno, imali veći porast jakosti od grupe G1.

Jedan od mogućih razloga tome su i statistički značajne razlike dobivene u veličini trenažnog opterećenja između grupa. Naime, iako su obje grupe cijelo vrijeme trenirale do točke trenutnog koncentričnog mišićnog otkaza kada više nije bilo moguće izvesti sljedeće koncentrično ponavljanje uz zadržavanje pravilne tehnike (Zaroni i sur., 2019) s jednakim zadanim relativnim opterećenjem od 70% 1RM, ono je u apsolutnim vrijednostima s vremenom raslo brže u grupi G3. Stoga je veća razina opterećenja grupe G3 neizravna posljedica dužeg trajanja intervala odmora koji je omogućio bolji oporavak i zadržavanje višeg intenziteta treninga u odnosu na grupu G1 (Willardson, 2006).

Nalazi ovog istraživanja u skladu su s rezultatima preglednog rada i meta-analize Carvalho i sur. (2022) koji pokazuju da treninzi s većim opterećenjima izazivaju i veći porast mišićne jakosti u usporedbi s treninzima s manjim opterećenjima. Štoviše, čini se da ovi rezultati slijede odnos doza-odgovor, pri čemu najveća opterećenja pružaju i najveću korist povezanu s jakosti. Campos i sur. (2002), Fatouros i sur. (2005, 2006), Jenkins i sur. (2016), Jessee i sur. (2018), Kubo i sur. (2021), Lasevicius i sur. (2018, 2022), te Schoenfeld i sur. (2014) su utvrdili veći porast mišićne jakosti korištenjem većeg vanjskog opterećenja, za razliku od Barcelos i sur. (2015), Hortobágyi i sur. (2001), Lopes i sur. (2017), Taaffe i sur. (1996), te Vincent i sur. (2002) koji nisu utvrdili razlike između utjecaja veličina vanjskog opterećenja na razvoj mišićne jakosti. Zanimljivo, Bembien i sur. (2000) su, slično nalazima ovog istraživanja, pronašli veći porast jakosti kod nekih, ali ne i svih mišićnih skupina.

S praktičnog stajališta, ovi rezultati ukazuju na to da bi osobe koje žele optimizirati dinamičku mišićnu jakost trebali koristiti veća vanjska opterećenja. Međutim, porast jakosti je moguć i uz uporabu relativno malih opterećenja. No, jesu li ta povećanja dovoljna za optimizaciju sportskih performansi ili aktivnosti svakodnevnog života, to ovisi o specifičnim individualnim potrebama i sposobnostima. Također, još uvijek nije jasno koliko često je potrebno koristiti veća opterećenja kako bi se postigao maksimalan porast mišićne jakosti (Carvalho i sur., 2022).

5.2. Utjecaj jednakih programa treninga s otporom različitih trajanja intervala odmora na debljinu mišića

Nekoliko je preglednih članaka pokazalo da na hipertrofijske prilagodbe značajno utječe interval odmora između serija, pri čemu različiti intervali odmora daju različite rezultate za različite ciljeve treninga (Ahtiainen i sur., 2005; *American College of Sports Medicine*, 2009; De Salles i sur., 2009; Willardson, 2006). Sukladno tome, propisani intervali odmora obično se razlikuju prema cilju treninga (*American College of Sports Medicine*, 2009; De Salles i sur., 2009; Willardson, 2006). Kako bi se maksimizirala mišićna hipertrofija, mnogi autori preporučuju intervale odmora od 30-60 sekundi, jer navodno rezultiraju najvećim povećanjem anaboličkih hormona, osobito hormona rasta (De Salles i sur., 2009; Willardson, 2006). ACSM preporuča intervale odmora od 1-2 minute za programe treninga osmišljene za razvoj mišićne hipertrofije kod početnika (*American College of Sports Medicine*, 2009).

Kraći intervali odmora mogu negativno utjecati na performanse (tj. smanjenje obujma treninga) (De Salles i sur., 2009) i imaju visoku metaboličku potražnju (Ratamess i sur., 2007). Nasuprot tome, intervali odmora duljeg trajanja mogu omogućiti veći trenažni volumen, regeneraciju visokoenergetskih fosfatnih veza, a također su i manje metabolički zahtjevni. Međutim, zahtijevaju više vremena za provedbu programa vježbanja.

Nema znanstvenog dokaza za veću hipertrofiju mišića koristeći kraće u usporedbi s duljim intervalima odmora. Longitudinalne studije koje su izravno mjerile hipertrofiju u skupinama s različitim intervalima odmora nisu utvrdile razliku između skupina ili pak veće povećanje opsega mišića u skupini koja je koristila duže intervale odmora (2,5 minute) u odnosu na skupinu s kraćim intervalom odmora (1 minuta) (Buresh i sur., 2009). Međutim, postoji nedostatak kontroliranih istraživanja na tu temu, a studije koje su provedene imaju metodološka ograničenja, otežavajući mogućnost generalizacije i donošenja meritornih zaključaka.

Dosadašnja istraživanja ukazuju da manipulacija intervalom odmora ima manje učinke na hipertrofiju mišića u usporedbi s drugim akutnim programskim varijablama kao što je npr. volumen treninga (De Souza i sur., 2010; Souza-Junior i sur., 2011; Willardson, 2006). S obzirom na to da su Buresh i sur. (2009) utvrdili veći porast mišićne hipertrofije u skupini s dužim intervalom odmora u odnosu na skupinu s kraćim intervalom odmora, ne može se potvrditi pretpostavka da trening za maksimiziranje mišićne hipertrofije zahtijeva kraće intervale odmora. Upravo u prilog tome idu i nalazi ovog istraživanja. Naime, ovo istraživanje ukazuje na značajno povećanje debljine

mišića nakon osam tjedana trenažnog programa u oba uvjeta trajanja intervala odmora između serija, no bez statistički značajnih razlika u odnosu na trajanje intervala odmora između serija, osim kod *m. triceps brachii*. Stoga se odbacuje hipoteza da program treninga s otporom s dužim trajanjem intervala uzrokuje statistički značajno veći porast debljine mišića od programa s kraćim intervalom odmora. I može se ponuditi alternativna hipoteza: porast debljine mišića neće se značajni razlikovati nakon programa treninga s otporom neovisno o apliciranom trajanju intervala odmora između serija.

Rezultati ovog istraživanja u skladu su s rezultatima Grgica i sur. (2017) koji su, uspoređujući kratke i duge intervale odmora, utvrdili praktično zanemarivu prednost dugih intervala odmora u odnosu na kratke pri razvoju mišićne hipertrofije (dugi: $9,2 \pm 0,1\%$; kratki: $5,8 \pm 1,1\%$, $p = ,22$). Stoga, sličan učinak kratkih i dugih intervala odmora između serija na promjene u hipertrofiji, ukazuje da se obje metode mogu koristiti za maksimiziranje rasta mišićne mase. S druge strane, Schoenfeld i sur. (2016) utvrdili su prednost korištenja dužih intervala odmora (3 min) za povećanje mišićne mase u tri od četiri mjerena mišića. U istraživanju Finka i sur. (2017) na uzorku netreniranih ispitanika također je utvrđena veća hipertrofija mišića donjeg dijela tijela u korist dugih naspram kratkih intervala odmora između serija (Cohenov d: 0,93 za duge i 0,58 za kratke intervale). Ratamess i sur. (2007) navode da trening s duljim intervalima odmora između serija omogućuje veći ukupni volumen treninga te da intervali odmora kraći od 60 sekundi narušavaju oporavak što rezultira manjim brojem ponavljanja po seriji pri zadanom opterećenju. Stoga, kratki intervali odmora mogu biti suboptimalni za treniranu osobu koja želi maksimizirati hipertrofiju. U radu McKendry i sur. (2016) dvije skupine su trenirale s otporom korištenjem intervala odmora između serija od 1, odnosno 5 minuta; skupina s duljim intervalima odmora povećala je sintezu miofibrilarnog proteina za 152%, dok ju je skupina s kraćim intervalima odmora povećala za svega 76%. To također ukazuje na prednost duljih intervala odmora, tj. veće sinteze miofibrilarnih proteina u odnosu na njihovu razgradnju, i posljedično većeg ukupnog neto porasta, odnosno hipertrofije (Phillips, 2014). Rezultati ovog istraživanja u skladu su s navedenim nalazima. Iako se kraći intervali odmora već duže preporučuju za programe treninga s otporom usmjerene na razvoj hipertrofije, čini se da bi trebalo promijeniti paradigmu, budući da duži intervali odmora između serija mogu pružiti više koristi, ne samo za razvoj jakosti, već i za razvoj mišićne hipertrofije.

S praktičnog stajališta, dobiveni nalazi ukazuju da se i dulji i kraći intervali odmora između serija mogu koristiti za razvoj mišićne hipertrofije. Međutim, za maksimiziranje mišićne hipertrofije,

budući da ona zahtjeva trening s većim ukupnim volumenskim opterećenjem, preporuča se dulji interval odmora između serija, konkretno, dulji od jedne minute.

5.3. Utjecaj jednakih programa treninga s otporom različitih trajanja intervala odmora na arhitekturu mišića

Treći glavni nalazi ove studije ukazuju na značajno povećanje kuta penacije kod obje skupine ispitanika (bez razlika između njih) i značajno povećanje duljine snopova mišićnih vlakana samo kod skupine G3 (statistički značajno razlikovanje od grupe G1) nakon osam tjedana trenažnog programa. Time se parcijalno prihvaća postavljena hipoteza koja kaže da će program treninga s otporom s dužim trajanjima intervala odmora izazvati statistički značajno veći porast duljine i kuta pružanja snopova mišićnih vlakana od programa treninga s kraćim intervalima odmora.

Arhitektura mišića jedna je od odrednica mišićne funkcije (Lieber i Fridé, 2000), i može utjecati na odnose sila-duljina i sila-brzina u mišiću (Lieber i Fridé, 2000; Narici, 1999; Narici i sur., 2016). Lieber i Fridé (2000) navode da kraća mišićna vlakna imaju manju maksimalnu brzinu skraćivanja koja, čini se, mogu utjecati na brzinu kontrakcije na razini cijelog mišića (Narici i sur., 2016). Nasuprot tome, maksimalna sila koju mišić može proizvesti proporcionalna je broju sarkomera poredanih paralelno, a time i njihovom kutu penacije (Narici i sur., 2016). Međutim, unatoč tim teorijskim razmatranjima, nalazi istraživanja o povezanosti funkcionalnih parametara i arhitekture mišića *in vivo* su kontroverzna, a utjecaj trajanja intervala odmora između serija na arhitekturu mišića do sada nije istraživano.

Nalazi ove disertacije ukazuju na statistički značajan porast kutova penacije nakon osam tjedana treninga s otporom u obje skupine (za 12,8% grupa G1 i za 15,0% grupa G3), neovisno o duljini trajanja intervala odmora između serija. Nalazi su slični značajnim promjenama povećanja kuta penacije uočenih nakon kratkotrajnog programa treninga s otporom u radovima Aagaard i sur. (2001), Balshaw i sur. (2017), Ema i sur. (2013), Franchi i sur. (2014), Seynnes i sur. (2007), Aagaard i sur. (2002), Blazevich i sur. (2003). Nadalje, dobiveni rezultati mogu se usporediti s nalazima studije Maden-Wilkinson i sur. (2020) koji su istražili razlike u arhitekturi mišića, tj. u kutu penacije i duljini snopova mišićnih vlakana između netrenirane populacije i populacije koja trenira isključivo s otporima duže od četiri godine, tj. *bodybuildera*. Utvrdili su da *bodybuilderi*

imaju za 13% veći kut penacije i za 11% dulje snopove mišićnih vlakana od netreniranih osoba. Veći kut penacije omogućuje pričvršćivanje više kontraktilnog materijala, a time i primjenu veće sile na tetivu, odnosno na aponeurozu (Kawakami i sur., 1993), iako prijenos sile na tetivu s povećanjem kuta postaje sve manji (s obzirom na kosinus kuta penacije) (Maden-Wilkinson i sur., 2020). I Fukutani i Kurihara (2015) su utvrdili da *bodybuilderi* imaju puno veći kut penacije *m. vastus lateralis* ($20,4^\circ$) od netreniranih osoba koje potvrđuju mišićne arhitektonske promjene dugoročnog bavljenja treningom s otporom.

Nadalje, ovom je studijom utvrđen veliki porast duljine snopova mišićnih vlakana ($ES = 6,22$) samo u grupi G3 i to za 4,72%, dok u grupi G1 nije uočena značajna promjena (-0,6%). Zaključci o porastu duljine snopova mišićnih vlakana u postojećoj literaturi, koji se temelje uglavnom na kratkoročnim programima treninga s otporom, su kontroverzni, gdje jedni autori nisu dobili nikakve promjene duljine snopova (Alegre i sur., 2014; Blazevich, Cannavan, i sur., 2007; Ema i sur., 2013; Erskine i sur., 2010, 2011; Seynnes i sur., 2013; Wakahara i sur., 2015), drugi su otkrili povećane duljine snopova (Alegre i sur., 2006; Noorkoiv, Stavnsbo, i sur., 2010; Ullrich i sur., 2015). Mogući razlozi kontroverznim nalazima arhitektonskih promjena, posebno duljine snopova mišićnih vlakana, nakon programa treninga s otporom mogle bi, slično kao i kod hipertrofije mišića, dijelom biti posljedica heterogenih regionalnih arhitektonskih promjena u cijelom mišiću (Blazevich, Cannavan, i sur., 2007; McMahon i sur., 2014).

5.4. Ograničenja studije

Prije samih zaključaka potrebno je istaknuti nekoliko metodoloških aspekata ovog istraživanja.

Prvo, studija je provedena na mladim muškarcima pa se nalazi ne mogu generalizirati na druge populacije, uključujući žene, starije osobe i/ili osobe s dugogodišnjim trenažnim iskustvom u treningu s otporom. Također, režim prehrane ispitanika nije bio definiran, što je moglo utjecati na rezultate između uvjeta. Međutim, ispitanici su bili upućeni da zadrže svoje prehrambene navike i ne unose dodatne izvore energije tijekom cijelog procesa istraživanja.

Drugo, potrebno je naglasiti da je maksimalna jakost ispitanika utvrđena izokinetičkim dinamometrom. Međutim, u prirodnim pokretima ljudskog tijela kutna brzina nije konstantna u cijelom opsegu pokreta zgloba. U prirodnim pokretima ljudski mišić slijedi ciklus istežanja i skraćivanja u kojem fazu ekscentričnog istežanja mišićno-tetivne jedinice prati koncentrična kontrakcija, a kutna brzina se mijenja zajedno s promjenom zglobnog kuta. No, unatoč toj činjenici, uz familijarizaciju sa specifičnostima mjerenja, izokinetička dinamometrija postaje pouzdan i valjan mjerni instrument za procjenu maksimalne jakosti ispitanika.

Nadalje, procjena mišićne hipertrofije utvrđena je dijagnostičkim ultrazvukom mjerenjem debljine mišića na samo jednoj lokaciji duž svakog pojedinog mišića. Moguća je neuniformna debljina i hipertrofija uzduž proučavanih mišića uzrokovana treningom s otporom. Također, kut i duljina snopova mišićnih vlakana izmjereni su samo na jednoj lokaciji *m. vastus lateralis*, što onemogućuje utvrđivanje morfoloških značajki na drugim mišićnim lokacijama. No, mjerenja su vršena u skladu s već korištenom metodologijom u prethodnim istraživanjima, pa su rezultati ovog istraživanja usporedivi i smisleni.

Vezano uz mišićnu arhitekturu, još jedan mogući limit studije vezan je uz mjerenje duljine snopova mišićnih vlakana. Glavno ograničenje standardnog ultrazvuka je relativno malo vidno polje, koje je određeno veličinom sonde. Ono može utjecati na rezultate kod mišića s duljim snopovima mišićnih vlakana i njihov složeniji raspored. U ovom je istraživanju vidno polje povećano stvaranjem kolaža (spajanjem dviju susjednih slika) čime je pogreška mjerenja *m. vastus lateralis* (koji ima relativno kratke i ravne snopove mišićnih vlakana) značajno smanjena.

5.5. Zaključna rasprava

U ovom je radu istraživana utjecaj različitih trajanja intervala odmora između serija u treningu s otporom na morfološke i mehaničke izlaze mišića. Istraženi su učinci dvaju trenažnih programa izjednačenih po svim akutnim programskim varijablama osim po duljini trajanja intervala odmora, kako bi se utvrdili utjecaji na jakost u vidu vršnog i s tjelesnom masom normaliziranog vršnog momenta sile, te debljinu i arhitekturu mišića u vidu kuta penacije i duljine snopova mišićnih vlakana.

Dobiveni rezultati odbacuju osnovnu hipotezu da jednaki programi treninga s otporom s različitim trajanjem intervala odmora imaju različiti utjecaj na debljinu mišića, jakost i arhitekturu mišića, te se nameće izmijenjena, alternativna hipoteza. Naime, jedine utvrđene statistički značajne razlike između grupa u vršnom i normaliziranom vršnom momentu sile pronađene su na četiri od šesnaest uvjeta u korist dužeg intervala odmora između serija, i to dominantno pri manjim kutnim brzinama, gdje su se s porastom kutne brzine razlike između uvjeta smanjile. Tako rezultati potvrđuju učinkovitost oba trenažna programa s otporom u razvoju mišićne jakosti. Naime, neovisno o trajanju intervala odmora između serija, programi koji su izjednačeni prema drugim, važnijim značajkama, kao što je to volumen treninga, imati će slične učinke na mehaničke karakteristike mišića, neovisno o veličini tijela. Stoga je upitno korištenje dužih intervala odmora u treningu s otporom za razvoj mišićne jakosti, s obzirom da korištenje kraćih intervala odmora može biti jednako učinkovito kao i programi s duljim intervalima odmora. Štoviše, dokazi pokazuju da, bez obzira na trenažni volumen, najveći utjecaj na porast mišićne jakosti ima veličina trenažnog opterećenja, odnosno intenzitet, koji može povećati broj aktiviranih motoričkih jedinica, veću učestalost aktiviranja motoričkih jedinica i veće promjene u stopi agonističko-antagonističke koaktivacije u odnosu na niže intenzitete.

Nadalje, rezultati također ukazuju da trening s otporom ima značajan utjecaj i na morfološke promjene u vidu porasta debljine mišića. Međutim, kako je značajna razlika u porastu debljine mišića između grupa vidljiva na samo jednom od pet izmjerenih mišića, čini se kako različito trajanje intervala odmora nije akutna programska varijabla koja može značajno utjecati na porast veličine mišića. Iako su mehanizmi još uvijek nejasni, pretpostavka je da kumulativni učinak većih količina treninga s otporom izaziva i veće stope sinteze proteina i unutarstanične anaboličke signalizacije, čime se s vremenom pretvara i u veći porast mišićne hipertrofije. Stoga, nalazi

sugeriraju da intervali odmora od 1 ili 3 minute proizvode sličan porast mišićne hipertrofije pod uvjetom da su volumeni treninga izjednačeni.

Razlike porasta duljina snopova mišićnih vlakana samo djelomično upućuju na korist duljeg trajanja intervala odmora. No, kako je kut penacije važnija arhitektonska karakteristika mišića u kontekstu debljine mišića i proizvodnje većeg momenta sile, ovi nalazi su u skladu s gore spomenutim nalazima.

Sveukupno, trajanje intervala odmora u programima treninga s otporom nema presudnu ulogu za razvoj mišićne jakosti ili hipertrofiju mišića. Ipak, ovakvo uopćavanje treba uzeti s rezervom. Iako su uočeni porasti gotovo svih varijabli u obje skupine ispitanika i nisu utvrđene statistički značajne razlike između njih, ipak je vidljiv trend većeg porasta u grupi koja je imala duži interval odmora u svim mjerenim varijablama. S aspekta praktične važnosti, opažene promjene su stvarne i primjetne. Imajući to u vidu, ako se pogledaju utjecaji trajanja intervala odmora na mehanički izlaz vršnog i normaliziranog vršnog momenta sile, kao i na debljine mišića i njegove arhitekture, jasno se može zaključiti kako je trajanje intervala odmora od tri minute omogućilo veće finalne rezultate s većom učincima i promjenama od intervala odmora od jedne minute.

6. ZAKLJUČAK

Osnovni cilj disertacije bio je usporediti učinke jednakih programa treninga s otporom različitih trajanja intervala odmora na debljinu mišića, jakost i arhitekturu mišića, te je, vezano uz ovaj opći cilj, postavljena opća istraživačka hipoteza: jednaki programi treninga s otporom s različitim trajanjem intervala odmora imati će različiti utjecaj na debljinu mišića, jakost i arhitekturu mišića.

Tako postavljen opći cilj raščlanjen je na tri specifična cilja - vrednovati specifične učinke jednakih programa treninga s otporom različitih trajanja intervala odmora na: 1) debljinu mišića; 2) maksimalni mehanički izlaz jakosti (vršni moment sile) donjih i gornjih ekstremiteta pri sporim (60 °/s) i brzim (120 °/s) mišićnim akcijama; te 3) arhitekturu mišića (duljinu i kut pružanja snopova mišićnih vlakana).

Istraživačke hipoteze vezane uz specifične ciljeve glasile su: program treninga s otporom s dužim trajanjem intervala odmora izazvati će statistički značajno veći porast: 1) debljine mišića; 2) jakosti sporih i brzih mišićnih akcija pregibanja i ispružanja lakta i koljena; te 3) duljine i kuta pružanja snopova mišićnih vlakana, od programa treninga s kraćim intervalom odmora.

Prigodni uzorak ispitanika bile su mlade, zdrave i tjelesno aktivne muške osobe, studenti Kineziološkog fakulteta Sveučilišta u Zagrebu (n = 26) koji su slučajnim odabirom podijeljeni u: 1) eksperimentalnu skupinu treninga s otporom s pauzom između serija u trajanju od jedne minute, i 2) eksperimentalnu skupinu treninga s otporom s pauzom između serija u trajanju od tri minute.

Mjerenja su provedena na početku, prije provedbe trenažnog programa te na kraju, tjedan dana nakon osmotjednog trenažnog perioda. Svaka od eksperimentalnih skupina bila je podvrgnuta programiranom progresivnom treningu s otporom tri puta tjedno kroz osam tjedana, koji je uključivao sedam vježbi (osnovnih i izolirajućih, sa slobodnim utegom i/ili na trenažeru). Intenzitet izvođenja bio je individualiziran i odgovarao je opterećenju od 70% od 1RM u svakoj vježbi, što je omogućilo u prosjeku 12 ponavljanja po seriji izvedenih do točke trenutnog koncentričnog mišićnog otkaza. Ukupni relativni volumen treninga s obzirom na 1RM progresivno se povećao i bio je izjednačavan između grupa. Jedina akutna programska varijabla čija je namjera bila razlikovanje između trenažnih grupa bila je vrijeme pauze između serija.

Rezultati su pokazali kako osmotjedni trenažni program povećava vršni i normalizirani vršni moment sile, debljinu mišića, i kut penacije, bez obzira na duljinu trajanja intervala odmora. Samo je u grupi s dužim intervalom odmora došlo do značajnog porasta duljine snopova mišićnih vlakana.

Općenito, rezultati sugeriraju da su akutne programske varijable važne determinante odgovorne za povećanje mišićne jakosti nakon treninga s otporom, i da bi promjene debljine i arhitekture mišića nastale trenažnim procesom mogle biti specifično ovisne o programiranom trenažnom procesu, ali ponajviše o volumenu treninga i veličini trenažnog opterećenja.

Zaključno, s teorijskog stajališta, eksperimentalni rezultati dobiveni ovom disertacijom u velikoj mjeri pružaju bolje razumijevanje optimizacije akutnih programskih varijabli prilikom planiranja i programiranja treninga s otporom. Isto tako, oplemenjuju teorijski okvir za razumijevanje i predviđanje transformacijskih procesa mišićnog sustava, njihovu građu i funkciju u sklopu treninga s otporom. Temeljem navedenog stvara se pretpostavka za donošenje konkretnih zaključaka o utjecaju različitih intervala odmora na ukupno trajanje trenažnog procesa što može pomoći u stvaranju smjernica u treningu vrhunskih sportaša i rekreativaca.

S praktičnog stajališta, rezultati ove disertacije daju osnovu za novi pristup programiranju trenažnih procesa. Točnije, važna implikacija bila bi da se prilikom odabira akutnih programskih varijabli naglasak stavi na dovoljan volumen treninga i odgovarajuće trenažno opterećenje, dok trajanje intervala odmora ima tek sekundarnu, ali ne i zanemarujuću ulogu u razvoju jakosti i mišićne hipertrofije. Također, treba napomenuti da je korištenje kraćih intervala odmora svakako vremenski učinkovitije, što može omogućiti veće pridržavanje redovitom planu treninga kod osoba s ograničenim vremenom za treniranje jer je upravo nedostatak vremena najcitiranija prepreka pojedinaca koji sudjeluju u raznim programima treninga.

Stoga se na temelju dobivenih nalaza predlaže da, ako je cilj treninga maksimiziranje mišićne jakosti, intervali odmora budu "dovoljno dugi" da omoguće održavanje visokih intenziteta opterećenja tijekom svake serije. Kada je, pak, cilj treninga postići hipertrofiju mišića, dugi intervali (3 minute) omogućuju izvođenje većeg volumena treninga s manjim brojem serija, dok kratki intervali (1 minuta) zahtijevaju izvođenje većeg broja serija kako bi se povećao volumen treninga, a oba su, čini se, učinkovita za povećanje mišićne hipertrofije. Drugim riječima, moguće

je koristiti i duge i kratke intervale odmora sve dok se izvode programi treninga s otporom velikog trenažnog volumena.

Buduća bi istraživanja trebala biti orijentirana prema učincima intervala odmora u treningu s otporom na različitim populacijama, kao i prema proučavanju živčano-mišićnih, biomehaničkih i fizioloških mehanizama koji su odgovorni za razvoj mišićne jakosti i hipertrofije.

7. LITERATURA

1. Aagaard, P., Andersen, J. L., Dyhre-Poulsen, P., Leffers, A. M., Wagner, A., Magnusson, S. P., Halkjaer-Kristensen, J., & Simonsen, E. B. (2001). A mechanism for increased contractile strength of human pennate muscle in response to strength training: changes in muscle architecture. *The Journal of Physiology*, *534*(Pt. 2), 613–623. <https://doi.org/10.1111/j.1469-7793.2001.t01-1-00613.x>
2. Aagaard, P., Simonsen, E. B., Andersen, J. L., Magnusson, P., & Dyhre-Poulsen, P. (2002). Increased rate of force development and neural drive of human skeletal muscle following resistance training. *Journal of Applied Physiology*, *93*(4), 1318–1326. <https://doi.org/10.1152/jappphysiol.00283.2002>
3. Abe, T., Fukashiro, S., Harada, Y., & Kawamoto, K. (2001). Relationship between sprint performance and muscle fascicle length in female sprinters. *Journal of Physiological Anthropology and Applied Human Science*, *20*(2), 141–147. <https://doi.org/10.2114/jpa.20.141>
4. Abe, T., Yasuda, T., Midorikawa, T., Sato, Y., Kearns, C. F., Inoue, K., Koizumi, K., & Ishii, N. (2005). Skeletal muscle size and circulating IGF-1 are increased after two weeks of twice daily “KAATSU” resistance training. *International Journal of KAATSU Training Research*, *1*(1), 6–12. <https://doi.org/10.3806/ijktr.1.6>
5. Adeel, M., Chen, H.-C., Lin, B.-S., Lai, C.-H., Wu, C.-W., Kang, J.-H., Liou, J.-C., & Peng, C.-W. (2022). Oxygen consumption (VO₂) and surface electromyography (SEMG) during moderate-strength training exercises. *International Journal of Environmental Research and Public Health*, *19*(4). <https://doi.org/10.3390/ijerph19042233>
6. Ahtiainen, J. P., Pakarinen, A., Alen, M., Kraemer, W. J., & Häkkinen, K. (2005). Short vs. long rest period between the sets in hypertrophic resistance training: influence on muscle strength, size, and hormonal adaptations in trained men. *Journal of Strength and Conditioning Research*, *19*(3), 572–582. <https://doi.org/10.1519/15604.1>
7. Alegre, L. M., Ferri-Morales, A., Rodriguez-Casares, R., & Aguado, X. (2014). Effects of isometric training on the knee extensor moment–angle relationship and vastus lateralis muscle architecture. *European Journal of Applied Physiology*, *114*(11), 2437–2446. <https://doi.org/10.1007/s00421-014-2967-x>

8. Alegre, L. M., Jiménez, F., Gonzalo-Orden, J. M., Martín-Acero, R., & Aguado, X. (2006). Effects of dynamic resistance training on fascicle length and isometric strength. *Journal of Sports Sciences*, *24*(5), 501–508. <https://doi.org/10.1080/02640410500189322>
9. American College of Sports Medicine. (2009). American College of Sports Medicine position stand. Progression models in resistance training for healthy adults. *Medicine and Science in Sports and Exercise*, *41*(3), 687–708. <https://doi.org/10.1249/MSS.0b013e3181915670>
10. Anderson, K. G., & Behm, D. G. (2004). Maintenance of EMG activity and loss of force output with instability. *The Journal of Strength and Conditioning Research*, *18*(3), 637. [https://doi.org/10.1519/1533-4287\(2004\)18<637:MOEAAL>2.0.CO;2](https://doi.org/10.1519/1533-4287(2004)18<637:MOEAAL>2.0.CO;2)
11. Balshaw, T. G., Massey, G. J., Maden-Wilkinson, T. M., Morales-Artacho, A. J., McKeown, A., Appleby, C. L., & Folland, J. P. (2017). Changes in agonist neural drive, hypertrophy and pre-training strength all contribute to the individual strength gains after resistance training. *European Journal of Applied Physiology*, *117*(4), 631–640. <https://doi.org/10.1007/s00421-017-3560-x>
12. Barcelos, L. C., Nunes, P. R. P., de Souza, L. R. M. F., de Oliveira, A. A., Furlanetto, R., Marocolo, M., & Orsatti, F. L. (2015). Low-load resistance training promotes muscular adaptation regardless of vascular occlusion, load, or volume. *European Journal of Applied Physiology*, *115*(7), 1559–1568. <https://doi.org/10.1007/s00421-015-3141-9>
13. Baroni, B. M., Geremia, J. M., Rodrigues, R., De Azevedo Franke, R., Karamanidis, K., & Vaz, M. A. (2013). Muscle architecture adaptations to knee extensor eccentric training: Rectus femoris vs. vastus lateralis. *Muscle & Nerve*, *48*(4), 498–506. <https://doi.org/10.1002/mus.23785>
14. Bembien, D. A., Fethers, N. L., Bembien, M. G., Nabavi, N., & Koh, E. T. (2000). Musculoskeletal responses to high- and low-intensity resistance training in early postmenopausal women. *Medicine and Science in Sports and Exercise*, *32*(11), 1949–1957. <https://doi.org/10.1097/00005768-200011000-00020>
15. Biolo, G., Maggi, S. P., Williams, B. D., Tipton, K. D., & Wolfe, R. R. (1995). Increased rates of muscle protein turnover and amino acid transport after resistance exercise in humans. *The American Journal of Physiology*, *268*(3 Pt 1), E514–20. <https://doi.org/10.1152/ajpendo.1995.268.3.E514>

16. Blazevich, A. J. (2006). Effects of physical training and detraining, immobilisation, growth and aging on human fascicle geometry. *Sports Medicine*, 36(12), 1003–1017. <https://doi.org/10.2165/00007256-200636120-00002>
17. Blazevich, A. J., Cannavan, D., Coleman, D. R., & Horne, S. (2007). Influence of concentric and eccentric resistance training on architectural adaptation in human quadriceps muscles. *Journal of Applied Physiology*, 103(5), 1565–1575. <https://doi.org/10.1152/jappphysiol.00578.2007>
18. Blazevich, A. J., Gill, N. D., Bronks, R., & Newton, R. U. (2003). Training-specific muscle architecture adaptation after 5-wk training in athletes. *Medicine and Science in Sports and Exercise*, 35(12), 2013–2022. <https://doi.org/10.1249/01.MSS.0000099092.83611.20>
19. Blazevich, A. J., Gill, N. D., Deans, N., & Zhou, S. (2007). Lack of human muscle architectural adaptation after short-term strength training. *Muscle & Nerve*, 35(1), 78–86. <https://doi.org/10.1002/mus.20666>
20. Blazevich, A. J., Gill, N. D., & Zhou, S. (2006). Intra- and intermuscular variation in human quadriceps femoris architecture assessed in vivo. *Journal of Anatomy*, 209(3), 289–310. <https://doi.org/10.1111/j.1469-7580.2006.00619.x>
21. Buresh, R., Berg, K., & French, J. (2009). The Effect of Resistive Exercise Rest Interval on Hormonal Response, Strength, and Hypertrophy With Training. *Journal of Strength and Conditioning Research*, 23(1), 62–71. <https://doi.org/10.1519/JSC.0b013e318185f14a>
22. Campos, G., Luecke, T., Wendeln, H., Toma, K., Hagerman, F., Murray, T., Ragg, K., Ratamess, N., Kraemer, W., & Staron, R. (2002). Muscular adaptations in response to three different resistance-training regimens: specificity of repetition maximum training zones. *European Journal of Applied Physiology*, 88(1–2), 50–60. <https://doi.org/10.1007/s00421-002-0681-6>
23. Carey Smith, R., & Rutherford, O. M. (1995). The role of metabolites in strength training. *European Journal of Applied Physiology and Occupational Physiology*, 71(4), 332–336. <https://doi.org/10.1007/BF00240413>
24. Carvalho, L., Junior, R. M., Barreira, J., Schoenfeld, B. J., Orazem, J., & Barroso, R. (2022). Muscle hypertrophy and strength gains after resistance training with different

- volume-matched loads: a systematic review and meta-analysis. *Applied Physiology, Nutrition, and Metabolism*, 47(4), 357–368. <https://doi.org/10.1139/apnm-2021-0515>
25. Chilibeck, P. D., Calder, A. W., Sale, D. G., & Webber, C. E. (1998). A comparison of strength and muscle mass increases during resistance training in young women. *European Journal of Applied Physiology and Occupational Physiology*, 77(1–2), 170–175. <https://doi.org/10.1007/s004210050316>
 26. Chilibeck, P. D., Stride, D., Farthing, J. P., & Burke, D. G. (2004). Effect of creatine ingestion after exercise on muscle thickness in males and females. *Medicine and Science in Sports and Exercise*, 36(10), 1781–1788. <https://doi.org/10.1249/01.mss.0000142301.70419.c6>
 27. Cronin, N. J., & Lichtwark, G. (2013). The use of ultrasound to study muscle–tendon function in human posture and locomotion. *Gait & Posture*, 37(3), 305–312. <https://doi.org/10.1016/j.gaitpost.2012.07.024>
 28. De Salles, B. F., Polito, M. D., Goessler, K. F., Mannarino, P., Matta, T. T., & Simão, R. (2016). Effects of fixed vs. self-suggested rest between sets in upper and lower body exercises performance. *European Journal of Sport Science*, 16(8), 927–931. <https://doi.org/10.1080/17461391.2016.1161831>
 29. de Salles, B. F., Simão, R., Miranda, F., Novaes, J. da S., Lemos, A., & Willardson, J. M. (2009). Rest interval between sets in strength training. *Sports Medicine (Auckland, N.Z.)*, 39(9), 765–777. <https://doi.org/10.2165/11315230-000000000-00000>
 30. de Souza, T. P., Fleck, S. J., Simão, R., Dubas, J. P., Pereira, B., de Brito Pacheco, E. M., da Silva, A. C., & de Oliveira, P. R. (2010). Comparison between constant and decreasing rest intervals: influence on maximal strength and hypertrophy. *Journal of Strength and Conditioning Research*, 24(7), 1843–1850. <https://doi.org/10.1519/JSC.0b013e3181ddae4a>
 31. DeFreitas, J. M., Beck, T. W., Stock, M. S., Dillon, M. A., & Kasishke, P. R. (2011). An examination of the time course of training-induced skeletal muscle hypertrophy. *European Journal of Applied Physiology*, 111(11), 2785–2790. <https://doi.org/10.1007/s00421-011-1905-4>
 32. DeFreitas, J. M., Beck, T. W., Stock, M. S., Dillon, M. A., Sherk, V. D., Stout, J. R., & Cramer, J. T. (2010). A comparison of techniques for estimating training-induced

- changes in muscle cross-sectional area. *Journal of Strength and Conditioning Research*, 24(9), 2383–2389. <https://doi.org/10.1519/JSC.0b013e3181ec86f3>
33. Ebbeling, C. B., & Clarkson, P. M. (1989). Exercise-induced muscle damage and adaptation. *Sports Medicine (Auckland, N.Z.)*, 7(4), 207–234. <https://doi.org/10.2165/00007256-198907040-00001>
 34. Ema, R., Wakahara, T., Miyamoto, N., Kanehisa, H., & Kawakami, Y. (2013). Inhomogeneous architectural changes of the quadriceps femoris induced by resistance training. *European Journal of Applied Physiology*, 113(11), 2691–2703. <https://doi.org/10.1007/s00421-013-2700-1>
 35. Erlandson, M. C., Lorbergs, A. L., Mathur, S., & Cheung, A. M. (2016). Muscle analysis using pQCT, DXA and MRI. *European Journal of Radiology*, 85(8), 1505–1511. <https://doi.org/10.1016/j.ejrad.2016.03.001>
 36. Erskine, R. M., Jones, D. A., Maffulli, N., Williams, A. G., Stewart, C. E., & Degens, H. (2011). What causes in vivo muscle specific tension to increase following resistance training? *Experimental Physiology*, 96(2), 145–155. <https://doi.org/10.1113/expphysiol.2010.053975>
 37. Erskine, R. M., Jones, D. A., Williams, A. G., Stewart, C. E., & Degens, H. (2010). Inter-individual variability in the adaptation of human muscle specific tension to progressive resistance training. *European Journal of Applied Physiology*, 110(6), 1117–1125. <https://doi.org/10.1007/s00421-010-1601-9>
 38. Evans, W. J. (2002). Effects of exercise on senescent muscle. *Clinical Orthopaedics and Related Research*, 403, S211–S220. <https://doi.org/10.1097/00003086-200210001-00025>
 39. Faraji, H., Vatani, D. S., & Arazi, H. (2011). The effect of two rest intervals on the workout volume completed during lower body resistance exercise. *Kinesiology*, 43(1), 31–37.
 40. Fatouros, I. G., Kambas, A., Katrabasas, I., Leontsini, D., Chatzinikolaou, A., Jamurtas, A. Z., Douroudos, I., Aggelousis, N., & Taxildaris, K. (2006). Resistance training and detraining effects on flexibility performance in the elderly are intensity-dependent. *The Journal of Strength and Conditioning Research*, 20(3), 634. <https://doi.org/10.1519/R-17615.1>

41. Fatouros, I. G., Tournis, S., Leontsini, D., Jamurtas, A. Z., Sxina, M., Thomakos, P., Manousaki, M., Douroudos, I., Taxildaris, K., & Mitrakou, A. (2005). Leptin and adiponectin responses in overweight inactive elderly following resistance training and detraining are intensity related. *The Journal of Clinical Endocrinology & Metabolism*, *90*(11), 5970–5977. <https://doi.org/10.1210/jc.2005-0261>
42. Faul, F., Erdfelder, E., Lang, A.-G., & Buchner, A. (2007). G*Power 3: A flexible statistical power analysis program for the social, behavioral, and biomedical sciences. *Behavior Research Methods*, *39*(2), 175–191. <https://doi.org/10.3758/BF03193146>
43. Fink, J. E., Schoenfeld, B. J., Kikuchi, N., & Nakazato, K. (2017). Acute and long-term responses to different rest intervals in low-load resistance training. *International Journal of Sports Medicine*, *38*(2), 118–124. <https://doi.org/10.1055/s-0042-119204>
44. Folland, J. P., Irish, C. S., Roberts, J. C., Tarr, J. E., & Jones, D. A. (2002). Fatigue is not a necessary stimulus for strength gains during resistance training. *British Journal of Sports Medicine*, *36*(5), 370–373. <https://doi.org/10.1136/bjism.36.5.370>
45. Fonseca, R. M., Roschel, H., Tricoli, V., de Souza, E. O., Wilson, J. M., Laurentino, G. C., Aihara, A. Y., de Souza Leão, A. R., & Ugrinowitsch, C. (2014). Changes in exercises are more effective than in loading schemes to improve muscle strength. *Journal of Strength and Conditioning Research*, *28*(11), 3085–3092. <https://doi.org/10.1519/JSC.0000000000000539>
46. Franchi, M. V., Atherton, P. J., Maganaris, C. N., & Narici, M. V. (2016). Fascicle length does increase in response to longitudinal resistance training and in a contraction-mode specific manner. *SpringerPlus*, *5*(1), 94. <https://doi.org/10.1186/s40064-015-1548-8>
47. Franchi, M. V., Atherton, P. J., Reeves, N. D., Flück, M., Williams, J., Mitchell, W. K., Selby, A., Beltran Valls, R. M., & Narici, M. V. (2014). Architectural, functional and molecular responses to concentric and eccentric loading in human skeletal muscle. *Acta Physiologica*, *210*(3), 642–654. <https://doi.org/10.1111/apha.12225>
48. Franchi, M. v., Fitze, D. P., Raiteri, B. J., Hahn, D., & Spörri, J. (2019). Ultrasound-derived biceps femoris long head fascicle length: Extrapolation pitfalls. *Medicine and Science in Sports and Exercise*, *52*(1), 233–243. <https://doi.org/10.1249/MSS.00000000000002123>

49. Franchi, M. V., Longo, S., Mallinson, J., Quinlan, J. I., Taylor, T., Greenhaff, P. L., & Narici, M. V. (2018). Muscle thickness correlates to muscle cross-sectional area in the assessment of strength training-induced hypertrophy. *Scandinavian Journal of Medicine & Science in Sports*, 28(3), 846–853. <https://doi.org/10.1111/sms.12961>
50. Franchi, M. V., Raiteri, B. J., Longo, S., Sinha, S., Narici, M. V., & Csapo, R. (2018). Muscle architecture assessment: strengths, shortcomings and new frontiers of in vivo imaging techniques. *Ultrasound in Medicine & Biology*, 44(12), 2492–2504. <https://doi.org/10.1016/j.ultrasmedbio.2018.07.010>
51. Franchi, M. V., Reeves, N. D., & Narici, M. V. (2017). Skeletal muscle remodeling in response to eccentric vs. Concentric loading: morphological, molecular, and metabolic adaptations. *Frontiers in Physiology*, 8(JUL). <https://doi.org/10.3389/fphys.2017.00447>
52. Franchi, M. V., Ruoss, S., Valdivieso, P., Mitchell, K. W., Smith, K., Atherton, P. J., Narici, M. V., & Flück, M. (2018). Regional regulation of focal adhesion kinase after concentric and eccentric loading is related to remodelling of human skeletal muscle. *Acta Physiologica (Oxford, England)*, 223(3), e13056. <https://doi.org/10.1111/apha.13056>
53. Fukashiro, S., Itoh, M., Ichinose, Y., Kawakami, Y., & Fukunaga, T. (1995). Ultrasonography gives directly but noninvasively elastic characteristic of human tendon in vivo. *European Journal of Applied Physiology and Occupational Physiology*, 71(6), 555–557. <https://doi.org/10.1007/BF00238560>
54. Fukuda, T. Y., Melo, W. P., Zaffalon, B. M., Rossetto, F. M., Magalhães, E., Bryk, F. F., & Martin, R. L. (2012). Hip posterolateral musculature strengthening in sedentary women with patellofemoral pain syndrome: a randomized controlled clinical trial with 1-year follow-up. *The Journal of Orthopaedic and Sports Physical Therapy*, 42(10), 823–830. <https://doi.org/10.2519/jospt.2012.4184>
55. Fukuda, T. Y., Rossetto, F. M., Magalhães, E., Bryk, F. F., Lucareli, P. R. G., & de Almeida Aparecida Carvalho, N. (2010). Short-term effects of hip abductors and lateral rotators strengthening in females with patellofemoral pain syndrome: a randomized controlled clinical trial. *The Journal of Orthopaedic and Sports Physical Therapy*, 40(11), 736–742. <https://doi.org/10.2519/jospt.2010.3246>

56. Fukutani, A., & Kurihara, T. (2015). Comparison of the muscle fascicle length between resistance-trained and untrained individuals: cross-sectional observation. *SpringerPlus*, 4(1). <https://doi.org/10.1186/s40064-015-1133-1>
57. Gallagher, D., Kuznia, P., Heshka, S., Albu, J., Heymsfield, S. B., Goodpaster, B., Visser, M., & Harris, T. B. (2005). Adipose tissue in muscle: a novel depot similar in size to visceral adipose tissue. *The American Journal of Clinical Nutrition*, 81(4), 903–910. <https://doi.org/10.1093/ajcn/81.4.903>
58. Garber, C. E., Blissmer, B., Deschenes, M. R., Franklin, B. A., Lamonte, M. J., Lee, I.-M., Nieman, D. C., Swain, D. P., & American College of Sports Medicine. (2011). American College of Sports Medicine position stand. Quantity and quality of exercise for developing and maintaining cardiorespiratory, musculoskeletal, and neuromotor fitness in apparently healthy adults: guidance for prescribing exercise. *Medicine and Science in Sports and Exercise*, 43(7), 1334–1359. <https://doi.org/10.1249/MSS.0b013e318213febf>
59. Gasser, J. A. (1995). Assessing bone quantity by pQCT. *Bone*, 17(4 Suppl), 145S-154S. [https://doi.org/10.1016/8756-3282\(95\)00287-n](https://doi.org/10.1016/8756-3282(95)00287-n)
60. Gentil, P., Fisher, J., & Steele, J. (2017). A review of the acute effects and long-term adaptations of single- and multi-joint exercises during resistance training. *Sports Medicine (Auckland, N.Z.)*, 47(5), 843–855. <https://doi.org/10.1007/s40279-016-0627-5>
61. Gentil, P., Soares, S. R. S., Pereira, M. C., Cunha, R. R. da, Martorelli, S. S., Martorelli, A. S., & Bottaro, M. (2013). Effect of adding single-joint exercises to a multi-joint exercise resistance-training program on strength and hypertrophy in untrained subjects. *Applied Physiology, Nutrition, and Metabolism*, 38(3), 341–344. <https://doi.org/10.1139/apnm-2012-0176>
62. Giannakopoulos, K., Beneka, A., Malliou, P., & Godolias, G. (2004). Isolated vs. complex exercise in strengthening the rotator cuff muscle group. *Journal of Strength and Conditioning Research*, 18(1), 144–148. [https://doi.org/10.1519/1533-4287\(2004\)018<0144:ivceis>2.0.co;2](https://doi.org/10.1519/1533-4287(2004)018<0144:ivceis>2.0.co;2)
63. Goldspink, G. (1999). Changes in muscle mass and phenotype and the expression of autocrine and systemic growth factors by muscle in response to stretch and overload. *Journal of Anatomy*, 194 (Pt 3)(Pt 3), 323–334. <https://doi.org/10.1046/j.1469-7580.1999.19430323.x>

64. Gómez-López, M., Gallegos, A. G., & Extremera, A. B. (2010). Perceived barriers by university students in the practice of physical activities. *Journal of Sports Science & Medicine*, 9(3), 374–381. <http://www.ncbi.nlm.nih.gov/pubmed/24149629>
65. Gordon, S. E., Kraemer, W. J., Vos, N. H., Lynch, J. M., & Knuttgen, H. G. (1994). Effect of acid-base balance on the growth hormone response to acute high-intensity cycle exercise. *Journal of Applied Physiology*, 76(2), 821–829. <https://doi.org/10.1152/jappl.1994.76.2.821>
66. Graves, J. E., Pollock, M. L., Leggett, S. H., Braith, R. W., Carpenter, D. M., & Bishop, L. E. (1988). Effect of reduced training frequency on muscular strength. *International Journal of Sports Medicine*, 9(5), 316–319. <https://doi.org/10.1055/s-2007-1025031>
67. Grgic, J., Lazinica, B., Garofolini, A., Schoenfeld, B. J., Saner, N. J., & Mikulic, P. (2019). The effects of time of day-specific resistance training on adaptations in skeletal muscle hypertrophy and muscle strength: A systematic review and meta-analysis. *Chronobiology International*, 36(4), 449–460. <https://doi.org/10.1080/07420528.2019.1567524>
68. Grgic, J., Lazinica, B., Mikulic, P., Krieger, J. W., & Schoenfeld, B. J. (2017). The effects of short versus long inter-set rest intervals in resistance training on measures of muscle hypertrophy: A systematic review. *European Journal of Sport Science*, 17(8), 983–993. <https://doi.org/10.1080/17461391.2017.1340524>
69. Haff, G., Triplett, N. T., & National Strength & Conditioning Association (U.S.) (Eds.). (2008). *Essentials of strength training and conditioning* (Fourth Edition). Human Kinetics.
70. Häkkinen, K., Kallinen, M., Linnamo, V., Pastinen, U. M., Newton, R. U., & Kraemer, W. J. (1996). Neuromuscular adaptations during bilateral versus unilateral strength training in middle-aged and elderly men and women. *Acta Physiologica Scandinavica*, 158(1), 77–88. <https://doi.org/10.1046/j.1365-201X.1996.523293000.x>
71. Häkkinen, K., Komi, P. V., & Alén, M. (1985). Effect of explosive type strength training on isometric force- and relaxation-time, electromyographic and muscle fibre characteristics of leg extensor muscles. *Acta Physiologica Scandinavica*, 125(4), 587–600. <https://doi.org/10.1111/j.1748-1716.1985.tb07759.x>

72. Hansen, D., Dendale, P., van Loon, L. J. C., & Meeusen, R. (2010). The impact of training modalities on the clinical benefits of exercise intervention in patients with cardiovascular disease risk or type 2 diabetes mellitus. *Sports Medicine (Auckland, N.Z.)*, *40*(11), 921–940. <https://doi.org/10.2165/11535930-000000000-00000>
73. Hansen, S., Kvorning, T., Kjaer, M., & Sjøgaard, G. (2001). The effect of short-term strength training on human skeletal muscle: the importance of physiologically elevated hormone levels. *Scandinavian Journal of Medicine & Science in Sports*, *11*(6), 347–354. <https://doi.org/10.1034/j.1600-0838.2001.110606.x>
74. Haun, C. T., Vann, C. G., Roberts, B. M., Vigotsky, A. D., Schoenfeld, B. J., & Roberts, M. D. (2019). A critical evaluation of the biological construct skeletal muscle hypertrophy: size matters but so does the measurement. *Frontiers in Physiology*, *10*(MAR). <https://doi.org/10.3389/fphys.2019.00247>
75. Hay, J. G., Andrews, J. G., & Vaughan, C. L. (1983). Effects of lifting rate on elbow torques exerted during arm curl exercises. *Medicine and Science in Sports and Exercise*, *15*(1), 63–71. <http://www.ncbi.nlm.nih.gov/pubmed/6843322>
76. Hellerstein, M., & Evans, W. (2017). Recent advances for measurement of protein synthesis rates, use of the ‘Virtual Biopsy’ approach, and measurement of muscle mass. *Current Opinion in Clinical Nutrition & Metabolic Care*, *20*(3), 191–200. <https://doi.org/10.1097/MCO.0000000000000370>
77. Henselmans, M., & Schoenfeld, B. J. (2014). The effect of inter-set rest intervals on resistance exercise-induced muscle hypertrophy. *Sports Medicine*, *44*(12), 1635–1643. <https://doi.org/10.1007/s40279-014-0228-0>
78. Heymsfield, S. B., Adamek, M., Gonzalez, M. C., Jia, G., & Thomas, D. M. (2014). Assessing skeletal muscle mass: historical overview and state of the art. *Journal of Cachexia, Sarcopenia and Muscle*, *5*(1), 9–18. <https://doi.org/10.1007/s13539-014-0130-5>
79. Hickson, R. C., Hidaka, K., & Foster, C. (1994). Skeletal muscle fiber type, resistance training, and strength-related performance. *Medicine and Science in Sports and Exercise*, *26*(5), 593–598. <http://www.ncbi.nlm.nih.gov/pubmed/8007807>
80. Hill, M., & Goldspink, G. (2003). Expression and splicing of the insulin-like growth factor gene in rodent muscle is associated with muscle satellite (stem) cell activation

- following local tissue damage. *The Journal of Physiology*, 549(2), 409–418. <https://doi.org/10.1113/jphysiol.2002.035832>
81. Hill, A. V. (1949). The heat of activation and the heat of shortening in a muscle twitch. *Proceedings of the Royal Society of London. Series B - Biological Sciences*, 136(883), 195–211. <https://doi.org/10.1098/rspb.1949.0019>
82. Hill-Haas, S., Bishop, D., Dawson, B., Goodman, C., & Edge, J. (2007). Effects of rest interval during high-repetition resistance training on strength, aerobic fitness, and repeated-sprint ability. *Journal of Sports Sciences*, 25(6), 619–628. <https://doi.org/10.1080/02640410600874849>
83. Hillsdon, M., & Foster, C. (2018). What are the health benefits of muscle and bone strengthening and balance activities across life stages and specific health outcomes? *Journal of Frailty, Sarcopenia and Falls*, 3(2), 66–73. <https://doi.org/10.22540/JFSF-03-066>
84. Hopkins, W. G., Marshall, S. W., Batterham, A. M., & Hanin, J. (2009). Progressive statistics for studies in sports medicine and exercise science. *Medicine and Science in Sports and Exercise*, 41(1), 3–13. <https://doi.org/10.1249/MSS.0b013e31818cb278>
85. Hornberger, T. A., & Chien, S. (2006). Mechanical stimuli and nutrients regulate rapamycin-sensitive signaling through distinct mechanisms in skeletal muscle. *Journal of Cellular Biochemistry*, 97(6), 1207–1216. <https://doi.org/10.1002/jcb.20671>
86. Hortobagyi, T., Tunnel, D., Moody, J., Beam, S., & DeVita, P. (2001). Low- or high-intensity strength training partially restores impaired quadriceps force accuracy and steadiness in aged adults. *The Journals of Gerontology Series A: Biological Sciences and Medical Sciences*, 56(1), B38–B47. <https://doi.org/10.1093/gerona/56.1.B38>
87. Hounsfield, G. N. (1995). Computerized transverse axial scanning (tomography): Part I. Description of system. 1973. *The British Journal of Radiology*, 68(815), H166-72. <http://www.ncbi.nlm.nih.gov/pubmed/8542219>
88. Housh, D. J., Housh, T. J., Johnson, G. O., & Chu, W. K. (1992). Hypertrophic response to unilateral concentric isokinetic resistance training. *Journal of Applied Physiology (Bethesda, Md. : 1985)*, 73(1), 65–70. <https://doi.org/10.1152/jappl.1992.73.1.65>
89. Jenkins, N. D. M., Housh, T. J., Buckner, S. L., Bergstrom, H. C., Cochrane, K. C., Hill, E. C., Smith, C. M., Schmidt, R. J., Johnson, G. O., & Cramer, J. T. (2016).

Neuromuscular adaptations after 2 and 4 weeks of 80% versus 30% 1 repetition maximum resistance training to failure. *Journal of Strength and Conditioning Research*, 30(8), 2174–2185. <https://doi.org/10.1519/JSC.0000000000001308>

90. Jessee, M. B., Buckner, S. L., Mouser, J. G., Mattocks, K. T., Dankel, S. J., Abe, T., Bell, Z. W., Bentley, J. P., & Loenneke, J. P. (2018). Muscle adaptations to high-load training and very low-load training with and without blood flow restriction. *Frontiers in Physiology*, 9(OCT). <https://doi.org/10.3389/fphys.2018.01448>
91. Jones, D. A., & Rutherford, O. M. (1987). Human muscle strength training: the effects of three different regimens and the nature of the resultant changes. *The Journal of Physiology*, 391(1), 1–11. <https://doi.org/10.1113/jphysiol.1987.sp016721>
92. Jones, P., & Comfort, P. (2020). Strength and conditioning: scientific aspects including principles of rehabilitation. *A Comprehensive Guide to Sports Physiology and Injury Management*, 25–45. <https://doi.org/10.1016/B978-0-7020-7489-9.00004-1>
93. Kawakami, Y., Abe, T., & Fukunaga, T. (1993). Muscle-fiber pennation angles are greater in hypertrophied than in normal muscles. *Journal of Applied Physiology (Bethesda, Md. : 1985)*, 74(6), 2740–2744. <https://doi.org/10.1152/jappl.1993.74.6.2740>
94. Keeler, L. K., Finkelstein, L. H., Miller, W., & Fernhall, B. (2001). Early-phase adaptations of traditional-speed vs. superslow resistance training on strength and aerobic capacity in sedentary individuals. *Journal of Strength and Conditioning Research*, 15(3), 309–314. <http://www.ncbi.nlm.nih.gov/pubmed/11710656>
95. Keogh, J. W. L., Wilson, G. J., & Weatherby, R. P. (1999). A cross-sectional comparison of different resistance training techniques in the bench press. *Journal of Strength and Conditioning Research*, 13(3), 247–258.
96. Kephart, W. C., Wachs, T. D., Mac Thompson, R., Brooks Mobley, C., Fox, C. D., McDonald, J. R., Ferguson, B. S., Young, K. C., Nie, B., Martin, J. S., Company, J. M., Pascoe, D. D., Arnold, R. D., Moon, J. R., & Roberts, M. D. (2016). Ten weeks of branched-chain amino acid supplementation improves select performance and immunological variables in trained cyclists. *Amino Acids*, 48(3), 779–789. <https://doi.org/10.1007/s00726-015-2125-8>

97. Kjaer, M. (2004). Role of extracellular matrix in adaptation of tendon and skeletal muscle to mechanical loading. *Physiological Reviews*, 84(2), 649–698. <https://doi.org/10.1152/physrev.00031.2003>
98. Komi, P. V. (Ed.). (2003). *Strength and Power in Sport* (2nd ed.). Blackwell Science Ltd. <https://doi.org/10.1002/9780470757215>
99. Komi, P. V., Kaneko, M., & Aura, O. (1987). EMG activity of the leg extensor muscles with special reference to mechanical efficiency in concentric and eccentric exercise. *International Journal of Sports Medicine*, 8 Suppl 1(Suppl), 22–29. <https://doi.org/10.1055/s-2008-1025700>
100. Kraemer, W. J. (1983). Exercise prescription in weight training: manipulating program variables. *NSCA Journal*, 58–59.
101. Kraemer, W. J. (1997). A series of studies—the physiological basis for strength training in american football: fact over philosophy. *The Journal of Strength and Conditioning Research*, 11(3), 131. [https://doi.org/10.1519/1533-4287\(1997\)011<0131:ASOSTP>2.3.CO;2](https://doi.org/10.1519/1533-4287(1997)011<0131:ASOSTP>2.3.CO;2)
102. Kraemer, W. J., & Ratamess, N. A. (2004). Fundamentals of resistance training: progression and exercise prescription. *Medicine and Science in Sports and Exercise*, 36(4), 674–688. <https://doi.org/10.1249/01.mss.0000121945.36635.61>
103. Kraemer, W. J., Ratamess, N. A., & French, D. N. (2002). Resistance training for health and performance. *Current Sports Medicine Reports*, 1(3), 165–171. <https://doi.org/10.1249/00149619-200206000-00007>
104. Kraemer, W. J., Ratamess, N., Fry, A. C., Triplett-McBride, T., Koziris, L. P., Bauer, J. A., Lynch, J. M., & Fleck, S. J. (2000). Influence of resistance training volume and periodization on physiological and performance adaptations in collegiate women tennis players. *The American Journal of Sports Medicine*, 28(5), 626–633. <https://doi.org/10.1177/03635465000280050201>
105. Krieger, J. W. (2010). Single vs. multiple sets of resistance exercise for muscle hypertrophy: A meta-analysis. *Journal of Strength and Conditioning Research*, 24(4), 1150–1159. <https://doi.org/10.1519/JSC.0b013e3181d4d436>
106. Kubo, K., Ikebukuro, T., & Yata, H. (2021). Effects of 4, 8, and 12 Repetition Maximum Resistance Training Protocols on Muscle Volume and Strength. *Journal of Strength and*

<https://doi.org/10.1519/JSC.0000000000003575>

107. Kumagai, K., Abe, T., Brechue, W. F., Ryushi, T., Takano, S., & Mizuno, M. (2000). Sprint performance is related to muscle fascicle length in male 100-m sprinters. *Journal of Applied Physiology (Bethesda, Md. : 1985)*, 88(3), 811–816. <https://doi.org/10.1152/jappl.2000.88.3.811>
108. Kwah, L. K., Pinto, R. Z., Diong, J., & Herbert, R. D. (2013). Reliability and validity of ultrasound measurements of muscle fascicle length and pennation in humans: a systematic review. *Journal of Applied Physiology*, 114(6), 761–769. <https://doi.org/10.1152/jappphysiol.01430.2011>
109. Lasevicius, T., Schoenfeld, B. J., Silva-Batista, C., Barros, T. de S., Aihara, A. Y., Brendon, H., Longo, A. R., Tricoli, V., Peres, B. de A., & Teixeira, E. L. (2022). Muscle Failure Promotes Greater Muscle Hypertrophy in Low-Load but Not in High-Load Resistance Training. *Journal of Strength and Conditioning Research*, 36(2), 346–351. <https://doi.org/10.1519/JSC.0000000000003454>
110. Lasevicius, T., Ugrinowitsch, C., Schoenfeld, B. J., Roschel, H., Tavares, L. D., De Souza, E. O., Laurentino, G., & Tricoli, V. (2018). Effects of different intensities of resistance training with equated volume load on muscle strength and hypertrophy. *European Journal of Sport Science*, 18(6), 772–780. <https://doi.org/10.1080/17461391.2018.1450898>
111. LeBlanc, A., Lin, C., Shackelford, L., Sinitsyn, V., Evans, H., Belichenko, O., Schenkman, B., Kozlovskaya, I., Oganov, V., Bakulin, A., Hedrick, T., & Feedback, D. (2000). Muscle volume, MRI relaxation times (T2), and body composition after spaceflight. *Journal of Applied Physiology (Bethesda, Md. : 1985)*, 89(6), 2158–2164. <https://doi.org/10.1152/jappl.2000.89.6.2158>
112. Lieber, R. L., & Friden, J. (2000). Functional and clinical significance of skeletal muscle architecture. *Muscle & Nerve*, 23(11), 1647–1666. [https://doi.org/10.1002/1097-4598\(200011\)23:11<1647::AID-MUS1>3.0.CO;2-M](https://doi.org/10.1002/1097-4598(200011)23:11<1647::AID-MUS1>3.0.CO;2-M)
113. Lindstedt, S. L., McGlothlin, T., Percy, E., & Pifer, J. (1998). Task-specific design of skeletal muscle: balancing muscle structural composition. *Comparative Biochemistry and*

- Physiology. Part B, Biochemistry & Molecular Biology*, 120(1), 35–40.
[https://doi.org/10.1016/s0305-0491\(98\)00021-2](https://doi.org/10.1016/s0305-0491(98)00021-2)
114. Longo, A. R., Silva-Batista, C., Pedroso, K., De, V., Painelli, S., Lasevicius, T., Schoenfeld, B. J., André, A. A., Aihara, Y., De, B., Peres, A., Tricoli, V., & Teixeira, E. L. (2020). Volume load rather than resting interval influences muscle hypertrophy during high-intensity resistance training. *Journal of Strength and Conditioning Research*, 36(6), 1554–1559. www.nscs.com
115. Loon, L. J. C., Koopman, R., Stegen, J. H. C. H., Wagenmakers, A. J. M., Keizer, H. A., & Saris, W. H. M. (2003). Intramyocellular lipids form an important substrate source during moderate intensity exercise in endurance-trained males in a fasted state. *The Journal of Physiology*, 553(2), 611–625. <https://doi.org/10.1113/jphysiol.2003.052431>
116. Lopes, C. R., Aoki, M. S., Crisp, A. H., de Mattos, R. S., Lins, M. A., da Mota, G. R., Schoenfeld, B. J., & Marchetti, P. H. (2017). The effect of different resistance training load schemes on strength and body composition in trained men. *Journal of Human Kinetics*, 58(1), 177–186. <https://doi.org/10.1515/hukin-2017-0081>
117. MacInnis, M. J., McGlory, C., Gibala, M. J., & Phillips, S. M. (2017). Investigating human skeletal muscle physiology with unilateral exercise models: when one limb is more powerful than two. *Applied Physiology, Nutrition, and Metabolism = Physiologie Appliquée, Nutrition et Métabolisme*, 42(6), 563–570. <https://doi.org/10.1139/apnm-2016-0645>
118. Maden-Wilkinson, T. M., Balshaw, T. G., Massey, G. J., & Folland, J. P. (2020). What makes long-term resistance-trained individuals so strong? A comparison of skeletal muscle morphology, architecture, and joint mechanics. *Journal of Applied Physiology (Bethesda, Md. : 1985)*, 128(4), 1000–1011. www.physiology.org/journal/jappl
119. Maniar, N., Shield, A. J., Williams, M. D., Timmins, R. G., & Opar, D. A. (2016). Hamstring strength and flexibility after hamstring strain injury: a systematic review and meta-analysis. *British Journal of Sports Medicine*, 50(15), 909–920. <https://doi.org/10.1136/bjsports-2015-095311>
120. Marušič, J., Vatovec, R., Marković, G., & Šarabon, N. (2020). Effects of eccentric training at long-muscle length on architectural and functional characteristics of the

- hamstrings. *Scandinavian Journal of Medicine & Science in Sports*, 30(11), 2130–2142. <https://doi.org/10.1111/sms.13770>
121. Matta, T. T., Nascimento, F. X. M. B., Fernandes, I. A., & Oliveira, L. F. (2015). Heterogeneity of rectus femoris muscle architectural adaptations after two different 14-week resistance training programmes. *Clinical Physiology and Functional Imaging*, 35(3), 210–215. <https://doi.org/10.1111/cpf.12151>
122. Mazzetti, S. A., Kraemer, W. J., Volek, J. S., Duncan, N. D., Ratamess, N. A., Gómez, A. L., Newton, R. U., Häkkinen, K., & Fleck, S. J. (2000). The influence of direct supervision of resistance training on strength performance. *Medicine and Science in Sports and Exercise*, 32(6), 1175–1184. <https://doi.org/10.1097/00005768-200006000-00023>
123. McKendry, J., Pérez-López, A., McLeod, M., Luo, D., Dent, J. R., Smeuninx, B., Yu, J., Taylor, A. E., Philp, A., & Breen, L. (2016). Short inter-set rest blunts resistance exercise-induced increases in myofibrillar protein synthesis and intracellular signalling in young males. *Experimental Physiology*, 101(7), 866–882. <https://doi.org/10.1113/EP085647>
124. McMahon, G. E., Morse, C. I., Burden, A., Winwood, K., & Onambélé, G. L. (2014). Impact of range of motion during ecologically valid resistance training protocols on muscle size, Subcutaneous Fat, and Strength. *Journal of Strength and Conditioning Research*, 28(1), 245–255. <https://doi.org/10.1519/JSC.0b013e318297143a>
125. Methenitis, S. K., Zaras, N. D., Spengos, K. M., Stasinaki, A.-N. E., Karampatsos, G. P., Georgiadis, G. V., & Terzis, G. D. (2016). Role of muscle morphology in jumping, sprinting, and throwing performance in participants with different power training duration experience. *Journal of Strength and Conditioning Research*, 30(3), 807–817. <https://doi.org/10.1519/JSC.0000000000001147>
126. Mitchell, C. J., Churchward-Venne, T. A., West, D. W. D., Burd, N. A., Breen, L., Baker, S. K., & Phillips, S. M. (2012). Resistance exercise load does not determine training-mediated hypertrophic gains in young men. *Journal of Applied Physiology*, 113(1), 71–77. <https://doi.org/10.1152/jappphysiol.00307.2012>
127. Mookerjee, S., & Ratamess, N. (1999). Comparison of strength differences and joint action durations between full and partial range-of-motion bench press exercise. *The*

- Journal of Strength and Conditioning Research*, 13(1), 76. [https://doi.org/10.1519/1533-4287\(1999\)013<0076:COSDAJ>2.0.CO;2](https://doi.org/10.1519/1533-4287(1999)013<0076:COSDAJ>2.0.CO;2)
128. Moraes, M. R., Bacurau, R. F. P., Casarini, D. E., Jara, Z. P., Ronchi, F. A., Almeida, S. S., Higa, E. M. S., Pudo, M. A., Rosa, T. S., Haro, A. S., Barros, C. C., Pesquero, J. B., Würtele, M., & Araujo, R. C. (2012). Chronic conventional resistance exercise reduces blood pressure in stage 1 hypertensive men. *Journal of Strength and Conditioning Research*, 26(4), 1122–1129. <https://doi.org/10.1519/JSC.0b013e31822dfc5e>
129. Morrissey, M. C., Harman, E. A., Frykman, P. N., & Han, K. H. (1998). Early phase differential effects of slow and fast barbell squat training. *The American Journal of Sports Medicine*, 26(2), 221–230. <https://doi.org/10.1177/03635465980260021101>
130. Moss, B. M., Refsnes, P. E., Abildgaard, A., Nicolaysen, K., & Jensen, J. (1997). Effects of maximal effort strength training with different loads on dynamic strength, cross-sectional area, load-power and load-velocity relationships. *European Journal of Applied Physiology and Occupational Physiology*, 75(3), 193–199. <https://doi.org/10.1007/s004210050147>
131. Mulligan, S. E., Fleck, S. J., Gordon, S. E., Koziris, L. P., Triplett-McBride, N. T., & Kraemer, W. J. (1996). Influence of resistance exercise volume on serum growth hormone and cortisol concentrations in women. *The Journal of Strength and Conditioning Research*, 10(4), 256. [https://doi.org/10.1519/1533-4287\(1996\)010<0256:IOREVO>2.3.CO;2](https://doi.org/10.1519/1533-4287(1996)010<0256:IOREVO>2.3.CO;2)
132. Nana, A., Slater, G. J., Stewart, A. D., & Burke, L. M. (2015). Methodology review: using dual-energy X-ray absorptiometry (DXA) for the assessment of body composition in athletes and active people. *International Journal of Sport Nutrition and Exercise Metabolism*, 25(2), 198–215. <https://doi.org/10.1123/ijsnem.2013-0228>
133. Narici, M. (1999). Human skeletal muscle architecture studied in vivo by non-invasive imaging techniques: functional significance and applications. *Journal of Electromyography and Kinesiology*, 9(2), 97–103. [https://doi.org/10.1016/S1050-6411\(98\)00041-8](https://doi.org/10.1016/S1050-6411(98)00041-8)
134. Narici, M., Franchi, M., & Maganaris, C. (2016). Muscle structural assembly and functional consequences. *Journal of Experimental Biology*, 219(2), 276–284. <https://doi.org/10.1242/jeb.128017>

135. Narici, M. V., Binzoni, T., Hiltbrand, E., Fasel, J., Terrier, F., & Cerretelli, P. (1996). In vivo human gastrocnemius architecture with changing joint angle at rest and during graded isometric contraction. *The Journal of Physiology*, *496*(1), 287–297. <https://doi.org/10.1113/jphysiol.1996.sp021685>
136. Narici, M. V., Roi, G. S., Landoni, L., Minetti, A. E., & Cerretelli, P. (1989). Changes in force, cross-sectional area and neural activation during strength training and detraining of the human quadriceps. *European Journal of Applied Physiology and Occupational Physiology*, *59*(4), 310–319. <https://doi.org/10.1007/BF02388334>
137. Nasirzade, A., Ehsanbakhsh, A., Ilbeygi, S., Sobhkhiz, A., Argavani, H., & Aliakbari, M. (2014). Relationship between sprint performance of front crawl swimming and muscle fascicle length in young swimmers. *Journal of Sports Science & Medicine*, *13*(3), 550–556. <http://www.ncbi.nlm.nih.gov/pubmed/25177181>
138. Nimphius, S., McGuigan, M. R., & Newton, R. U. (2012). Changes in muscle architecture and performance during a competitive season in female softball players. *Journal of Strength and Conditioning Research*, *26*(10), 2655–2666. <https://doi.org/10.1519/JSC.0b013e318269f81e>
139. Nindl, B. C., Kraemer, W. J., Marx, J. O., Tuckow, A. P., & Hymer, W. C. (2003). Growth hormone molecular heterogeneity and exercise. *Exercise and Sport Sciences Reviews*, *31*(4), 161–166. <https://doi.org/10.1097/00003677-200310000-00002>
140. Noorkoiv, M., Nosaka, K., & Blazevich, A. J. (2010). Assessment of quadriceps muscle cross-sectional area by ultrasound extended-field-of-view imaging. *European Journal of Applied Physiology*, *109*(4), 631–639. <https://doi.org/10.1007/s00421-010-1402-1>
141. Noorkoiv, M., Nosaka, K., & Blazevich, A. J. (2014). Neuromuscular adaptations associated with knee joint angle-specific force change. *Medicine and Science in Sports and Exercise*, *46*(8), 1525–1537. <https://doi.org/10.1249/MSS.0000000000000269>
142. Noorkoiv, M., Stavnsbo, A., Aagaard, P., & Blazevich, A. J. (2010). In vivo assessment of muscle fascicle length by extended field-of-view ultrasonography. *Journal of Applied Physiology*, *109*(6), 1974–1979. <https://doi.org/10.1152/jappphysiol.00657.2010>
143. Ogasawara, R., Loenneke, J. P., Thiebaud, R. S., & Abe, T. (2013). Low-load bench press training to fatigue results in muscle hypertrophy similar to high-load bench press training.

International Journal of Clinical Medicine, 04(02), 114–121.
<https://doi.org/10.4236/ijcm.2013.42022>

144. Ogasawara, R., Thiebaud, R. S., Loenneke, J. P., Loftin, M., & Abe, T. (2012). Time course for arm and chest muscle thickness changes following bench press training. *Interventional Medicine & Applied Science*, 4(4), 217–220. <https://doi.org/10.1556/IMAS.4.2012.4.7>
145. Peterson, M. D., Rhea, M. R., & Alvar, B. A. (2004). Maximizing strength development in athletes: a meta-analysis to determine the dose-response relationship. *Journal of Strength and Conditioning Research*, 18(2), 377–382. <https://doi.org/10.1519/R-12842.1>
146. Phillips, S. M. (2000). Short-term training: when do repeated bouts of resistance exercise become training? *Canadian Journal of Applied Physiology = Revue Canadienne de Physiologie Appliquee*, 25(3), 185–193. <https://doi.org/10.1139/h00-014>
147. Phillips, S. M. (2014). A brief review of critical processes in exercise-induced muscular hypertrophy. *Sports Medicine*, 44(S1), 71–77. <https://doi.org/10.1007/s40279-014-0152-3>
148. Piirainen, J. M., Tanskanen, M., Nissilä, J., Kaarela, J., Väärälä, A., Sippola, N., & Linnamo, V. (2011). Effects of a heart rate-based recovery period on hormonal, neuromuscular, and aerobic performance responses during 7 weeks of strength training in men. *Journal of Strength and Conditioning Research*, 25(8), 2265–2273. <https://doi.org/10.1519/JSC.0b013e3181ecd050>
149. Pincivero, D. M., Lephart, S. M., & Karunakara, R. G. (1997). Effects of rest interval on isokinetic strength and functional performance after short-term high intensity training. *British Journal of Sports Medicine*, 31(3), 229–234. <https://doi.org/10.1136/bjism.31.3.229>
150. Ploutz, L. L., Tesch, P. A., Biro, R. L., & Dudley, G. A. (1994). Effect of resistance training on muscle use during exercise. *Journal of Applied Physiology (Bethesda, Md. : 1985)*, 76(4), 1675–1681. <https://doi.org/10.1152/jappl.1994.76.4.1675>
151. Pollock, M. L., Gaesser, G. A., Butcher, J. D., Despres, J.-P., Dishman, R. K., Franklin, B. A., & Garber, C. E. (1998). American College of Sports Medicine position stand. The recommended quantity and quality of exercise for developing and maintaining cardiorespiratory and muscular fitness, and flexibility in healthy adults. *Medicine and*

- Science in Sports and Exercise*, 30(6), 975–991. <https://doi.org/10.1097/00005768-199806000-00032>
152. Prado, C. M. M., & Heymsfield, S. B. (2014). Lean tissue imaging: a new era for nutritional assessment and intervention. *JPEN. Journal of Parenteral and Enteral Nutrition*, 38(8), 940–953. <https://doi.org/10.1177/0148607114550189>
153. Ratamess, N. A., Alvar, B. A., Evetoch, T. K., Houst, T. J., Kibler, W. B., Kraemer, W. J., & Triplett, N. T. (2009). Progression models in resistance training for healthy adults. *Medicine & Science in Sports & Exercise*, 41(3), 687–708. <https://doi.org/10.1249/MSS.0b013e3181915670>
154. Ratamess, N. A., Falvo, M. J., Mangine, G. T., Hoffman, J. R., Faigenbaum, A. D., & Kang, J. (2007). The effect of rest interval length on metabolic responses to the bench press exercise. *European Journal of Applied Physiology*, 100(1), 1–17. <https://doi.org/10.1007/s00421-007-0394-y>
155. Reeves, N. D., Maganaris, C. N., & Narici, M. V. (2004). Ultrasonographic assessment of human skeletal muscle size. *European Journal of Applied Physiology*, 91(1), 116–118. <https://doi.org/10.1007/s00421-003-0961-9>
156. Rhea, M. R., Alvar, B. A., Burkett, L. N., & Ball, S. D. (2003). A meta-analysis to determine the dose response for strength development. *Medicine and Science in Sports and Exercise*, 35(3), 456–464. <https://doi.org/10.1249/01.MSS.0000053727.63505.D4>
157. Robinson, J. M., Stone, M. H., Johnson, R. L., Penland, C. M., Warren, B. J., & Lewis, R. D. (1995). Effects of different weight training exercise/rest intervals on strength, power, and high intensity exercise endurance. *Journal of Strength and Conditioning Research*, 9(4), 216–221. <https://doi.org/10.1519/00124278-199511000-00002>
158. Ruiz-Cárdenas, J. D., Rodríguez-Juan, J. J., & Ríos-Díaz, J. (2018). Relationship between jumping abilities and skeletal muscle architecture of lower limbs in humans: Systematic review and meta-analysis. *Human Movement Science*, 58, 10–20. <https://doi.org/10.1016/j.humov.2018.01.005>
159. Russell, B., Motlagh, D., & Ashley, W. W. (2000). Form follows function: how muscle shape is regulated by work. *Journal of Applied Physiology (Bethesda, Md. : 1985)*, 88(3), 1127–1132. <https://doi.org/10.1152/jappl.2000.88.3.1127>

160. Rutherford, O. M., & Jones, D. A. (1986). The role of learning and coordination in strength training. *European Journal of Applied Physiology and Occupational Physiology*, 55(1), 100–105. <https://doi.org/10.1007/BF00422902>
161. Rutherford, O. M., & Jones, D. A. (1992). Measurement of fibre pennation using ultrasound in the human quadriceps in vivo. *European Journal of Applied Physiology and Occupational Physiology*, 65(5), 433–437. <https://doi.org/10.1007/BF00243510>
162. Sarto, F., Spörri, J., Fitze, D. P., Quinlan, J. I., Narici, M. V., & Franchi, M. V. (2021). Implementing ultrasound imaging for the assessment of muscle and tendon properties in elite sports: practical aspects, methodological considerations and future directions. *Sports Medicine*, 51(6), 1151–1170. <https://doi.org/10.1007/s40279-021-01436-7>
163. Scanlon, T. C., Fragala, M. S., Stout, J. R., Emerson, N. S., Beyer, K. S., Oliveira, L. P., & Hoffman, J. R. (2014). Muscle architecture and strength: Adaptations to short-term resistance training in older adults. *Muscle & Nerve*, 49(4), 584–592. <https://doi.org/10.1002/mus.23969>
164. Schäfer, B., Cai, A., Ruhl, T., & Beier, J. P. (2022). Skeletal muscle tissue engineering. In *Tissue Engineering Using Ceramics and Polymers* (pp. 519–553). Elsevier. <https://doi.org/10.1016/B978-0-12-820508-2.00015-5>
165. Schlumberger, A., Stec, J., & Schmidtbleicher, D. (2001). Single- vs. multiple-set strength training in women. *Journal of Strength and Conditioning Research*, 15(3), 284–289. <http://www.ncbi.nlm.nih.gov/pubmed/11710652>
166. Schoenfeld, B. J. (2010). The mechanisms of muscle hypertrophy and their application to resistance training. *Journal of Strength and Conditioning Research*, 24(10), 2857–2872. <https://doi.org/10.1519/JSC.0b013e3181e840f3>
167. Schoenfeld, B. J., Grgic, J., Ogborn, D., & Krieger, J. W. (2017). Strength and hypertrophy adaptations between low- vs. high-load resistance training: a systematic review and meta-analysis. *Journal of Strength and Conditioning Research*, 31(12), 3508–3523. <https://doi.org/10.1519/JSC.0000000000002200>
168. Schoenfeld, B. J., Ogborn, D., & Krieger, J. W. (2017). Dose-response relationship between weekly resistance training volume and increases in muscle mass: A systematic review and meta-analysis. *Journal of Sports Sciences*, 35(11), 1073–1082. <https://doi.org/10.1080/02640414.2016.1210197>

169. Schoenfeld, B. J., Peterson, M. D., Ogborn, D., Contreras, B., & Sonmez, G. T. (2015). Effects of low- vs. high-load resistance training on muscle strength and hypertrophy in well-trained men. In *Journal of Strength and Conditioning Research* (Vol. 29, Issue 10). <https://doi.org/10.1519/JSC.0000000000000958>
170. Schoenfeld, B. J., Pope, Z. K., Benik, F. M., Hester, G. M., Sellers, J., Nooner, J. L., Schnaiter, J. A., Bond-Williams, K. E., Carter, A. S., Ross, C. L., Just, B. L., Henselmans, M., & Krieger, J. W. (2016). Longer intersets enhance muscle strength and hypertrophy in resistance-trained men. *Journal of Strength and Conditioning Research*, 30(7), 1805–1812. <https://doi.org/10.1519/JSC.0000000000001272>
171. Schoenfeld, B. J., Ratamess, N. A., Peterson, M. D., Contreras, B., Sonmez, G. T., & Alvar, B. A. (2014). Effects of different volume-equated resistance training loading strategies on muscular adaptations in well-trained men. *Journal of Strength and Conditioning Research*, 28(10), 2909–2918. <https://doi.org/10.1519/JSC.0000000000000480>
172. Schoenfeld, B. J., Wilson, J. M., Lowery, R. P., & Krieger, J. W. (2016). Muscular adaptations in low- versus high-load resistance training: A meta-analysis. *European Journal of Sport Science*, 16(1), 1–10. <https://doi.org/10.1080/17461391.2014.989922>
173. Schott, J., McCully, K., & Rutherford, O. M. (1995). The role of metabolites in strength training. *European Journal of Applied Physiology and Occupational Physiology*, 71(4), 337–341. <https://doi.org/10.1007/BF00240414>
174. Scott, B. R., Duthie, G. M., Thornton, H. R., & Dascombe, B. J. (2016). Training monitoring for resistance exercise: theory and applications. *Sports Medicine (Auckland, N.Z.)*, 46(5), 687–698. <https://doi.org/10.1007/s40279-015-0454-0>
175. Scott, J. M., Martin, D. S., Ploutz-Snyder, R., Matz, T., Caine, T., Downs, M., Hackney, K., Buxton, R., Ryder, J. W., & Ploutz-Snyder, L. (2017). Panoramic ultrasound: a novel and valid tool for monitoring change in muscle mass. *Journal of Cachexia, Sarcopenia and Muscle*, 8(3), 475–481. <https://doi.org/10.1002/jcsm.12172>
176. Secomb, J. L., Lundgren, L. E., Farley, O. R. L., 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.
<https://doi.org/10.1519/JSC.0000000000000858>

177. Senna, G. W., Rodrigues, B. M., Sandy, D., Scudese, E., Bianco, A., & Dantas, E. H. M. (2017). Heavy vs light load single-joint exercise performance with different rest intervals. *Journal of Human Kinetics*, 58(1), 197–206. <https://doi.org/10.1515/hukin-2017-0077>
178. Seynnes, O. R., de Boer, M., & Narici, M. V. (2007). Early skeletal muscle hypertrophy and architectural changes in response to high-intensity resistance training. *Journal of Applied Physiology (Bethesda, Md. : 1985)*, 102(1), 368–373. <https://doi.org/10.1152/jappphysiol.00789.2006>
179. Seynnes, O. R., Kamandulis, S., Kairaitis, R., Helland, C., Campbell, E.-L., Brazaitis, M., Skurvydas, A., & Narici, M. V. (2013). Effect of androgenic-anabolic steroids and heavy strength training on patellar tendon morphological and mechanical properties. *Journal of Applied Physiology*, 115(1), 84–89. <https://doi.org/10.1152/jappphysiol.01417.2012>
180. Sforzo, G. A., & Touey, P. R. (1996). Manipulating exercise order affects muscular performance during a resistance exercise training session. *Journal of Strength and Conditioning Research*, 10(1), 20–24.
181. Sherk, V. D., Thiebaud, R. S., Chen, Z., Karabulut, M., Kim, S. J., & Bembien, D. A. (2014). Associations between pQCT-based fat and muscle area and density and DXA-based total and leg soft tissue mass in healthy women and men. *Journal of Musculoskeletal & Neuronal Interactions*, 14(4), 411–417. <http://www.ncbi.nlm.nih.gov/pubmed/25524966>
182. Shinohara, M., Kouzaki, M., Yoshihisa, T., & Fukunaga, T. (1997). Efficacy of tourniquet ischemia for strength training with low resistance. *European Journal of Applied Physiology and Occupational Physiology*, 77(1–2), 189–191. <https://doi.org/10.1007/s004210050319>
183. Smeulders, M. J. C., van den Berg, S., Oudeman, J., Nederveen, A. J., Kreulen, M., & Maas, M. (2010). Reliability of in vivo determination of forearm muscle volume using 3.0 T magnetic resonance imaging. *Journal of Magnetic Resonance Imaging*, 31(5), 1252–1255. <https://doi.org/10.1002/jmri.22153>
184. Souza-Junior, T. P., Willardson, J. M., Bloomer, R., Leite, R. D., Fleck, S. J., Oliveira, P. R., & Simão, R. (2011). Strength and hypertrophy responses to constant and decreasing

- rest intervals in trained men using creatine supplementation. *Journal of the International Society of Sports Nutrition*, 8(1). <https://doi.org/10.1186/1550-2783-8-17>
185. Stone, W. J., & Coulter, S. P. (1994). Strength/endurance effects from three resistance training protocols with women. *The Journal of Strength and Conditioning Research*, 8(4), 231. [https://doi.org/10.1519/1533-4287\(1994\)008<0231:SEEFTR>2.3.CO;2](https://doi.org/10.1519/1533-4287(1994)008<0231:SEEFTR>2.3.CO;2)
186. Suga, T., Okita, K., Morita, N., Yokota, T., Hirabayashi, K., Horiuchi, M., Takada, S., Takahashi, T., Omokawa, M., Kinugawa, S., & Tsutsui, H. (2009). Intramuscular metabolism during low-intensity resistance exercise with blood flow restriction. *Journal of Applied Physiology*, 106(4), 1119–1124. <https://doi.org/10.1152/jappphysiol.90368.2008>
187. Taaffe, D. R., Pruitt, L., Pyka, G., Guido, D., & Marcus, R. (1996). Comparative effects of high- and low-intensity resistance training on thigh muscle strength, fiber area, and tissue composition in elderly women. *Clinical Physiology*, 16(4), 381–392. <https://doi.org/10.1111/j.1475-097X.1996.tb00727.x>
188. Takarada, Y., Nakamura, Y., Aruga, S., Onda, T., Miyazaki, S., & Ishii, N. (2000). Rapid increase in plasma growth hormone after low-intensity resistance exercise with vascular occlusion. *Journal of Applied Physiology*, 88(1), 61–65. <https://doi.org/10.1152/jappl.2000.88.1.61>
189. Thoirs, K., & English, C. (2009). Ultrasound measures of muscle thickness: intra-examiner reliability and influence of body position. *Clinical Physiology and Functional Imaging*, 29(6), 440–446. <https://doi.org/10.1111/j.1475-097X.2009.00897.x>
190. Timmins, R. G., Bourne, M. N., Shield, A. J., Williams, M. D., Lorenzen, C., & Opar, D. A. (2016). Short biceps femoris fascicles and eccentric knee flexor weakness increase the risk of hamstring injury in elite football (soccer): a prospective cohort study. *British Journal of Sports Medicine*, 50(24), 1524–1535. <https://doi.org/10.1136/bjsports-2015-095362>
191. Toigo, M., & Boutellier, U. (2006). New fundamental resistance exercise determinants of molecular and cellular muscle adaptations. *European Journal of Applied Physiology*, 97(6), 643–663. <https://doi.org/10.1007/s00421-006-0238-1>
192. Ullrich, B., Holzinger, S., Soleimani, M., Pelzer, T., Stening, J., & Pfeiffer, M. (2015). Neuromuscular responses to 14 weeks of traditional and daily undulating resistance

- training. *International Journal of Sports Medicine*, 36(07), 554–562. <https://doi.org/10.1055/s-0034-1398529>
193. Vandenburg, H. H. (1987). Motion into mass: how does tension stimulate muscle growth? *Medicine and Science in Sports and Exercise*, 19(5 Suppl), S142-9. <http://www.ncbi.nlm.nih.gov/pubmed/3316913>
194. Verdijk, L. B., Gleeson, B. G., Jonkers, R. A. M., Meijer, K., Savelberg, H. H. C. M., Dendale, P., & van Loon, L. J. C. (2009). Skeletal muscle hypertrophy following resistance training is accompanied by a fiber type-specific increase in satellite cell content in elderly men. *The Journals of Gerontology. Series A, Biological Sciences and Medical Sciences*, 64(3), 332–339. <https://doi.org/10.1093/gerona/gln050>
195. Vierck, J., O'Reilly, B., Hossner, K., Antonio, J., Byrne, K., Bucci, L., & Dodson, M. (2000). Satellite cell regulation following myotrauma caused by resistance exercise. *Cell Biology International*, 24(5), 263–272. <https://doi.org/10.1006/cbir.2000.0499>
196. Villanueva, M. G., Lane, C. J., & Schroeder, E. T. (2015). Short rest interval lengths between sets optimally enhance body composition and performance with 8 weeks of strength resistance training in older men. *European Journal of Applied Physiology*, 115(2), 295–308. <https://doi.org/10.1007/s00421-014-3014-7>
197. Vincent, K. R., Braith, R. W., Feldman, R. A., Magyari, P. M., Cutler, R. B., Persin, S. A., Lennon, S. L., Md, A. H. G., & Lowenthal, D. T. (2002). Resistance exercise and physical performance in adults aged 60 to 83. *Journal of the American Geriatrics Society*, 50(6), 1100–1107. <https://doi.org/10.1046/j.1532-5415.2002.50267.x>
198. Vissing, K., Brink, M., Lønbro, S., Sørensen, H., Overgaard, K., Danborg, K., Mortensen, J., Elstrøm, O., Rosenhøj, N., Ringgaard, S., Andersen, J. L., & Aagaard, P. (2008). Muscle adaptations to plyometric vs. resistance training in untrained young men. *Journal of Strength and Conditioning Research*, 22(6), 1799–1810. <https://doi.org/10.1519/JSC.0b013e318185f673>
199. Vuk, S. (2022). *Osnove treninga s otporom*. Kineziološki fakultet Sveučilišta u Zagrebu.
200. Wakahara, T., Ema, R., Miyamoto, N., & Kawakami, Y. (2015). Increase in vastus lateralis aponeurosis width induced by resistance training: implications for a hypertrophic model of pennate muscle. *European Journal of Applied Physiology*, 115(2), 309–316. <https://doi.org/10.1007/s00421-014-3012-9>

201. Wakahara, T., Fukutani, A., Kawakami, Y., & Yanai, T. (2013). Nonuniform muscle hypertrophy: its relation to muscle activation in training session. *Medicine and Science in Sports and Exercise*, 45(11), 2158–2165. <https://doi.org/10.1249/MSS.0b013e3182995349>
202. Wakahara, T., Miyamoto, N., Sugisaki, N., Murata, K., Kanehisa, H., Kawakami, Y., Fukunaga, T., & Yanai, T. (2012). Association between regional differences in muscle activation in one session of resistance exercise and in muscle hypertrophy after resistance training. *European Journal of Applied Physiology*, 112(4), 1569–1576. <https://doi.org/10.1007/s00421-011-2121-y>
203. Wernbom, M., Augustsson, J., & Thome??, R. (2007). The influence of frequency, intensity, volume and mode of strength training on whole muscle cross-sectional area in humans. *Sports Medicine*, 37(3), 225–264. <https://doi.org/10.2165/00007256-200737030-00004>
204. West, D. W. D., Burd, N. A., Tang, J. E., Moore, D. R., Staples, A. W., Holwerda, A. M., Baker, S. K., & Phillips, S. M. (2010). Elevations in ostensibly anabolic hormones with resistance exercise enhance neither training-induced muscle hypertrophy nor strength of the elbow flexors. *Journal of Applied Physiology*, 108(1), 60–67. <https://doi.org/10.1152/jappphysiol.01147.2009>
205. Whittaker, J. L., Thompson, J. A., Teyhen, D. S., & Hodges, P. (2007). Rehabilitative ultrasound imaging of pelvic floor muscle function. *Journal of Orthopaedic & Sports Physical Therapy*, 37(8), 487–498. <https://doi.org/10.2519/jospt.2007.2548>
206. Willardson, J. M. (2006). A brief review: factors affecting the length of the rest interval between resistance exercise sets. *Journal of Strength and Conditioning Research*, 20(4), 978–984. <https://doi.org/10.1519/R-17995.1>
207. Zaroni, R. S., Brigatto, F. A., Schoenfeld, B. J., Braz, T. V., Benvenuti, J. C., Germano, M. D., Marchetti, P. H., Aoki, M. S., & Lopes, C. R. (2019). High resistance-training frequency enhances muscle thickness in resistance-trained men. *Journal of Strength and Conditioning Research*, 33(1), S140–S151. <https://doi.org/10.1519/JSC.0000000000002643>

8. ŽIVOTOPIS AUTORA I POPIS JAVNO OBJAVLJENIH RADOVA AUTORA

Bruno Damjan rođen je 13. lipnja 1995. godine u Čakovcu. Državljanin je Republike Hrvatske i po nacionalnosti Hrvat.

Nakon završene 1.Osnovne škole u Čakovcu upisuje opću gimnaziju „Josip Štolcer Slavenski“. Uz osnovnu i srednju školu paralelno niže uspjehe u sportu te osvaja mnogobrojna međunarodna i državna odličja u stolnom tenisu. Postaje i državni školski prvak u badmintonu s osnovnom i srednjom školom.

Nakon završene gimnazije, svoje školovanje nastavlja u Zagrebu te upisuje Kineziološki fakultet na kojem stječe titulu magistra kineziologije. Netom nakon završenog magisterija upisuje doktorski studij na istom fakultetu. Za vrijeme dokorskog studija sudjeluje u izvođenju nastave kao vanjski suradnik na predmetima Osnovne kineziološke transformacije i Fitness usmjerenju.

Uz nastavu te znanstvene aktivnosti u vidu sudjelovanja na konferencijama, pisanje i objavljivanje radova, paralelno završava neke od najprestižnijih edukacija u svijetu (Exos, DNS, CPPS...). Naučene znanstvene činjenice pretvara u praksu, aktivo se bavi fitnessom i kondicijskom pripremom sportaša. Radi individualno s mladim sportašima i natjecateljima najvišeg ranga. Na poziv, uključuje se i kao kondicijski trener u hrvatskoj košarkaškoj reprezentaciji u mlađim kategorijama. Sudjeluje na brojnim okupljanjima reprezentacija te s muškom u20 selekcijom 2022.g odrađuje pripreme i sudjeluje na europskom prvenstvo u Crnoj Gori kao glavni kondicijski trener. Također, odrađuje i sezonu u hrvatskoj košarkaškoj premijer ligi u ekipi Bosca kao kondicijski trener prve ekipe gdje Bosco postiže povijesni rezultat kluba ulaskom u play off. Sezonu 2023/2024 postaje glavni kondicijski trener seniorske A ekipe u košarkaškom klubu „Cibona“.

POPIS ZNANSTVENIH RADOVA

Vuk, S., Pentek, K., **Damjan, B.** (2023). The Effect of Concurrent Ankle and Hip Positions on Hamstring Function in Athletes. *Annals Applied Sport Science*, InPress(InPress): p-ISSN: 2476–4981. [10.52547/aassjournal.1232](https://doi.org/10.52547/aassjournal.1232)

Damjan, B. & Vuk, S. (2021). Kinematics and Kinetics of a Single Set Until Failure Using Magnesium Carbonate During Deadlift of Top-Level Powerlifters. In: Šalaj, S. & Škegro, D. (Eds.) Proceedings book of 9th International Scientific Conference on Kinesiology, 2021, Opatija, Croatia. Zagreb, Faculty of Kinesiology, University of Zagreb, pp. 112-115.

Čaprić, I., Stanković, M., Manić, M., Preljević, A., Špirtović, O., Đorđević, D., Spehnjak, M., **Damjan, B.**, Sporiš, G., & Trajković, N., Narici, M. (2022). Effects of plyometric training on agility male soccer players—a systematic review. *Journal of Men's Health*, 18(7), 147; <https://doi.org/10.31083/j.jomh1807147>

Cvikić, A., **Damjan, B.**, Čubrić, S. (2023). Kvalitativna analiza komunikacije na društvenim mrežama engleskih nogometnih klubova u doba pandemije koronavirusa. In: Leko., G. (Eds.) 31. Ljetna škola kineziologa Republike Hrvatske (95-99). Hrvatski kineziološki savez.

Sinković, F., **Damjan, B.**, Ivanković, M. (2023). Razlike u morfološkim i motoričkim parametrima između u-12 i u-14 kategorija tenisača. In: Leko., G. (Eds.) 31. Ljetna škola kineziologa Republike Hrvatske (716-720). Hrvatski kineziološki savez.

Prvčić, L., **Damjan, B.**, Ivanković, M. (2023). The Influence of Coordination Training on Specific Abilities and Knowledge of Youth Soccer Players. In: Uljević, O., Prlenda, N., & Foretić, N. (Eds.). (2023). *The proceeding book of 2nd International Conference on Science and Medicine in Aquatic Sports: Split, Croatia, 19th-22nd September 2023*. Split: University of Split, Faculty of Kinesiology, pp. 186-193.