Modeliranje transverzalnog i longitudinalnog odgovora medijalnog i lateralnog vastusa na električni impuls nakon postaktivacijske potencijacije

Abazović, Ensar

Doctoral thesis / Disertacija

2017

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

Permanent link / Trajna poveznica: https://urn.nsk.hr/urn:nbn:hr:221:294039

Rights / Prava: In copyright / Zaštićeno autorskim pravom.

Download date / Datum preuzimanja: **2024-03-29**

Repository / Repozitorij:

Repository of Faculty of Kinesiology, University of Split

KINEZIOLOŠKI FAKULTET

SVEUČILIŠTE U SPLITU

DOKTORSKI STUDIJ

Ensar Abazović

Modeliranje transverzalnog i longitudinalnog odgovora medijalnog i lateralnog vastusa na električni impuls nakon postaktivacijske potencijacije

DOKTORSKA DISERTACIJA

Mentor: prof. dr. sc. Jelena Paušić

Sumentor: prof. dr. sc. Boštjan Šimunič

SPLIT, 2017.

Dana 23. kolovoza 2017. godine Ensar Abazović **obranio** je doktorsku disertaciju pod naslovom:

MODELIRANJE TRANSVERZALNOG I LONGITUDINALNOG ODGOVORA MEDIJALNOG I LATERALNOG VASTUSA NA ELEKTRIČNI IMPULS NAKON POSTAKTIVACIJSKE POTENCIJACIJE

pod mentorstvom dr.sc. Jelene Paušić, redovnog profesora Kineziološkog fakulteta u Splitu

javnom obranom pred Stručnim povjerenstvom u sastavu:

1. dr.sc. Vladimir Ivančev, docent Kineziološkog fakulteta u Splitu, predsjednik
2. dr.sc. Boštjan Šimunič, izvanredni profesor Znanstveno-istraživačkog centra Univerziteta Primorska, član
3. dr.sc. Ana Poljičanin, docent Medicinskog fakulteta u Splitu, član
4. dr.sc. Igor Jelaska, docent Kineziološkog fakulteta u Splitu, član
5. dr.sc. Dražen Čular, izvanredni profesor Kineziološkog fakulteta u Splitu, član

Pozitivno izvješće Povjerenstva za ocjenu doktorske disertacije prihvaćeno na sjednici Fakultetskog vijeća održanoj dana 19. srpnja 2017. godine.

"Ej, Sulejmana othranila majka..."

Pero Zubac

Mojoj majci...

Iako sa mojim imenom na naslovnoj, ovaj doktorat ne bi nikada bio napisan bez pomoći ljudi kojima se ovim putem i zahvaljujem…

Profesoru Šimuniču, Senseiju, Znanstveniku i metodološkom Majstoru, ali, prije svega čovjeku, čovjeku od kojega sam naučio jako mnogo

Profesorici Paušić, tutoru, te kasnije i mentoru, čiji su mi savjeti i vodstvo pomogali tijekom cijelog doktorskog studija

Erolu, bez kojeg bi sve ovo bilo suhoparno… naše diskusije uvijek urode plodom, idejom, radom

Profesoru Kovaču, mom nesuđenom sumentoru, koji je tu bio u svim fazama doktorskog studija… upis… pa nadalje…

Arminu, čiji znanstveni apetiti idu dalje nego što će moji vjerojatno ikada… neočekivanom cimeru i prijatelju koji je uvijek imao vremena za konsultacije

Damiru, magu za Mac-om koji je nesebično pružao „savjetodavnu“ pomoć tijekom izrade ove disertacije

Svim ostalim profesorima i kolegama sa Fakulteta sporta u Sarajevu, Kineziološkog fakulteta u Splitu i Znanstveno-raziskovalnog središća u Kopru

I naravno…

Imeldi, mojoj vječnoj inspiraciji…

Sažetak:

Postaktivacijska potencijacija (PAP) se odnosi na svojstvo mišića koje se ogleda u akutnom povećanju mišićne jakosti kao rezultata prethodnih aktivnosti. Do sada ne postoji objavljena studija koja je imala za cilj ustanoviti akutne promjene kontraktilnih parametara jedne glave mišića, nastale uslijed PAP učinaka. Temeljni cilj ovog rada jest ustanoviti promjene kontraktilnih odgovora mišićā vastus medialis (VM) i vastus lateralis (VL) na jedan električni impuls (eng. twitch) nastale uslijed PAP učinka transverzalno, mjerenog TMG-om, i longitudinalno, mjerenog izometrijskim dinamometrom. Drugi cilj studije bio je usporediti rezultate, zabilježene pomoću ove dvije metode, te ustanoviti koja metoda daje bolji uvid u kontraktilne parametre ovih dvaju mišića. Treći cilj je ustanoviti povezanost veličine PAP učinaka i udjela brzokontraktilnih mišićnih vlakana u dva testirana mišića. U istraživanju je sudjelovalo 15 zdravih ispitanika (6M, 9Ž) bez zabilježenih povreda donjih ekstremiteta i s minimalno jednom godinom iskustva u treningu s vanjskim opterećenjem. Nakon dinamičkog zagrijavanja i petnaestominutnog odmora ispitanici su podvrgnuti inicijalnom testiranju. Nakon aktivacijskog podražaja (AP) koji je podrazumijevao pet petosekundnih maksimalnih voljnih izometrijskih kontrakcija, kontraktilni parametri VM i VL su mjereni longitudinalno i transverzalno u 7 post-AP vremenskih točki. Statistički značajni akutni učinci su primijećeni u svim varijablama kod VL. Učinci mjereni longitudinalnim i transverzalnim testiranjem su se također razlikovali. Transverzalno testiranje je pokazalo veću razinu osjetljivosti na PAP učinke. Statistički značajna povezanost između veličine PAP učinaka i izračunatog udjela brzokontraktilnih mišićnih vlakana je primijećena kod VM ali ne i kod VL. Dobiveni rezultati ukazuju da: 1) serija maksimalnih voljnih izometrijskih kontrakcija rezultira statistički značajnim PAP učincima na kontraktilne parametre koji su mjerljivi transverzalno, ali i longitudinalno, 2) transverzalni kontraktilni parametri daju uvid u više intrinzična svojstva mišića i 3) razina PAP-a je u direktnoj vezi sa stupnjem udjela brzokontraktilnih mišićnih vlakana kod VM, ali ne i kod VL.

Ključne riječi: postaktivacijska potencijacija, mehanika mišića, kontraktilni parametri, tenziomiografija, brzokontraktilna mišićna vlakna

Abstract:

Post-activation potentiation (PAP) refers to an acute increase in muscular strength as a result of previous activities. So far there are no published studies, which aimed to determine acute changes in contractile parameters of a single muscle caused by PAP effects. The primary aim of this paper was to determine PAP caused changes in *m.vastus medialis* (VM) and *m.vastus lateralis* (VL) longitudinal and transversal contractile parameters measured by a dynamometer and Tensiomyography (TMG), respectively. The second objective of this study was to compare the results of these two methods and to find out which method gives a better insight into the contractile parameters of these two muscles. The third objective was to establish the correlation between the PAP effect size and the proportion of fast-twitch muscle fibers in two tested muscles. 15 healthy subjects (6M, 9F) with no record of injuries in the lower extremities and with a minimum of one-year experience in resistance training participated in this study. After a dynamic warm-up and a fifteen-minute break, subjects were subjected to initial testing. After the activation stimulus, which consisted of five maximum voluntary isometric contractions, VM and VL contractile parameters were measured longitudinally and transversally in 7 post-PAP time points. Statistically significant acute effects were observed in all VL variables. Effects measured by longitudinal and transverse testing also differed. Transverse testing has shown a higher level of sensitivity to PAP effects. Statistically significant correlation between the PAP effect size and the calculated fast-twitch fibers proportion was observed in VM but not in VL. The results obtained indicate that: 1) a series of maximal voluntary isometric contractions results in statistically significant PAP effects on contractile parameters, measurable transversally and longitudinally, 2) transverse contractile parameters provide insight into intrinsic muscle properties and 3) PAP level is directly correlated with the degree of the proportion of fast-twitch muscle fibers in VM, but not in VL.

Keywords: post-activation potentiation, muscle mechanics, contractile parameters, tensiomyography, fast-twitch muscle fibers

Sadržaj:

1. UVOD I PROBLEM ... *5*
2. PREGLED DOSADAŠNJIH ISTRAŽIVANJA ... *13*
2.1. Tenziomiografija – TMG ... 13
2.2. Usporedba longitudinalnih i transverzalnih odgovora na elektrostimuliranu kontrakciju ... 15
2.3. Učinci postaktivacijske potencijacije ... 16
3. CILJEVI I HIPOTEZE ISTRAŽIVANJA ... *23*
4. METODE ... *26*
4.1. Ispitanici ... 26
4.2. Eksperimentalni protokol ... 26
4.3. Električne stimulacije ... 29
4.4. Mjerni instrumenti ... 30
4.5. Procjena kontraktilnih parametara ... 31
4.6. Statistička analiza ... 32
5. REZULTATI ... *34*
5.1. Učinci postaktivacijske potencijacije na longitudinalne kontraktilne parametre mišića ... 34
5.2. Razlike između longitudinalnih i transverzalnih kontraktilnih parametara ... 37
5.3. Povezanosti veličine postaktivacijskih učinaka tijekom transverzalnog mjerenja i udjela brzokontraktilnih mišićnih vlakana ... 38
5.4. Dekompozicija TMG signala ... 38
6. RASPRAVA ... *41*
6.1. Učinci postaktivacijske potencijacije na kontraktilne parametre mišića ... 41
6.1.1. Učinci postaktivacijske potencijacije na longitudinalne kontraktilne parametre mišića ... 42
6.1.1.1. Longitudinalni Dm ... 42
6.1.1.2. Longitudinalni Tc ... 46
6.1.1.3. Longitudinalni Tr ... 47
6.1.1.4. Longitudinalni Ts ... 48
6.1.2. Učinci postaktivacijske potencijacije na transverzalne kontraktilne parametre mišića ... 48
6.1.2.1. Transverzalni Dm ... 49
6.1.2.2. Transverzalni Tc ... 50
6.1.2.3. Transverzalni Tr ... 52
6.1.2.4. Transverzalni Ts ... 55
6.1.3. Pozadinski mehanizmi PAP učinaka ... 55
6.2. Razlike između longitudinalnih i transverzalnih kontraktilnih parametara ... 61
6.2.1. Razlike između longitudinalnog i transverzalnog Dm-a ... 64
6.2.2. Razlike između longitudinalnog i transverzalnog Tc-a ... 67
6.2.3. Razlike između longitudinalnog i transverzalnog Tr-a ... 69
6.2.4. Razlike između longitudinalnog i transverzalnog Ts-a ... 70
6.2.5. Pozadinski mehanizmi razlika između longitudinalnog i transverzalnog odgovora ... 70
6.3. Povezanosti veličine postaktivacijskih učinaka tijekom transverzalnog mjerenja i udjela brzokontraktilnih mišićnih vlakana ... 76
6.3.1. Dekompozicija TMG signala ... 79
7. OGRANIČENJA ISTRAŽIVANJA I SMJERNICE BUDUĆIH ISTRAŽIVANJA ... *83*
8. ZAKLJUČAK ... *84*
9. LITERATURA ... *85*
10. POPIS SLIKA ... *108*
ŽIVOTOPIS AUTORA ... *109*

1. UVOD I PROBLEM

Poboljšanje sportske izvedbe, kako kronično tako i akutno, primarni je cilj svakog sportaša i njegova trenera. S obzirom na to, rad istraživača i praktičara u kineziologiji usmjeren ka poboljšanju sportske izvedbe rezultira neprekidnim osmišljanjem novih trenažnih metoda, ali i podražaja koji imaju akutni učinak na sam rezultat. Jedna od takvih metoda, koja rezultira akutnim poboljšanjem sposobnosti mišića za generiranje maksimalne mišićne sile, ali i eksplozivne izvedbe, podrazumijeva primjenu maksimalnih i/ili submaksimalnih opterećenja prije samog izvođenja određene aktivnosti. Naime, ovom prilikom se učinkom postaktivacijske potencijacije (PAP), koji može trajati od nekoliko sekundi do nekoliko minuta, akutno podiže razina izvedbe određene aktivnosti.

Moglo bi se reći da su Verkhoshansky i Tatyan (1973) dali najjednostavniji opis postaktivacijske potencijacije kroz rečenicu: „Kada nakon 3–5 RM opterećenja izvodite eksplozivne vježbe, za središnji živčani sustav to je kao podizanje posude s vodom do pola pune, u trenutku kada pretpostavljate da je ona u potpunosti napunjena".

Mnogobrojna istraživanja pokazala su da maksimalne ili submaksimalne kontrakcije mišića akutno povećavaju njegovu sposobnost kontrakcije (Scott & Doherty, 2004; Wilson i sur., 2013). Ovaj fenomen poznat je kao postaktivacijska potencijacija (PAP), a odnosi se na stanje u kojem su karakteristike mišićne izvedbe izrazito pojačane, kao rezultat njihove „kontrakcijske povijesti" (Hodgson i sur., 2005; Robbins, 2005). Ukoliko se PAP na odgovarajući način implementira u trening snage, može se povećati ukupni volumen treninga (Robbins, 2005; Docherty & Hodgson, 2007). Također, njegova uporaba prije natjecanja mogla bi poboljšati eksplozivnu učinkovitost u gibanjima kao što su skokovi, bacanja i sprint (Güllich i Schmidtbleicher, 1996).

Iako je fenomen postaktivacijske potencijacije u stručnoj i znanstvenoj literaturi prisutan od ranih sedamdesetih godina prošlog stoljeća (Verkhoshansky i Tatyan, 1973) te je opravdanost njegove uporabe neupitna, optimalni i jedinstveni parametri za pojedine sportske aktivnosti nisu ustanovljeni. Također, mada postoje razna mišljenja o metodama implementacije PAP-a, u nedavnim preglednim člancima i metaanalizama mogu se naći parametri koji su se u prethodnoj literaturi pokazali kao najučinkovitiji – tip i intenzitet kontrakcije, broj serija i ponavljanja, stanka između „aktivacijske kontrakcije" i motoričke izvedbe. Tako na primjer, Wilson i suradnici (2013) u svojoj metaanalizi navode da su učinci PAP-a veći nakon uporabe više setova

(za razliku od jednog) te da je optimalno vrijeme izvedbe eksplozivne aktivnosti 3–7 minuta u odnosu na manje od 2 i više od 7 minuta.

Uz to, čimbenici koji utječu na razinu postaktivacije jesu: 1) starost ispitanika (Baudry i sur., 2005), 2) stupanj utreniranosti (Chiu i sur., 2003; Wilson i sur., 2013), 3) tip sporta kojim se sportaš bavi (Pääsuke i sur., 2007), 4) maksimalna jakost (Seitz i sur., 2014), 5) omjer brzokontraktilnih i sporokontraktilnih mišićnih vlakana (Hamada i sur., 2000a) i 6) tip kontrakcija (Ye i sur., 2015).

Kada su u pitanju prethodno navedeni čimbenici, razlozi su sljedeći: 1) S procesom starenja se značajno smanjuje brzina kontrakcije, ali pored toga dolazi i do smanjenja potencijala za nastajanje PAP učinaka, što je rezultat morfoloških promjena mišića koje se javljaju sa starenjem (Petrella i sur., 1989); 2) Stupanj utreniranosti direktno utječe na balans između dvaju ključnih procesa povezanih s PAP-om i to, na način da, uslijed povećane otpornosti na lokalni mišićni zamor (Kendrick i sur., 2008; Miyamoto i sur., 2013), koja se povećava s duljinom iskustva u treningu direktno se povećavaju PAP učinci (Sale, 2002; Wilson i sur., 2013); 3) Tip sporta kojim se sportaš bavi determinira koje mišiće sportaš dominantno koristi tijekom treninga i natjecanja. Tako, na primjer, kompariraući dugoprugaše i triatlonce, Hamada i suradnici (2000b) su primijetili sličnu razinu PAP učinaka na donjim ekstremitetima, dok je kod gornjih ekstremiteta PAP učinak kod triatlonaca bio veći od onog kod dugoprugaša; 4) Pored toga što su osobe s većom razinom maksimalne jakosti, vrlo vjerojatno, na višem stupnju utreniranosti, Tillin i Bishop (2009) navode da oni imaju veći udio brzokontraktilnih vlakana u mišićima te stoga i generiraju veći PAP učinak jer 5) brzokontraktilna mišićna vlakna posjeduju veću sposobnost fosforilacije regulatornih lakih lanaca miozina (više dalje u tekstu) te samim time i veću razinu PAP učinaka (Houston i Grange, 1991; Chiu i sur., 2003; Jo i sur., 2009; Ruben i sur., 2010).

S obzirom na to da se u današnjim istraživanjima od svega navedenog najveća raznolikost, a naročito kada su u pitanju donji ekstremiteti, može naći u šestom tipu aktivacijskih kontrakcija (podražaja), bitno je navesti da su prethodni autori istraživali učinke PAP-a nakon: različitih tipova skokova sa i bez opterećenja (Masamoto i sur., 2003; Faigenbaum i sur., 2006), pliometrijskih vježbi na trenažerima (Tsolakis i sur., 2011), izvođenja vježbi s vanjskim opterećenjem (Kilduff i sur., 2007; Boullosa i sur., 2013; Fukutani i sur., 2014; Chiu i sur., 2003; Naclerio i sur., 2015), implementacije vibracijskog stimulusa (Jordan i sur., 2010; Naclerio i sur., 2014), maksimalne voljne izometrijske kontrakcije (Gago i sur., 2014a, b;

French i sur., 2003; Baudry i Duchateau, 2004; Lim i sur., 2013), elektrostimulirane/tetaničke kontrakcije (Requena i sur., 2008), koncentričnih (Batista i sur., 2007) i ekscentričnih izokinetičkih kontrakcija (Ye i sur., 2015).

Iako Wilson i suradnici (2013) u svojoj metaanalizi nisu primijetili statistički značajne razlike između veličine učinaka dinamičkih i statičkih aktivacijskih podražaja/protokola te Naclerio i suradnici (2015) ukazuju na različite PAP učinke nakon različitih aktivacijskih podražaja, Babault i suradnici (2003), Monazzami i suradnici (2015) i Rixon i suradnici (2007) navode da statički rezultiraju većim učincima od dinamičkih, dok su Gago i suradnici (2014a, b) primijetili oprečne rezultate, Baudry i Duchateau (2004) su ipak došli do konkretnog zaključka da, ukoliko se radi o kontrakciji/ama maksimalnog intenziteta, ne postoji razlika između veličine PAP učinaka u odnosu na tip voljnog aktivacijskog podražaja.

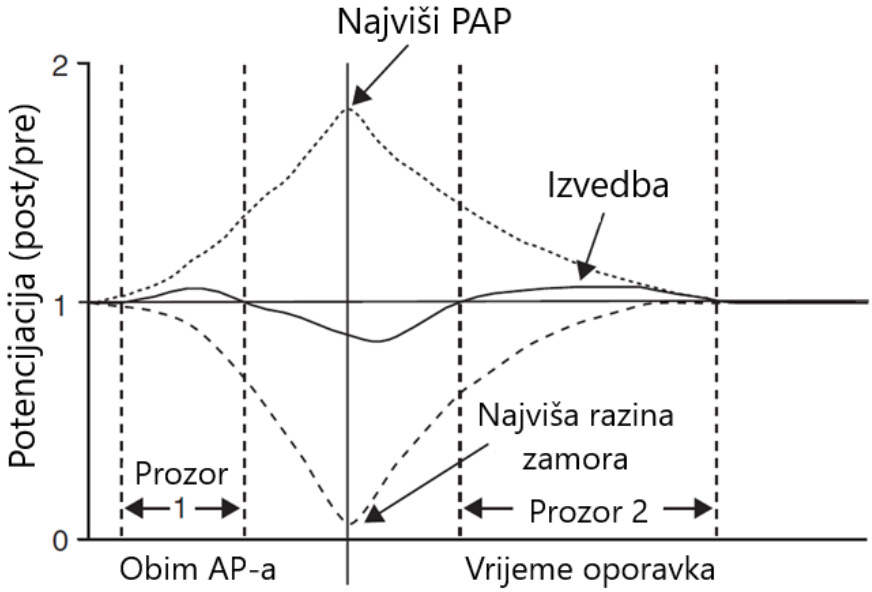
Moglo bi se reći da je primjena maksimalne izometrijske kontrakcije (ili više njih), s obzirom na to da se učinci ne razlikuju od dinamičkih protokola, najjednostavnija metoda aktivacije muskulature ukoliko je cilj procjena PAP učinaka zbog činjenice da je za njenu realizaciju neophodna jednostavnija oprema te je, pored toga broj čimbenika koje je neophodno kontrolirati (amplituda pokreta, brzina kontrakcije i sl.) manji od onog prilikom dinamičkih kontrakcija (Cheng i Rice, 2005). Dodatni razlog za uporabu kontrakcija maksimalnog intenziteta se može naći u studiji Vandervoort i suradnika (1983) koji navode da voljne kontrakcije ispod 75% MVC-a rezultiraju neznatnim, pa čak i izostankom PAP učinaka.

Važno je napomenuti da se prilikom uporabe protokola koji podrazumijevaju kontrakcije maksimalnog intenziteta posebna pažnja mora usmjeriti na određivanje obima samog aktivacijskog protokola. Naime, Hill i suradnici (2001), Klass i suradnici (2004) i Lanza i suradnici (2003) su primijetili nepotpuni akutni oporavak sposobnosti generiranja izometrijske sile, te samim time i izostanak PAP učinaka, nakon dugotrajnih dinamičkih protokola.

Uz činjenicu da kontraktilna povijest mišića ili mišićne skupine ima izuzetno značajan akutni učinak na motoričku izvedbu te iste mišićne skupine (Kilduff i sur., 2007) vrijedi navesti i da vježbe maksimalnog ili submaksimalnog intenziteta nakon izvođenja pored toga što mogu povećati (Baker, 2003; Baker i Newton, 2005; Chiu i sur., 2003; Clark i sur., 2006; French i sur., 2003; Smilios i sur., 2005; Smith i sur., 2001; Young i sur., 1998), ipak mogu i smanjiti (Ebben i sur., 2000; Gossen i Sale, 2000; Jensen i Ebben, 2003; Jones i Lees, 2003; Requena i

sur., 2005; Robbins i Docherty, 2005; Scott i Docherty, 2004) razinu izvedbe određenih motoričkih zadataka eksplozivnog karaktera.

Uz optimalne parametare podražaja, u potpunosti nisu istraženi ni pozadinski mehanizmi. Osnova koja se spominje kroz manje više sva istraživanja vezana za PAP jest učinak „kontraktilne povijesti". Kako navode Hodgson i suradnici (2005), uz umor, kao najočitiji učinak maksimalne ili submaksimalne mišićne kontrakcije, koji se manifestira kroz smanjenu sposobnost generiranja sile (Edwards i sur., 1977; Green i Jones, 1989), koegzistira i PAP koji za cilj ima poboljšanje mišićne izvedbe, osobito brzinskih i eksplozivnih motoričkih zadataka. Prema navedenim autorima, motorička izvedba nakon aktivacije predstavlja ravnotežu između dvaju procesa – onog koji generira umor i onog koji generira PAP (slika 1). Optimalni trenutak za izvedbu određenog motoričkog zadatka jest onaj u kojem se razina akutnog umora značajno umanji (ili čak nestane), dok sama potencijacija još uvijek postoji. Uz to, predložena su tri primarna mehanizma koja rezultiraju PAP-om. Ti primarni pozadinski mehanizmi jesu: (1) povećana fosforilacija miozinskog lakog lanca, (2) povećana aktivacija motornih jedinica višeg reda i (3) promjena kuta mišićnih vlakana (eng. *pennation*) (Tillin i Bishop, 2009).

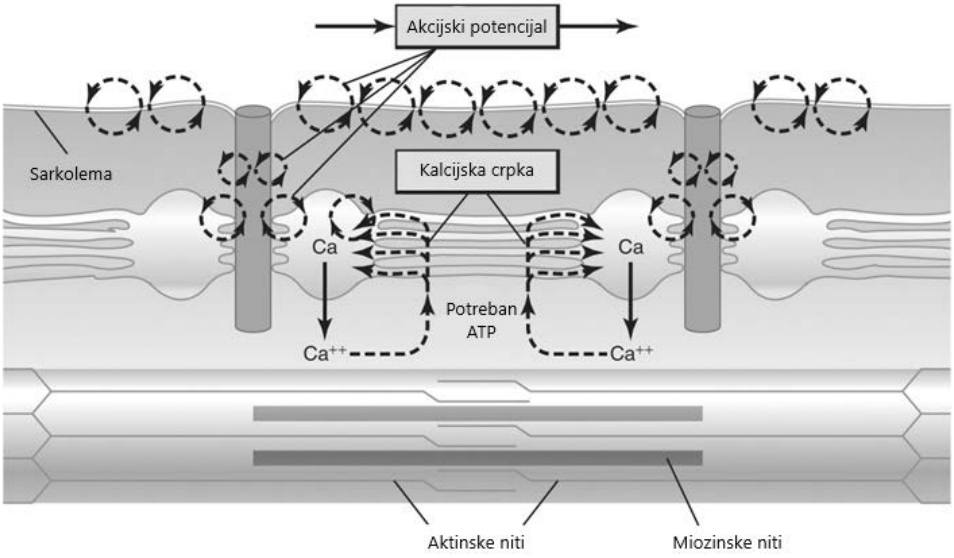


Slika 1. Hipotetski model veze između PAP-a i zamora nakon aktivacijskog protokola (preuzeto iz: Tillin i Bishop, 2009)

Većina autora smatra da je koegzistencija upravo ovih triju mehanizama osnovni razlog poboljšanja mišićne izvedbe nakon različitih tipova aktivacije. Međutim, izuzetno je bitno naglasiti da je PAP fiziološki živčano-mišićni nasljedni potencijal koji je prisutan kod svih osoba bez obzira na stupanj izvedbe ili utreniranosti (Batista i sur., 2011) te se on, kako to većina autora i navodi (Tillin i Bishop, 2009; Hodgson i sur., 2005; Szczesna i sur., 2002),

javlja na mišićnoj razini, a kao osnovni razlog amplifikacije funkcije mišića spominje se fosforilacija regulatornih lakih lanaca miozina.

U osnovi, poticanje i tijek mišićne kontrakcije se pojavljuju sljedećim redoslijedom (Hall, 2015): 1) akcijski potencijal putuje uzduž motoričkog živca do njegovih završetaka na mišićnim vlaknima; 2) na svakom završetku živac luči malu količinu neurotransmitorske tvari acetilkolina; 3) acetilkolin lokalno djeluje na membranu mišićnog vlakna te otvara brojne kanale regulirane acetilkolinom, što se protežu kroz bjelančevinske molekule, koje plutaju u membrani; 4) otvaranje kanala reguliranih acetilkolinom omogućuje difuziju velikih količina natrijevih iona u unutrašnjost membrane mišićnog vlakna, što potiče stvaranje akcijskog potencijala na membrani; 5) akcijski potencijal putuje uzduž membrane mišićnog vlakna na isti način kao i uzduž membrane živčanog vlakna; 6) akcijski potencijal depolarizira mišićnu membranu, a veliki dio električne struje akcijskog potencijala prolazi središtem mišićnog vlakna, čime se iz sarkoplazmatske mrežice oslobađa velika količina kalcijevih iona koji su bili pohranjeni unutar mrežice; 7) kalcijevi ioni potiču privlačne sile između aktinskih i miozinskih niti, što uzrokuje njihovo međusobno klizanje (kontraktilni proces); 8) poslije djelića sekunde membranska kalcijska crpka vraća kalcijeve ione u sarkoplazmatsku mrežicu, gdje oni ostaju pohranjeni do novog akcijskog potencijala. To uklanjanje kalcijevih iona iz miofibrila odgovorno je za završetak mišićne kontrakcije. Kada je u pitanju učinak fosforilacije, ona rezultira povećanom Ca^{2+} osjetljivosti filamenata na ATP te samim tim i potencijalno amplificira količinu generirane sile.



Slika 2. Sprega potraživanja i kontrakcije mišića. Vidi se (1) akcijski potencijal koji uzrokuje oslobađanje kalcijevih iona iz sarkoplazmatske mrežice i (2) njihovo vraćanje kalcijskom crpkom (preuzeto iz: Hall, 2015)

Kada je u pitanju sama procjena razine PAP-a, autori su, kako je ranije navedeno, rabili različite metode te su u tu svrhu korišteni različiti tipovi kontrakcija. Međutim, iako je u prethodnim istraživanjima potencijacija primarno izazivana voljnim kontrakcijama, u njima je primijećeno povećanje maksimalne snage te brzine razvoja sile tijekom kasnijih voljnih, ali i elektrostimuliranih kontrakcija (Tillin i Bishop, 2009).

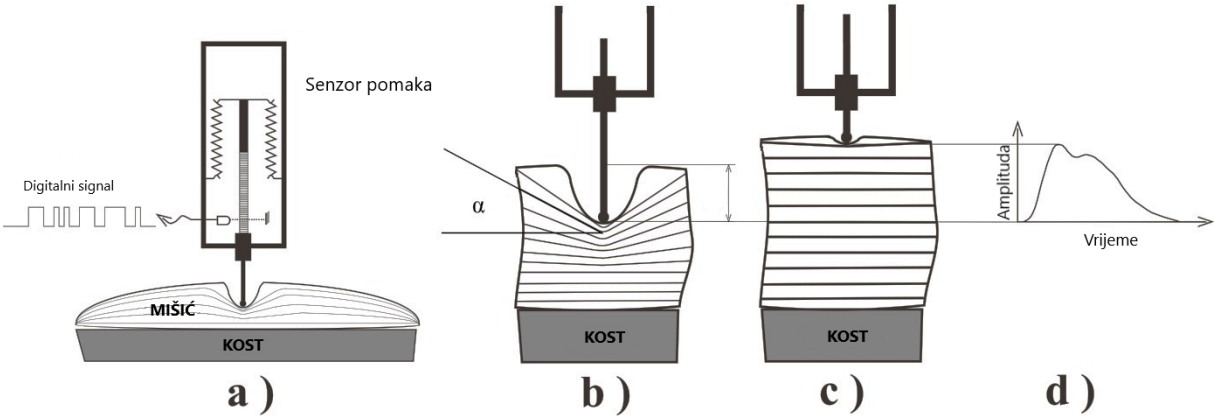
Osim što poboljšava mišićnu izvedbu, PAP je i važan fiziološki proces koji utječe na većinu kontraktilnih svojstava mišića. Općenito, kontraktilna svojstva skeletnih mišića su proučavana u različite svrhe i uglavnom pomoću procjene snage ili obrtnog momenta za vrijeme jednog električnog impulsa (eng. *twitch torque response*), ali u novijoj literaturi procjenjivana su i nakon maksimalnih voljnih kontrakcija. Tako su, na primjer, Hamada i suradnici (2000a, b) i Fukutani i suradnici (2014a, b) procjenjivali najveći obrtni moment sile generiran uslijed jednog električnog impulsa nakon PAP-a.

Uz prethodno spomenute autore, koji su procjenjivali kontraktilna svojstva mišića pomoću dinamometra (Hamada i sur., 2000a, b), miometra (Fukutani i sur., 2014a, b), obrtnog momenta sile (Pääsuke i sur., 2007) i izvedbe funkcionalnih testova (Naclerio i sur., 2014; Buttifant i Hrysomallis, 2015), u nedavnom istraživanju García-Manso i suradnici (2012) su primijetili akutne PAP učinke na mišić *biceps brachii* nakon dva različita protokola vježbanja s vanjskim opterećenjem uz pomoć tenziomiografije (TMG).

TMG je, kao metoda za procjenu kontraktilnih svojstava mišića, predstavljena 1990. godine (Valenčić, 1990). U dosadašnjim istraživanjima korištena je u različite svrhe, primjerice za procjenu atrofije mišića *gluteus maximus* kod osoba s natkoljeničnom amputacije (Burger i sur., 1996), za procjenu otpornosti na nastanak lokalnog mišićnog zamora kod osoba s dijagnosticiranim paralitičkim poliomijelitisom (Grabljevec i sur., 2005), za proučavanje lokalnog mišićnog zamora kod triatlonaca (García-Manso i sur., 2011a), kontraktilnih parametara mišića kod dijabetičara s polineuropatijom (Rusu i sur., 2009), svojstava mišića *erector spinae* kod djece (Pišot i sur., 2003), mišićne atrofije nakon 35-dnevne simulacije bestežinskog stanja – ležanja u krevetu (Pišot i sur., 2008), učinaka niske temperature na kontraktilna svojstva mišića (García-Manso i sur., 2011b).

TMG, kao metoda za procjenu kontraktilnih svojstava skeletnih mišića (Valenčić i Knez, 1997) koja mjeri transverzalni odgovor mišića (Slika 3) (zadebljanje trbuha mišića, bočne vibracije mišićnih vlakana) veoma je slična nekim mehanomiografskim metodama. Međutim, razlika

između ove i prethodnih metoda leži prvenstveno u tehnici procjene (vidi Šimunič, 2012) koja omogućuje neinvazivnu, selektivnu i izravnu procjenu svake glave mišića posebno, što za rezultat ima visok omjer signala i šuma te s tom visokom osjetljivošću predstavlja metodu procjene intrinzičnih kontraktilnih svojstava mišića. Važno je napomenuti da ova neinvazivna metoda ne procjenjuje voljnu, nego elektrostimuliranu (izazvanu) kontrakciju te se stoga može rabiti za procjenu disbalansa između različitih mišićnih skupina tijekom provođenja trenažnih, ali i rehabilitacijskih protokola (Rusu i sur., 2013).



Slika 3. Pricip TMG metoda: linearni senzor pomaka (a) se podesi na opušten mišić (b) čiji se trbuh zadeblja tijekom elektrostimulacije te vertikalno potisne senzor pomaka (c) i izmjeri mehanički odgovor na električnu stimulaciju (d). (Preuzeto iz Šimunič i sur., 2010)

Vjerojatno najvažnija spoznaja vezana za TMG može se naći u istraživanju koje su proveli Šimunič i suradnici (2011), koji su pomoću linearne regresije (eq. 1) demonstrirali visok koeficijent korelacije (0,933) između linearne kombinacije triju tenziomiografskih parametara i teškog lanca miozina.

$$\text{eq 1.} \quad MHC1[\%] = 2{,}829 \times Tc + 2{,}980 \times Td + 0{,}127 \times Tr - 121{,}023$$

MHC1 – Teški lanac miozina; Tc – vrijeme kontrakcije; Td – vrijeme odgode odgovora; Tr – vrijeme polurelaksacije

Zadovoljavajuće razine pouzdanosti i valjanosti ove metode procjene kontraktilnih svojstava mišića potvrđene su u više navrata (Dahmane i sur., 2001, 2005; Križaj i sur., 2008; Tous-Fajardo i sur., 2010; Ditroilo i sur., 2011; Šimunič i sur., 2010).

Za razliku od potencijacije obrtnog momenta tijekom elektrostimuliranih kontrakcija, koja je dokazana u nekoliko navrata (Gossen i Sale, 2000; Pääsuke i sur., 2000; Hamada i sur., 2000a, b; Vandervoort i sur., 1983), dosadašnjoj literaturi ne postoje istraživanja koja bi dala dodatne informacije o promjeni kontraktilnih svojstava mišića nakon PAP-a, ali tako ni onih koja bi

proučavala kontraktilna svojstva mišića vezana za PAP (općenito) pomoću TMG-a. Međutim, mogu se naći neke studije u kojima su *in vivo* komparirani tenziomiografski i dinamometrijski pokazatelji kontraktilnih parametara. To su studije Šimuniča i suradnikā (2010) i Koren i suradnikā (2015). Vrijedi spomenuti da je, pored tih dviju studija, Šimunič (2003) u svojoj disertaciji komparirao amplitudu mišićnog odgovora, mjerenu tenziomiografijom, i silu, mjerenu dinamometrijom, elektrostimulirane kontrakcije kod ljudi (*in vivo*) i životinja (žabe) (*in vitro*).

Na osnovu studija koje su za cilj imale komparaciju longitudinalnog i transverzalnog mišićnog odgovora na elektrostimulaciju može se primijetiti da se rezultati navedenih dvaju tipova testiranja statistički značajno razlikuju. Temeljni razlog, kako to navode Šimunič (2010) te Koren i suradnici (2015) jest činjenica da TMG daje uvid u više intrinzična svojstva mišića i da je je ova metoda procjene kontraktilnih parametara selektivna jer mjeri isključivo kontraktilne parametre testirane glave mišića, dok na dinamometrijsko testiranje utječu i okolne strukture.

2. PREGLED DOSADAŠNJIH ISTRAŽIVANJA

S obzirom na kompleksnost i obujam dosadašnjih istraživanja, istraživanja vezana za metode evaluacije kontraktilnih svojstava mišića bit će predstavljena u tekstualnom dijelu, dok će istraživanja u kojima su ispitivani učinci postaktivacijske potencijacije na različite aktivnosti biti predstavljena tabelarno u posljednjem potpoglavlju ovog poglavlja.

2.1. Tenziomiografija – TMG

Tous-Fajardu i suradnicima (2010) cilj je bio ustanoviti pouzdanost TMG mjerenja kontraktilnih parametara mišića *vastus medialis* između dva različita mjeritelja, ali i učinak udaljenosti između elektroda na rezultate TMG testiranja. Pet kontraktilnih parametara mišića *vastus medialis* procijenjivano je kod 18 ispitanika pomoću TMG-a. Na temelju rezultata, ovi autori su zaključili da četiri parametra imaju dobru ili odličnu pouzdanost, dok Tr nije pokazao zadovoljavajuću razinu pouzdanosti. Promjena pozicija elektroda imala je značajan učinak na Dm te pokazala trend k smanjenoj razini statističke značajnosti za sve ostale parametre. Ovi rezultati opravdavaju upotrebu tenziomiografije u svrhu procjene kontraktilnih parametara mišića *vastus medialis*, a posebno Dm i Tc. Također, autori preporučuju izbjegavanje kvantifikacije Tr-a te promjene pozicija elektroda za vrijeme višestrukih TMG testiranja.

Šimunič (2012) je za cilj imao ustanoviti pouzdanost TMG testiranja ponovljeno u više navrata (dana) na tri skeletna mišića. Kroz tri dana mišići *vastus lateralis*, *vastus medialis* i *biceps femoris* testirani su kod deset zdravih muških dobrovoljaca. Četiri vremenske mjere i maksimalna amplituda ekstrahirani su pri svakom TMG testiranju. Analiza pouzdanosti provedena je s izračunima slučajnih pogrešaka, koeficijenta varijacije (CV), standardne pogreške mjerenja i interklasnog koeficijenta korelacije (ICC) s pouzdanošću od 95%. ICC je pokazao izvrsne rezultate (>0,94 kod 14 od 15 parametara – 5 parametara svakog mišića). Tr je imao niži CV, i to vjerojatno zbog specifičnosti parametra. Ovi podaci pokazuju da su za tri testirana mišića TMG parametri ponovljivi i pouzdani tijekom više uzastopnih dana testiranja.

Alvarez-Diaz i suradnici (2016) su za cilj imali ustanoviti razlikuju li se TMG parametri donjih ekstremiteta između dominantne i nedominantne strane tijela. U studiji u kojoj je sudjelovalo 38 nogometaša bilateralno su evaluirani mišići *vastus medialis*, *vastus lateralis*, *rectus femoris*, *semitendinosus*, *biceps femoris*, *gastrocnemius medialis* i *gastrocnemius lateralis*. U većini parametara nisu primjećene statistički značajne razlike između dominantne i nedominantne

strane tijela, što je autore dovelo do zaključka da u TMG studijama nije neophodno evaluirati obje strane tijela ukoliko za to ne postoji opravdan razlog.

Žagar i Križaj (2005) su u svojoj studiji validirali TMG uređaj u svrhu mjerenja bočnih oscilacija mišića. Cilj im je bio procijeniti točnost i preciznost TMG akcelerometra. S obzirom na veličinu relativne greške mjerenja koja je primijećena za sve kontraktilne parametre (-2,4% - 1%) autori su zaključili da je TMG akcelerometar pogodan za procjenu bočnih oscilacija trbuha mišića. Važno je napomenuti da su ovi autori najveću gršku mjerenja primijetili kod Tr-a te je ona u ovom slučaju iznosila -2,4%.

Šimunič i suradnici (2011) su u svojoj studiji za cilj imali evaluaciju stupnja povezanosti kontraktilnih pametara (primarno Td, Tc i Tr) TMG testiranja i udjela teških lanaca miozina (%MHC-I) mišića *vastus lateralis*, utvrđenim mišićnom biopsijom kod 27 ispitanika (43±18 god). Sva tri parametra su statistički značajno korelirala (Td – 0,61; Tc – 0.88; Tr – 0,67) sa %MHC-I te su, isti parametri, uključeni u višestruku linearnu regresiju rezultirali većim koeficijentom korelacije (R=9,3). Na osnovu ovih rezultata autori su zaključili da se vremenski parametri elektrostimulirane mišićne kontrakcije, mjereni TMG-om, mogu rabiti kao neinvazivni prediktor %MHC-I u mišiću.

Križaj i suradnici (2008) su u svojoj studiji procjenjivali ponovljivost (u kratkom vremenskom periodu) pet TMG kontraktilnih parametara mišića *biceps brachii* kod 13 ispitanika. Svi rezultati su pokazali zadavoljavajuću razinu ponovljivosti s ICC-om u rasponu od 0,86–0,98 i normaliziranom pogreškom u rasponu od 0,43–1,93. I u ovoj studiji je primijećen najniži ICC (i najviša greška) kod Tr-a.

Dahmane i suradnici (2005) su u svojoj studiji evaluirali varijabilnost u distribuciji različitih tipova mišićnih vlakana 9 mišića (*biceps brachii*, *triceps brachii*, *brachioratialis*, *flexor digitorum superficialis*, *extensor digitorum*, *biceps femoris*, *tibialis anterior*, *gastrocnemius medialis*, *soleus*) pomoću biopsije (skupina 1 – *postmortem*) i TMG-a (skupina 2). Primijetili su da mišićna vlakna tipa IIb dominiraju u gornjim dijelovima, dok tip I mišićnih vlakana dominira dublje u mišiću. Kontraktilni parametri su potom evaluirani uz uporabu dvaju različitih električnih stimulusa (10% i 50% maksimalne stimulacije – MS). U oba slučaja je primijećen statistički značajan koeficijent korelacije (Pearson) između Tc-a i procenta mišićnih vlakana tipa I i to r=0,76 ($p<0,01$) kod 10% MS i r=0,9 ($p<0,001$) kod 50% MS. Ovi nalazi

ukazuju na to da TMG Tc može biti koristan parametar za neinvazivnu procjenu prostorne distribucije različitih tipova mišićnih vlakana kod ljudi.

Ditroilo i suradnici (2013) su evaluirali konzistentnost TMG parametara mjerenih u različitim stanjima mišića *gastrocnemius medialis* kod 21 ispitanika, i to: tijekom odmora, nakon zagrijavanja, nakon MVC-a i nakon generiranog lokalnog mišićnog zamora. Svi parametri izuzev Tr-a su pokazali zadovoljavajuću razinu pouzdanosti (Dm – CV 8–14,8 i ICC 0,86–0,95; Td – CV 7–9,2 i ICC 0,56–0,62; Tc – CV 3,8–9,4 i ICC 0,62–0,92; Ts – CV 5,3–8,2 i ICC 0,71–0,86; Tr – CV 27,8–32,7 i ICC 0,67–0,82). Nadalje, razina pouzdanosti se kod svih parametara povećavala s povećanjem predefiniranih, kontroliranih stanja mišića.

García-Manso i suradnici (2012) su u svojoj studiji ustanovili da TMG može procijeniti razinu lokalnog mišićnog zamora izazvanu dvama različitim protokolima (visokoobimni i visokointenzivni) kod 16 zdravih muškaraca (25,1 ± 2,6). Kontraktilni parametri mišića *biceps brachii* mijenjali su se u zavisnosti od djelovanja potencijacije i zamora te su najveće statistički značajne promjene primijećene kod Dm, Ts, Tr i Vc (brzina kontrakcije). Iako su se promjene u kontraktilnim parametrima kretale u istom smjeru, razlike nisu bile identične, što ukazuje na činjenicu da TMG uređaj posjeduje sposobnost evaluacije razine lokalnog mišićnog zamora.

2.2. Usporedba longitudinalnih i transverzalnih odgovora na elektrostimuliranu kontrakciju

Šimunič i suradnici (2010) procijenili su i objasnili kontraktilna svojstva mišića – kao što su vrijeme odgode (Td – *delay time*), vrijeme kontrakcije (Tc – *contraction time*), vrijeme polurelaksacije (Tr – *half relaxation time*), vrijeme održanja sile (Ts – *sustain time*) i maksimalne amplitude (Dm) – ekstrahirana iz transverzalnog odgovora i usporedili ih s obrtnim momentom sile (longitudinalni odgovor) elektrostimulirane kontrakcije. Izometrijske transverzalne i longitudinalne karakteristike elektrostimulirane mišićne kontrakcije (*twitch*) zabilježene su istovremeno tijekom jednog perkutanog električnog impulsa mišića *biceps brachii* kod 15 zdravih muškaraca. Rezultati ukazuju na to da postoji parabolična relacija između Dm-a transverzalnog i longitudinalnog odgovora. Vrijednost Tc-a nije bila statistički značajno povezana između transverzalnog i longitudinalnog mjerenja. Statistički značajna korelacija primijećena je između longitudinalnog Tc-a i vremena javljanja drugog vrha u transverzalnom odgovoru ($r=0,83$; $p<0,001$). Autori su zaključili da različiti mehanizmi utječu na longitudinalni i transverzalni odgovor skeletnih mišića na električnu stimulaciju te da

parametri transverzalnog odgovora daju dodatne informacije o kontraktilnim svojstvima skeletnih mišića.

Koren i suradnici (2015) usporedili su kontraktilna svojstva ekstrahirana iz transverzalnog odgovora s obrtnim momentom sile (longitudinalni odgovor) elektrostimulirane kontrakcije mišića *vastus lateralis*. Svih pet parametara (Td, Tc, Ts, Tr i Dm) za vrijeme elektrostimulirane kontrakcije izmjereno je kod 19 zdravih muškaraca. Rezultati su pokazali kraći Td (Δ= -23,4%; $p<0,001$) i Tc (Δ= -42,7%; $p<0,001$) kod transverzalnog te kraći Tr (Δ= -26,2%; $p=0,025$) kod longitudinalnog odgovora na električni impuls, dok se ostali parametri nisu značajno razlikovali. Pored toga, važno je navesti da ova skupina autora nije primijetila statistički značajnu korelaciju između longitudinalnog i transverzalnog Td-a i Tc-a mišićnog odgovora na električnu stimulaciju. U skladu s navedenim, autori su zaključili da TMG i obrtni moment sile daju različite informacije te odražavaju različite mehanizme koji utječu na transverzalni i longitudinalni odgovor na električni impuls. Kontraktilni parametri transverzalnog odgovora daju uvid u intrinzična kontraktilna svojstva skeletnih mišića.

2.3. Učinci postaktivacijske potencijacije

S obzirom na kompleksnost i količinu literature u kojoj su predstavljeni učinci postaktivacijske potencijacije na naknadne aktivnosti ona je predstavljena tabelarno (tablica 1.) u nastavku.

Tablica 1. Učinci postaktivacijske potencijacije na različite aktivnosti u dosadašnjim istraživanjima

Autor i godina	Uzorak	Aktivacija		Postaktivacijska potencijacija				
		Tip aktivnosti	Karakteristike	Mjerni sustav	Vremenske točke	Učinci		
Behm i sur. (2004)	1 skupina 3 mjerenja 9 M 24,2±7,2 god.	ekstenzija koljena	1×MVIC/10s 2×MVIC/10s 3×MVIC/10s	EMS Pt	1, 5, 10, 15 min	5–17,5%* 1–21,1%* 5–55,6%*; 10–54,1%*; 15–53,1%*		
Pääsuke i sur. (2007)	3 skupine 1 sportovi snage (12 Ž) 2 sportovi izdržljivosti (12 Ž) 3 netrenirani (12 Ž)	ekstenzija koljena	MVIC/10s	EMS Pt	2 s, 1, 3, 5, 10, 15 min	2s–51%*; 1–14%*; 3,5*-nn 2s–30%*; 1–13%*; 3,5*-nn skupina 1 > skupina 2* 2s–44%*; 1–13%*; 3*,5-nn skupine 1, 2 >* skupina 3		
Miyamoto i sur. (2010)	1 skupina 3 mjerenja različiti položaji 8 M 1 PF 2 NP 3 DF	plantarna fleksija	MVIC/10s	EMS Pt MMG *gastrocnemius* *soleus*	1 s, 1, 2, 3, 4, 5, 10 min	EMS pt 1s–5* 1s–5* 1s–4*	soleus MMG 1s–4* 1s–2* 1s–1*	gastrocn. MMG 1s–5* 1s–5* 1s–5*
Tsolakis i sur. (2011)	1 skupina 2 mjerenja 10Ž, 13M	SJ nožna presa	3×5 MVIC/3×3s	CMJ	1 s, 4, 8, 12 min	NSZ M >* Ž 1s, 4, 8↓*, 12↓*		

Seitz i sur. (2014)	2 skupine 1 čučanj ≥ 2TM 2 čučanj < 1TM	stražnji čučanj	1×3/90% 1RM	SJ	15 s, 3, 6, 9, 12 min	15s*, 3*, 6*, 9*, 12* skupina 1 >* skupina 2 15s*, 3, 6*, 9*, 12*
Naclerio i sur. (2015)	1 skupina 3 mjerenja 7 M, 4 Ž	stražnji čučanj	1×1/80% 1RM 2×1/80% 1RM 3×1/80% 1RM	CMJ	15 s, 1, 2, 3, 5, 8, 12 min	NSZ NSZ 3 min skupina 2 >* skupina 1 NSZ 5 min skupina 3 >* skupina 1
Okuno i sur. (2013)	1 skupina 2 mjerenja 12 M 1 EKS KON	polučučanj	1×5/50% 1RM 1×3/70% 1RM 5×1/90% 1RM /	RSA	5 min	razlika između mjerenja ($p<0,01$)
Mola i sur. (2014)	2 skupine 1 EKS (11 M) 2 KON (11 M)	stražnji čučanj	3RM	CMJ	15 s, 4, 8, 12, 16, 20 min	15 s, 8, 12 ↓* NSZ
Batista i sur. (2007)	1 skupina 10 M	ekstenzija koljena	10×MVISC 60°/s	MVISC 60°/s	4, 6, 8, 10, 12 min	4*, 6*, 8*, 10*, 12*
Mitchell i Sale (2011)	1 skupina 2 mjerenja 11 M 1 PAP EMS Pt 2 PAP CMJ	stražnji čučanj	5RM	EMS Pt CMJ	4 min	10,7%* 2,9%*
Bazett-Jones (2004)	1 skupina 3 mjerenja 10 M	stražnji čučanj SJ /	1×3/90% 1RM (9×) + 30% KON	MVIC	1 s, 1, 2, 3, 4, 5, 6 min	NSZ

Buttifant i Hrysomallis (2015)	1 skupina 2 mjerenja 12 M	stražnji čučanj	3×3RM elastična traka 3×3	SJ	5, 10 min	5* (12%), 10* (13%) 5* (12%), 10* (14%)	
Naclerio i sur. (2014)	1 skupina 5 mjerenja 15 M	stražnji čučanj	1×1/80% 1 RM 1×1/80% 1 RM + WBV 1×3/80% 1 RM 1×3/80% 1 RM +WBV KON	CMJ DJ	1, 4 min	CMJ – 4* NSZ DJ – 4* DJ – 4* NSZ	
Lim i Kong (2013)	1 skupina 4 mjerenja 12 M 1 EKS 2 EKS 3 EKS 4 KON	ekstenzija koljena izometrijski polučučanj čučanj /	MVIC/10 s MVIC/3×3 s 1×3/90% 1 RM /	Sprint 30 m	4 min	total effect size 6% velike razlike između sudionika studije	
Ye i sur. (2015)	1 skupina 2 mjerenja 15 M – S 1 CON 2 ECC	fleksija ručnog zgloba	6×10 MVISC 60°/s CON ECC	Pt EMG	1 s	Pt ↓* CONC<*ECC ↓*	Pt ↓* ↓*
Boyd i sur. (2014)	1 skupina 2 mjerenja 10 M	polučučanj	MVIC 1×3/150% 1 RM	CMJ	2, 5, 8, 11 min	NSZ velike razlike između sudionika studije	

Conchola i sur. (2015)	1 skupina 2 mjerenja 17 M	čučanj	5×16/40% 1 RM 5×8/80% 1 RM	Pt	1 s, 7, 15, 30 min	1s*, 7, 15, 30 1s*, 7*, 15, 30		
Jo i sur. (2010)	1 skupina 4 mjerenja 12 M	stražnji čučanj	1x3/85% 1 RM	WT duration Peak Power Fatigue index	5, 10, 15, 20 min	NSZ nn (+7,1%) nn (+8,9%)		
Boullosa i sur. (2013)	1 skupina 2 mjerenja 12 M (25±5) 1 5 RM 2 5 RM sa stankama	polučučanj	5 RM – do otkaza 5 RM – sa 30 s stankama između ponavljanja	CMJ - PP CMJ – JH	1, 3, 6, 9, 12 min	PP 1 min 5 SP >* 5 RM PP 9 min 5 SP <* 5 RM brzina vertikalnog pomaka 5 SP > 5 RM (p=0,052)		
Baudry i Duchateau (2004)	1 skupina 3 mjerenja 4Ž, 5 M (29±8) 1 ISO 2 CON 3 ECC	dorzalni fleksori	MVIC/6 s CON/6 s ECC/6 s	EMS Pt Tc Tr EMG	5 s, 1, 2, 3, 4, 5, 6, 7, 8, 9, 10, 15, 20 min	ISO ~ CONC ~ ECC <8 min* <9 min* <10 min*		
Chiu i sur. (2003)	2 skupine 4 mjerenja 1 7 ŽM 2 17 ŽM(23±3) 1 SJ 30% 2 SJ 50% 3 SJ70%	stražnji čučanj	5×1/90% 1 RM	SJ+30%1RM SJ+50%1RM SJ+70%1RM	5, 10, 18,5 min	total effect size 30%>* 50%>70% utrenirani >* rekreativci *peak power > avg power*		
Requena i sur. (2008)	1 skupina 3 mjerenja 12 M – S 1 MVC 2 25% MVC 3 STC	ekstenzori koljena	MVIC/7 s 25% MVIC/7 s STC/7 s	EMS Pt Tc Tr	5 s, 1, 3, 5, 10 min	EMS Pt 5 s, 1, 3, 5, 10* NSZ 5 s, 1, 3, 5*	Tc NSZ	Tr NSZ

Jordan i sur. (2010)	1 skupina 2 mjerenja 24 M – S (28±3) 1 EKS 2 KON	izometrijski polučučanj + WBV	3×60 s 30 Hz, ±4 mm	MVIC EMS Pt	1 min	MVIC 1,0±1,5% 3,9±1,3% CON >* EKS	EMS Pt -4,4±3,9% -19,5±4,6% CON <* EKS
Fukutani i sur. (2014)	1 skupina 2 mjerenja 8 M – S (20±1) 1 LI 2 HI	stražnji čučanj	5×45%, 5×60%, 3×75% 5×45%, 5×60%, 3×75%, 3×90% 1 RM	EMG EMS Pt CMJ	EMG 30 s CMJ 1 min	EMG – NSZ; Pt *; CMJ * HI >* LI EMG – NSZ; Pt *; CMJ *	
	1 skupina 2 mjerenja 8 Ž, 12 M – S (20±2)	stražnji čučanj	1×3/85% 1 RM	VJ HJ	8 min	VJ * M ~ Ž HJ * M ~ Ž	
	1 skupina 3 mjerenja 4 Ž, 6 M – S (20±1) 1 BP 2 stražnji čučanj kontrolno	potisak sa klupe stražnji čučanj /	3 RM	SP	8 min	SP – NSZ	
	1 skupina 2 mjerenja 7M – S (20±2) 1 EKS 2 KON	stražnji čučanj	3 RM	Sprint	8 min	sprint – NSZ	
	1 skupina 2 mjerenja 11 M – S (20±2) 1 EKS 2 KON	stražnji čučanj	3 RM	VJ	8 min	VJ – NSZ	
Baudry i sur. (2005)	2 skupine 1 5 Ž, 5 M (31±3) 2 4 Ž, 6 M (79±2)	dorzalni fleksori	MVIC/6 s	EMS Pt Tc Tr	5 s, 1, 2, 3, 4, 5, 6, 7, 8, 9, 10, 15 min	Pt 1, 2* ; Tc 2* ; Tr 1, 2, 5* razlike između skupina 5 s* Pt NSZ; Tc NSZ; Tr NSZ	

Hamada i sur. (2000)	1 skupina 20 M	ekstenzori koljena	MVIC/10 s	EMS Pt Tr TPt EMG Biopsija	5, 30 s, 1, 1,5, 2, 2,5, 3, 3,5, 4, 4,5, 5 min	Pt * u svim vremenskim točkama 5, 30s* 5, 30s* 5, 30s, 1 min* Δ% korelacija s vlaknima tipa II		
Gago i sur. (2014)	1 skupina 5 mjerenja 11 M – S (21±3) 1 ISO 2 SECC 3 FECC 4 SCON 5 FCON	plantarni fleksori	MVC/6 s izokinetički dinamometar	EMS Pt RTD Tr	5, 30 s, 1, 2, 3, 4, 5, 10 min	EMS Pt Σ 1 FCON 2 SCON 3 ISO 4 SECC 5 FECC	RTD Σ 1 SCON 2 FCON 3 ISO 4 FECC 5 SECC	Tr Σ 1 FCON 2 ISO 3 SCON 4 FECC 5 SECC
French i sur. (2003)	1 skupina10 mjerenja 4 Ž, 10 M (23±6) 1 3x3 2 3x5 3 KON	ekstenzori koljena	MVIC 3×3 s 3×5 s	DJ CMJ sprint 5 s Pt EMG	1 post-test nn	DJ - 3x3* > 3x5 > kontrolno CMJ - NSZ sprint 5 s - 3x3* > kontrolno > 3x5 Pt - 3x3* > 3x5* > kontrolno EMG - NSZ		
Kilduff i sur. (2007)	1 skupina 2 mjerenja 23 M – S (24±3) 1 BP 2 BS	potisak sa klupe stražnji čučanj	3 RM	CMJ BPT	15 s, 4, 8, 12, 16, 20 min	15 s↓*, 4, 8*, 12*, 16, 20 15 s↓*, 4, 8*, 12*, 16*, 20		

LEGENDA: Ž – žene; M – muškarci; EKS – eksperimentalna skupina; KON – kontrolna skupina; S – sportaši; MVIC – maksimalna voljna izometrijska kontrakcija; EMS Pt – vršni moment sile tokom elektrostimulirane kontrakcije; RM – *repetition maximum*; CMJ – skok iz čučnja sa pripremom; PF – plantarna fleksija; DF – dorzalna fleksija; NP – neutralni položaj; MMG – mehanomiografija; SJ – skok iz čučnja; TM – tjelesna masa; RSA – repeated sprint ability; Pt – vršni moment sile; DJ – *drop jump* (skok iz saskoka); BPT – *bench press throw*; MVISC – maksimalna voljna izokinetička kontrakcija; EMG – elektromiografija; TPt – vrijeme do vršnog momenta sile; Tr – vrijeme polurelaksacije; Tc – vrijeme porasta između 10% i 90% amplitude; STC – submaksimalna tetanička kontrakcija; MVC – maksimalna voljna kontrakcija; ISO – izometrijski; CONC – koncentrično; ECC – ekscentrično; PP – *peak power* (vršna snaga); JH – visina skoka; VJ – vertikalni skok; HJ – horizontalni skok; SP – *shot put* (bacanje kugle); BP – potisak sa klupe; S (ECC-CON) – sporo/i; F (ECC–CON) – brzo/i

3. CILJEVI I HIPOTEZE ISTRAŽIVANJA

S obzirom na sva prethodno navedena istraživanja te činjenicu da u dosadašnjoj literaturi ne postoje istraživanja koja bi nam dala dodatne informacije o promjeni kontraktilnih svojstava mišića nakon PAP-a, a tako ni onih koja su proučavala kontraktilna svojstva mišića vezana za PAP (općenito) pomoću TMG-a, postavljeni su sljedeći ciljevi istraživanja.

Prvi cilj ovog istraživanja jest procijeniti učinak maksimalnog voljnog izometrijskog PAP protokola na naknadne, potencirane, kontraktilne parametre mišićā *vastus medialis* i *vastus lateralis* kod zdravih, tjelesno aktivnih osoba, mjerene longitudinalno, pomoću izometrijskog dinamometra i transverzalno, pomoću TMG-a. Pretpostavlja se da je pet maksimalnih voljnih izometrijskih kontrakcija u trajanju od 5 sekundi dovoljno da bi se izazvao postaktivacijski učinak te pokazao statistički značajan učinak na naknadne, potencirane, kontraktilne parametre (Boullosa i sur., 2013; Gossen i Sale, 2000).

U skladu s prvim ciljem, prva hipoteza pretpostavlja razlike između kontraktilnih parametara kod oba tipa mjerenja u minimalno dvije vremenske točke te glasi:

H1: Postojat će statistički značajne razlike između kontraktilnih parametara kod oba tipa mjerenja, u minimalno dvije vremenske točke, kod oba testirana mišića

S obzirom na to da su u analizu uključena četiri kontraktilna parametra, dva tipa mjerenja i dva mišića, u svrhu provjere hipoteze H1 će biti odgovoreno na pitanja:

1. Postoje li statistički značajne razlike između longitudinalnog Dm-a u minimalno dvije vremenske točke kod mišića *vastus lateralis*?
2. Postoje li statistički značajne razlike između longitudinalnog Dm-a u minimalno dvije vremenske točke kod mišića *vastus medialis*?
3. Postoje li statistički značajne razlike između longitudinalnog Tc-a u minimalno dvije vremenske točke kod mišića *vastus lateralis*?
4. Postoje li statistički značajne razlike između longitudinalnog Tc-a u minimalno dvije vremenske točke kod mišića *vastus medialis*?
5. Postoje li statistički značajne razlike između longitudinalnog Tr-a u minimalno dvije vremenske točke kod mišića *vastus lateralis*?
6. Postoje li statistički značajne razlike između longitudinalnog Tr-a u minimalno dvije vremenske točke kod mišića *vastus medialis*?

7. Postoje li statistički značajne razlike između longitudinalnog Ts-a u minimalno dvije vremenske točke kod mišića *vastus lateralis*?
8. Postoje li statistički značajne razlike između longitudinalnog Ts-a u minimalno dvije vremenske točke kod mišića *vastus medialis*?
9. Postoje li statistički značajne razlike između transverzalnog Dm-a u minimalno dvije vremenske točke kod mišića *vastus lateralis*?
10. Postoje li statistički značajne razlike između transverzalnog Dm-a u minimalno dvije vremenske točke kod mišića *vastus medialis*?
11. Postoje li statistički značajne razlike između transverzalnog Tc-a u minimalno dvije vremenske točke kod mišića *vastus lateralis*?
12. Postoje li statistički značajne razlike između transverzalnog Tc-a u minimalno dvije vremenske točke kod mišića *vastus medialis*?
13. Postoje li statistički značajne razlike između transverzalnog Tr-a u minimalno dvije vremenske točke kod mišića *vastus lateralis*?
14. Postoje li statistički značajne razlike između transverzalnog Tr-a u minimalno dvije vremenske točke kod mišića *vastus medialis*?
15. Postoje li statistički značajne razlike između transverzalnog Ts-a u minimalno dvije vremenske točke kod mišića *vastus lateralis*?
16. Postoje li statistički značajne razlike između transverzalnog Ts-a u minimalno dvije vremenske točke kod mišića *vastus medialis*?

Drugi je cilj usporediti i modelirati kontraktilna svojstva ekstrahirana iz longitudinalnog, izometrijskog (obrtni moment sile) i transverzalnog, TMG odgovora mišićā *vastus medialis* i *vastus lateralis* na jedan električni impuls (*twitch*). Pretpostavlja se da će transverzalni odgovor mišićā *vastus medialis* i *vastus lateralis* na jedan električni impuls (*twitch*) dati bolji uvid u kontraktilna svojstva ovih mišića od longitudinalnog, mjerenog obrtnim momentom sile.

Prema drugom cilju, druga hipoteza pretpostavlja razlike između transverzalnih kontraktilnih svojstava, mjerenih TMG-om, i longitudinalnih, mjerenih izometrijskim dinamometrom te glasi:

H2: Postojat će statistički značajne razlike između transverzalnih i longitudinalnih kontraktilnih parametara kod oba testirana mišića

S obzirom na to da su, kao što je to bio slučaj kod hipoteze H1, u analizu uključena četiri kontraktilna parametra i dva mišića, u svrhu provjere hipoteze H2 će biti odgovoreno na pitanja:

1. Postoje li statistički značajne razlike između transverzalnog i longitudinalnog Dm-a kod mišića *vastus lateralis*?
2. Postoje li statistički značajne razlike između transverzalnog i longitudinalnog Dm-a kod mišića *vastus medialis*?
3. Postoje li statistički značajne razlike između transverzalnog i longitudinalnog Tc-a kod mišića *vastus lateralis*?
4. Postoje li statistički značajne razlike između transverzalnog i longitudinalnog Tc-a kod mišića *vastus medialis*?
5. Postoje li statistički značajne razlike između transverzalnog i longitudinalnog Tr-a kod mišića *vastus lateralis*?
6. Postoje li statistički značajne razlike između transverzalnog i longitudinalnog Tr-a kod mišića *vastus medialis*?
7. Postoje li statistički značajne razlike između transverzalnog i longitudinalnog Ts-a kod mišića *vastus lateralis*?
8. Postoje li statistički značajne razlike između transverzalnog i longitudinalnog Ts-a kod mišića *vastus medialis*?

Treći je cilj ustanoviti, na temelju regresijske jednadžbe (Šimunič i sur., 2011) koja pokazuje visok koeficijent korelacije (0,933) između linearne kombinacije tri tenziomiografska parametra i miozinskog teškog lanca, povećava li se kod mišića *vastus lateralis* transverzalni odgovor (nakon PAP-a) u većoj mjeri ukoliko on, izračunato prema prethodno predstavljenoj formuli, ima veći broj (procentualno) brzokontraktilnih mišićnih vlakana. S obzirom na treći cilj, treća hipoteza glasi:

H3: Postojat će statistički značajna korelacija između veličine promjene transverzalnih kontraktilnih parametara nakon PAP-a i udjela brzokontraktilnih vlakana kod mišića *vastus lateralis*

4. METODE

4.1. Ispitanici

U istraživanju je sudjelovalo petnaest zdravih muškaraca i žena, studenata Aplikativne kineziologije Univerze na Primorskem, bez zabilježenih povreda donjih ekstremiteta i s najmanje jednom godinom iskustva u treningu s vanjskim opterećenjem. Sudionici su bili različitih spolova zbog toga jer se PAP ne razlikuje između spolova (Wilson i sur., 2013). Podobnost ispitanika je ustanovljena usmenim intervjuom prije objašnjenja protokola i pismenog pristanka.

Sva mjerenja su provedena pod uvjetom da su se ispitanici suzdržali od konzumacije alkohola, kave i izvođenja vježbi visokog intenziteta (Kilduff i sur., 2007). Razlog tome jest činjenica da se smanjenje sposobnosti generiranja sile tijekom zamora može kompenzirati unosom kofeina (MacIntosh i Gardiner, 1987; Eberstein i Sandow, 1963). Konzumacija vode je bila dopuštena tijekom izvođenja eksperimentalnog protokola, ali nijedan od ispitanika nije to činio od početka zagrijavanja pa do završetka eksperimentalnog protokola u cijelosti.

Određivanje veličine uzorka izvršeno je po metodi prema Cohenu (1977). Naime, na temelju statističke snage od 80%, pogreške od 5% i minimalne praktično značajne veličine učinaka u zavisnim varijablama od 0,5 SD, utvrđeno je da bi u eksperimentalnoj skupini trebalo biti minimalno 12 ispitanika.

4.2. Eksperimentalni protokol

Nakon detaljnog objašnjenja protokola i pismenog pristanka ispitanika, izvršen je standardizirani protokol koji se sastoji od pet minuta na steperu i tri minute dinamičkog istezanja. Standardizirani protokol zagrijavanja s dinamičkim istezanjem je implementiran u eksperimentalni postupak kako bi se izbjegli negativni učinci statičkog istezanja na PAP (Cè i sur., 2008). Iako ne statistički značajno, statičko istezanje ima negativan akutni učinak na mišićnu izvedbu (Bazett-Jones, 2004). Kako bi se izbjegla potencijacija uslijed dinamičkog istezanja, tempo same izvedbe je kontroliran tako da koncentrična i ekscentriča faza traju po jednu sekundu, kao u nekim dosadašnjim studijama (Mola i sur., 2014; Fletcher, 2010).

Nakon toga, kako bi se smanjili učinci umora i postaktivacije nastali uslijed zagrijavanja (Mola i sur., 2014), svaki ispitanik je imao petnaestominutni odmor zbog metaboličkog oporavka i obnove energetskih depoa (eng. *washout*). French i suradnici (2003) i Alway i suradnici (1987)

navode da je 15 minuta nakon maksimalnih voljnih kontrakcija dovoljno da se rezidualni učinci PAP-a umanje do razine na kojoj su bili prije zagrijavanja te da nije potrebno više od 30 minuta da učinci PAP-a nestanu u potpunosti. Pored toga, mirovanje prije mehanomiografskog (MMG) testiranja se pokazalo kao dobra praksa koja rezultira boljom redistribucijom tjelesnih tekućina (Berg i sur., 1993).

S obzirom na to da su Maffiuletti i Lepers (2003) primijetili da je generirana sila, ali i elektromiografski (EMG) signal, tijekom maksimalne voljne izometrijske kontrakcije mišića *quadriceps femoris* tijekom testiranja u sjedećem položaju statistički značajno veća od one u ležećem, ispitanici potom sjedaju na izometrijski dinamometar te su im ramena, struk i potkoljenica fiksirani trakama za stabilizaciju. Kako su Alvarez-Diaz i suradnici (2016) zaključili da se TMG parametri donjih ekstremiteta ne razlikuju statistički značajno između dominantne i nedominantne strane tijela, testiranju je podvrgnuta dominantna noga, koja je definirana kao ona kojom bi ispitanik šutnuo loptu (Weir i sur., 1997). Za vrijeme testiranja, kut poluge dinamometra, a samim time i kut koljena, podešen je na 40° od pune ekstenzije, kako bi položaj noge bio optimalan za PAP (Veligekas i sur., 2013), ali i TMG mjerenje (Alvarez-Diaz i sur., 2016). Os rotacije dinamometra je podešena tako da odgovara osi rotacije (fleksije i ekstenzije) koljenog zgloba. Mjerenje obrtnog momenta i lateralnog pomicanja mišića trbuha je evaluirano usporedno za vrijeme svake elektrostimulirane mišićne kontrakcije.

Četveroglavi bedreni mišić (*m. quadriceps femoris*) je jedini opružač koljena, a sastoji se od tri vastusa (*m. vastus medialis*, *lateralis* i *intermedius*) i ravnog bedrenog mišića (*m. rectus femoris*). S obzirom na to da je *m. rectus femoris* dvozglobni mišić čiji doprinos obrtnom momentu sile opružanja koljena uveliko ovisi o kutu kuka (Maffiuletti i Lepers, 2003), te da je *m. vastus intermedius* nemoguće procijeniti individualno, u ovu studiju su uključeni *m. vastus medialis* i *m. vastus lateralis*.

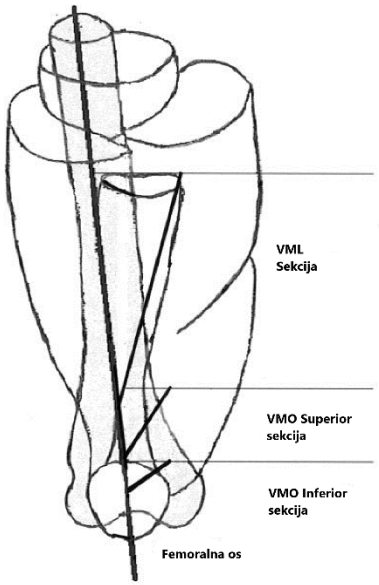
Cijeli protokol podrazumijevao je ukupno 32 električne stimulacije (16 na mišiću *vastus lateralis* i 16 na mišiću *vastus medialis*). Mišići su evaluirani neposredno prije 30 sekundi, 1, 2, 3, 5, 7 i 10 minuta nakon PAP protokola kojeg će sačinjavati 5×5 sekundi maksimalnih voljnih izometrijskih kontrakcija sa stankama od po deset sekundi između ponavljanja. Razlog implementacije stanki u aktivacijski podražaj može se naći u studiji od Boullosa i suradnika (2013), koji su primijetili da aktivacijski podražaj s implementiranom pauzom između ponavljanja rezultira statistički značajno većim PAP učincima od serije „do otkaza", što autori objašnjavaju većim omjerom potencijacija – zamor. Pored toga, preveliki broj serija i/ili

ponavljanja tijekom aktivacijskog podražaja može rezultirati akumuliranim zamorom koji može značajno narušiti izvedbu (Talpey i sur., 2014). Deset sekundi MVC-a se, na primjer, u dosadašnjim studijama pokazalo kao preveliko opterećenje koje rezultira značajnim umanjenjem jačine i brzine mišićne kontrakcije (Gossen i Sale, 2000).

Uporaba izometrijskih kontrakcija u svrhu izazivanja PAP učinaka također je implementirana na osnovu dosadašnjih studija, od kojih većina ukazuje na činjenicu da izometrijski protokoli rezultiraju većim PAP učincima od dinamičkih.

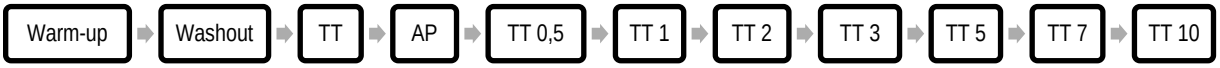
S obzirom na to da brzina širenja mišićnih vlakana i veličina sile koju generiraju ovisi o vremenskom intervalu između dviju mišićnih aktivacija (Griffin i sur., 2002; Mihelin i sur., 1991; Stålberg, 1966; Z'graggen i Bostock, 2009). Oba vastusa su elektrostimulirana dva puta, s pauzom od pet sekundi u svakoj točki mjerenja. U skladu s navedenim, promjene u kontraktilnim svojstvima mišića, nastale uslijed prethodne elektrostimulirane kontrakcije su proučavane u nekoliko dosadašnjih studija (Thomas i sur., 1999; Zytnicki i sur., 1990; Horcholle-Bossavit i sur., 1987; Nlandu Kamavuako i Farina, 2010). U svim navedenim studijama je zaključeno da elektrostimulirana kontrakcija ima akutni učinak na narednu, ali u jako malom vremenskom periodu. Najdulji period ovog „mini PAP učinka" je zabilježen u studiji Šimuniča (2001), koji je primijetio da su tri sekunde optimalno vrijeme za mjerenje mišićnog odgovora s dva uzastopna električna impulsa. Nadalje, Nlandu Kamavuako i Farina (2010), koji navode da elektrostimulirana kontrakcija utječe na sljedeću isključivo ako je druga unutar vremenskog intervala od 125 milisekundi nakon prve.

Važno je napomenuti da je tijekom eksperimentalnog protokola elektrostimuliran mišić *vastus medialis obliquus*. Naime, u dvije studije Lieba i Perry (1968, 1971) je primijećeno da se mišić *vastus medialis* dijeli na dva dijela, *obliquus* i *longus*. S obzirom na to da su Thiranagama (1990) i Lefevbre i suradnici (2006) podijelili *vastus medialis* na tri dijela (proksimalni, medijalni i distalni) te primijetili inervaciju ovog mišića kroz samo dva živca, zaključak studija, koje su proveli Lieb i suradnici (1968, 1971), ali i Weinstabl i suradnici (1989) te Lin i suradnici (2004) i Peeler i suradnici (2005) – da se ovaj mišić dijeli na *obliquus* i *longus* dijelove jest vjerodostojan.



Slika 4. Vizualna reprezentacija tri dijela mišića vastus medialis *(preuzeto iz: Peeler i sur., 2005)*

Prvi procijenjeni mišić je evaluiran kao zadnji u svakoj narednoj točki mjerenja (1,2→2,1→1,2…) te je pored toga razvrstavanje ispitanika napravljeno tako da svaki sljedeći počinje testiranje s drugom glavom kvadricepsa (1,2→2,1→1,2…), čime se je osigurao podjednak broj ispitanika koji su protokol počeli s mišićima *vastus medialis* i *vastus lateralis*. Grafički prikaz tijeka protokola predstavljen je u nastavku (slika 5).



Warm up – zagrijavanje; *Washout* – vrijeme od zagrijavanja do MVIC-a; TT – mjerenje longitudinalnog i transverzalnog mišićnog odgovora (eng. *Twitch torque*); AP – MVIC protokol (aktivacijski podražaj)

Slika 5. Tijek protokola

4.3. Električne stimulacije

Dvije kvadratne samoljepljive (Compex Medical SA, Ecublens, Switzerland) elektrode širine pet centimetara su postavljene na kožu iznad mišićā *vastus lateralis* i *vastus medialis*. Kako bi se izazvala kontrakcija mišića, jedan monopolarni pravokutni impuls u trajanju od jedne milisekunde je apliciran iz elektrostimulatora (TMG-S1, Ljubljana, Slovenija) kroz anodu ka katodi, koje su postavljene pet centimetara distalno, odnosno pet centimetara proksimalno od točke mjerenja. S obzirom na to da varijacije u pozicijama elektroda ili senzora utječu na rezultate TMG testiranja, odnosno da su Tous-Fajardo i suradnici (2010) primijetili statistički značajnu razliku između TMG parametara mjerenih pri različitim udaljenostima elektroda, u njihovom slučaju ±5 i ±3 cm te preporučuju uporabu istih razdaljina između elektroda pri

svakom TMG testiranju, par elektroda postavljen na početku eksperimentalnog protokola skinut je tek po njegovu završetku.

Po potrebi je kut senzora, a samim time i položaj elektroda, podešen tako da se dobije maksimalna amplituda na svakom testiranom mišiću. Na samom početku eksperimentalnog protokola ustanovljena je optimalna jakost električnog impulsa i to na način da se povećanjem od 5 mA na svakih 10 sekundi dođe do jakosti impulsa optimalne za maksimalnu stimulaciju pojedinog mišića. Električna stimulacija nije bila jednaka za sve ispitanike. Jakost je povećavana do razine na kojoj je mišićni odgovor došao do platoa te je ta optimalna jakost električnog impulsa, utvrđena na početku protokola, korištena za vrijeme cijelog protokola. Povećavanje jačine signala iznad optimalne razine bi izazvalo nelagodu dok pri tome ne bi dalo dadatne informacije o kontraktilnim parametrima. Ovo je u skladu sa dosadašnjim studijama prethodnih autora (Križaj i sur., 2008), koji su u njima primijetili da uporaba impulsa jednake jačine, a zbog individualnih karakteristika, ne izaziva optimalni odgovor kod svih ispitanika. Potreba određivanja optimalne jačine stimulacije također je naglašena u studiji Šimuniča i suradnika (2010).

4.4. Mjerni instrumenti

TMG senzor pomaka (*G40 digital-optical comparator*, TMG-BMC Ltd., Ljubljana, Slovenija) izuzetne osjetljivosti od jednog μm je postavljen okomito na kožu iznad trbuha mišićā *vastus lateralis* i *vastus medialis*. Točke TMG mjerenja dvaju vastusa anatomski su određene prema Perottu i suradnicima (2011) te označene dermatološkim flomasterom. Vrh TMG senzora je postavljen na kožu s inicijalnim pritiskom od 77 N/mm^2. Inicijalni pritisak se u dosadašnjim studijama pokazao kao veoma važna prednost TMG uređaja u odnosu na druge MMG metode jer, ukoliko bi se TMG senzor postavio bez inicijalnog pritiska, veličina bočnih oscilacija bila bi znatno umanjena zbog toga što bi zbog nastajanja novog otpora odgovor mišića bio znatno prigušen (Križaj i sur., 2008).

Nekoliko studija je provedeno u svrhu procjene pouzdanosti TMG-a. Križaj i suradnici (2008) su procijenjivali pouzdanost mjerenja u jednom danu (eng. *within-day*), Tous-Fajardo i suradnici (2010) između različitih mjeritelja (eng. *inter-rater*) i Šimunič (2012) između mjerenja unutar tri dana (eng. *between-day*).

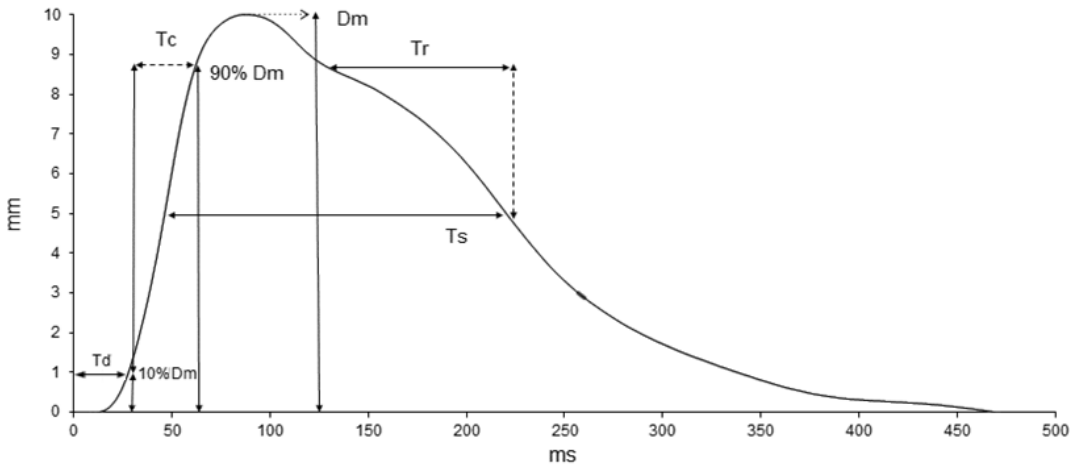
Zadovoljavajuća razina pouzdanosti mjerenja između različitih mjeritelja je dokazana u studiji Tous-Fajarda i suradnika (2010), koji navode da Dm, Tc, Ts i Td imaju ICC u rasponu 0,86–

0,97 i CV 2,7–4,7. Vrijeme polurelaksacije je pokazalo najnižu razinu pouzdanosti s ICC-om od 0,77 i CV-om od 14,2[1]. U Šimuničevoj studiji (2012) su, pored toga, primijećeni ICC u rasponu 0,88–0,98 za *vastus medialis obliquus*, 0,89–0,99 za *vastus lateralis*. Bitno je naglasiti da su Ditroilo i suradnici (2013) primijetili veći ICC i manji CV TMG parametara nakon izvedbe izokinetičkog MVC-a, što ukazuje da povećanje kontroliranih uvjeta povećava i pouzdanost samog mjerenja.

Vrijednost obrtnog momenta sile je procijenjena pomoću izometrijskog dinamometra (*S2P*, Ljubljana, Slovenija). U analizu su uzete prosječne vrijednosti izračunatih kontraktilnih parametara iz dviju elektrostimuliranih kontrakcija.

4.5. Procjena kontraktilnih parametara

Iz svakog grafikona (slika 6.) dobivenog mjerenjem TMG signala i obrtnog momenta za vrijeme električne stimulacije (*twitch*) ekstrahirani su sljedeći parametri: Dm, Td, Tc, Ts i Tr.



Slika 6. Shematski prikaz bočnog odgovora mišića na električni impuls sa svim pripadajućim parametrima – Dm, Td, Tc, Ts i Tr

Amplituda mišićnog odgovora (Dm – maksimalna amplituda/mm), vrijeme porasta između 10% i 90% amplitude (Tc – vrijeme kontrakcije/ms), vrijeme tijekom kojeg je amplituda veća od 50% (Ts – vrijeme održanja/ms) i vrijeme pada između 90% i 50% amplitude (Tr – vrijeme polurelaksacije/ms) su uključeni u sve analize. Uz to, iz rezultata TMG testiranja ekstrahirano je i vrijeme potrebno da mišić iz neutralnog položaja dođe do 10% amplitude (Td – vrijeme odgode/ms) za provjeru treće hipoteze.

[1] CV pokazuje konzistentnost mjerenja istog ispitanika u više navrata dok ICC ukazuje je li ispitanik u istom rangu unutar skupine, također, pri mjerenju u više navrata (Atkinson i Nevill, 1998).

Pored navedenih kontraktilnih parametara, a u svrhu dekompozicije TMG signala procijenjivani su i a_1, a_2, a_3, b_1, b_2, b_3 i c_1, c_2, c_3. U jednadžbi ispod (eq 2.) predstavljen je matematički model dekompozicije TMG signala:

$$eq2. \quad a_1 e^{-\left(\frac{x-b_1}{c_1}\right)^2} + a_2 e^{-\left(\frac{x-b_2}{c_2}\right)^2} + a_3 e^{-\left(\frac{x-b_3}{c_3}\right)^2} = \sum_{k=1}^{3} a_k e^{-\left(\frac{x-b_k}{c_k}\right)^2}$$

gdje je x vrijeme, a_1, a_2, $a_3$amplituda, b_1, b_2, $b_3$vrijeme najviše amplitude, c_1, c_2, $c_3$vrijeme pada amplitude na 63,2% početne vrijednosti.

4.6. Statistička analiza

Rezultati su analizirani pomoću „SPSS 20" (*Statistical Package for the Social Sciences*, IBM, NY, SAD) programa za operativni sustav Windows. Normalitet distribucije je procijenjen pomoću Kolmogorov-Smirnov (KS) testa. Rezultati za sve normalno distribuirane varijable će biti predstavljeni kroz aritmetičke sredine i standardne devijacije, dok će za varijable koje ne prate normalnu distribuciju biti predstavljeni medijan, prvi i treći kvartil.

Kako bi se ustanovile razlike između pre-PAP i svih post-PAP vremenskih točaka za sve zavisne varijable (hipoteza H1), a u ovisnosti o normalitetu distribucije, korišteni su analiza varijance za ponovljena mjerenja i Friedmanova ANOVA analiza. Za varijable s normalnom distribucijom hipoteza H1 je provjerena pomoću analize varijance za ponovljena mjerenja s LSD testom za višestruke komparacije. Statistička značajnost ANOVA-e za ponovljena mjerenja je podešena na $p<0,0071$ (Bonferronijeva korekcija – 1 pre-PAP/7 post-PAP → 0,05/7=0,0071). Greenhouse-Geisserovu prilagodbu je neophodno izvršiti kako bi se izbjegle greške uslijed narušene sferičnosti. Kako ne bi došlo do pogreške u prihvaćanju hipoteze i utvrđivanju veličine učinaka, odnosno, do greške prve vrste, da nulta hipoteza bude odbačena a ona je točna, izvršena je Greenhouse-Geisserova prilagodba sferičnosti za sve zavisne varijable. Za sve varijable koje ne prate normalnu distribuciju, statistička značajnost razlika je utvrđena Friedmanovom ANOVA-om, dok je za višestruke komparacije korišten Wilcoxonov test uređenih parova.

Važno je navesti da je u svrhu komparacije rezultata dekompozicije transverzalnog odgovora mišića između pre- i post-PAP mjerenja također korištena ANOVA analiza za ponovljena mjerenja. Također, kao mjera veličine učinaka korišten je parcijalni η^2 koji mjeri proporciju varijance zavisne varijable koja je povezana s članstvom različitih skupina definiranih

nezavisnom varijablom, a određena je sumom kvadrata i pripadajućom greškom istraživanog efekta nezavisne varijable (Levine i Hullet, 2002).

$$\text{Parcijalni } \eta^2 = \frac{SS_{Između\ grupa}}{SS_{između\ grupa} - SS_{pogreška}}$$

Dvofaktorska analiza varijance za ponovljena mjerenja (tip testiranja × vrijeme) korištena je kako bi se usporedile aritmetičke sredine i veličine učinaka (parcijalni η^2) dvije korištene metode (hipoteza H2).

Hipoteza H3 je provjerena korištenjem korelacijske analize. Pearsonov koeficijent korelacije je korišten kako bi se ustanovio iznos i statistička značajnost povezanosti između veličine PAP učinaka i udjela brzokontraktilnih mišićnih vlakana kod obaju mišića. Razina statističke značajnosti je podešena na $p<0,05$.

5. REZULTATI

Kada su u pitanju rezultati ove studije, od ukupno 4 vremenska parametra elektrostimulirane kontrakcije, kod dva je primijećeno odstupanje od normalne distribucije u dvije ili više točaka mjerenja tako da je prilikom analize tih dvaju parametara korištena neparametrijska alternativna analiza varijance za ponovljena mjerenja. U skladu s tim, za Dm i Tc predstavljene su aritmetičke sredine i standardne devijacije, dok su za Ts i Tr predstavljeni medijan te pored toga i prvi i treći kvartil u svakoj vremenskoj točki.

U tablicama su označene statistički značajne razlike između mjerenja. Razlike u odnosu na pre-PAP i prvo post-PAP mjerenje su označene kako bi se dobio detaljan uvid u tijek PAP učinka. Naime, razlike u odnosu na pre-PAP mjerenje ukazuju na dužinu trajanja, dok razlike u odnosu na prvo post-PAP mjerenje daju detaljniji uvid u tijek, ali i veličinu PAP učinaka.

5.1. Učinci postaktivacijske potencijacije na longitudinalne kontraktilne parametre mišića

Rezultati predstavljeni u ovom potpoglavlju ukazuju da pet maksimalnih voljnih izometrijskih kontrakcija rezultiraju statistički značajnim akutnim promjenama kontraktilnih parametara kod oba testirana mišića.

Tablica 2. Prosječne vrijednosti i standardne devijacije rezultata u varijabli Dm zabilježenih na oba testirana mišića prilikom oba tipa testiranja. Statistička značajnost razlika između testiranja izračunata analizom varijance za ponovljena mjerenja

Maksimalna amplituda (Dm)				
	VL		VM	
	TMG	Dyno	TMG	Dyno
Pre	3,03±0,95^{+}	8,97±4,32^{+}	7,77±2,44^{+}	4,77±3,20^{+}
0,5 min	4,12±1,46*	14,05±5,47*	9,15±2,66*	7,80±5,11*
1 min	4,07±1,48*	12,89±5,59*$^{+}$	9,01±2,42*	6,41±3,76*$^{+}$
2 min	4,12±1,44*	11,85±4,92*$^{+}$	8,82±2,32*	5,97±3,66*$^{+}$
3 min	4,02±1,46*	11,37±4,71*$^{+}$	8,91±2,26*	5,73±3,27*$^{+}$
5 min	3,76±1,27*	10,25±4,19*$^{+}$	8,71±2,05	5,32±3,11^{+}
7 min	3,65±1,25*$^{+}$	9,61±4,06^{+}	8,60±1,99	4,99±3,14^{+}
10 min	3,47±1,18^{+}	8,82±4,14^{+}	8,18±1,88^{+}	4,64±3,33^{+}
Wilksovaλ	0,21*	0,12*	0,13*	0,19*
F (7,8)	15,41	39,34	8,69	17,64
Parcijalni η^2	0,52	0,74	0,38	0,56
Mauchlyjev p	<0,01	<0,01	<0,01	<0,01
Epsilon (GG)	0,48	0,29	0,34	0,26
GG p	<0,01	<0,01	<0,01	<0,01

*Značajna razlika u odnosu na pre-PAP mjerenje
$^{+}$Značajna razliku u odnosu na 0,5 post-PAP mjerenje
VL - *m. vastus lateralis*; VM - *m. vastus medialis*; TMG – rezultat TMG testiranja; Dyno – rezultat dinamometrijskog testiranja; GG – Greenhouse-Geisser

Iz tablice 2. je uočljivo da je aktivacijski podražaj rezultirao statistički značajnim PAP učincima na amplitudu odgovora (Dm) oba testirana mišića prilikom oba tipa testiranja. Može se primijetiti da su promjene u ovom slučaju bile isključivo pozitivne te da je Dm bio statistički značajno veći u svim testiranjima do 3 minute nakon aktivacijskog podražaja u odnosu na pre-PAP mjerenje. Također, može se primijetiti da su promjene, u svim mjerenjima, bile statistički značajne odmah u prvom post-PAP mjerenju. Pored toga, vrijednost Dm-a se nije statistički značajno razlikovala od pre-PAP mjerenja u desetoj minuti nakon aktivacijskog podražaja ni u jednom mjerenju.

Tablica 3. Prosječne vrijednosti i standardne devijacije rezultata u varijabli Tc zabilježenih na oba testirana mišića prilikom oba tipa testiranja. Statistička značajnost razlika između testiranja izračunata analizom varijance za ponovljena mjerenja

Vrijeme kontrakcije (Tc)				
	VL		VM	
	TMG	Dyno	TMG	Dyno
Pre	20,68±4,2^{+}	63,71±8,1	24,07±3,36^{+}	44,42±9,32^{+}
0,5 min	18,78±4,1*	63,68±11,6	20,11±2,41*	51,58±5,38*
1 min	19,23±4,5*	64,11±8,2	21,56±2,73*$^{+}$	49,08±6,18
2 min	20,31±4,8^{+}	65,36±8,8	21,97±2,58*$^{+}$	49,41±6,04
3 min	20,56±4,6^{+}	66,66±6,7	22,76±2,59^{+}	48,68±5,65
5 min	20,95±4,7^{+}	63,85±7,3	23,21±2,99^{+}	47,90±6,37
7 min	21,40±4,5^{+}	62,88±6,2	23,79±2,94^{+}	47,33±6,02^{+}
10 min	21,42±4,5^{+}	60,17±9,1	24,23±3,11^{+}	43,95±8,43^{+}
Wilksovaλ	0,06*	0,29	0,05*	0,40
F (7,8)	15,47	2,53	33,33	4,89
Parcijalni η^2	0,52	0,15	0,70	0,26
Mauchlyjev p	<0,01	<0,01	<0,01	0,03
Epsilon (GG)	0,48	0,48	0,43	0,54
GG p	<0,01	0,06	<0,01	<0,01

*Značajna razlika u odnosu na pre-PAP mjerenje
$^{+}$Značajna razliku u odnosu na 0,5 post-PAP mjerenje
VL – *m. vastus lateralis*; VM – *m. vastus medialis*; TMG – rezultat TMG testiranja; Dyno – rezultat dinamometrijskog testiranja; GG – Greenhouse-Geisser

Kada je u pitanju vrijeme kontrakcije, iz tablice 3. se može primijetiti da aktivacijski podražaj nije rezultirao statistički značajnim učincima prilikom dinamometrijskog testiranja mišića *vastus lateralis*. Ostala mjerenja su pokazala statistički značajne učinke na ovaj vremenski parametar. Naime, u svim drugim testiranjima može se primijetiti statistički značajna razlika u odnosu na pre-PAP, ali i prvo post-PAP testiranje. Također, kao što je to bio slučaj kod Dm-a, i rezultati Tc-a se nisu statistički značajno razlikovali od pre-PAP mjerenja u desetoj minuti nakon aktivacijskog podražaja ni u jednom mjerenju te je, pored toga, statistički značajna razlika primijećena odmah u prvom post-PAP mjerenju (izuzev dinamometrijskog testiranja mišića *vastus lateralis*).

Kada su u pitanju preostala dva vremenska parametra, kao što je navedeno na početku ovoga poglavlja, predstavljeni su Medijan i vrijednosti prvog i trećeg kvartila. Pored toga, za razliku od prva dva parametra, statistička značajnost razlika je ustanovljena Friedmanovom ANOVA analizom, dok je za višestruke komparacije korišten Wilcoxonov test uređenih parova.

Tablica 4. Medijan i vrijednosti prvog i trećeg kvartila u varijabli Ts, zabilježenih na oba testirana mišića prilikom oba tipa testiranja. Statistička značajnost razlika između testiranja je izračunata Wilcoxonovim t-testom

Vrijeme održanja (Ts)				
	VL		VM	
	TMG	Dyno	TMG	Dyno
Pre	41,50 (30,95-123,43)⁺	114,31 (107,97-121,37)	184,14 (160,77-207,91)	110,51 (106,50-138,68)
0,5 min	28,69 (23,63-33,44)*	114,28 (105,04-118,27)	168,40 (124,13-192,77)	113,39 (101,73-127,95)
1 min	31,56 (26,78-92,16)*⁺	116,71 (106,93-119,67)	183,05 (151,18-204,27)	115,6 (109,24-136,03)
2 min	31,78 (29,09-58,19)⁺	114,23 (105,60-119,79)	186,27 (157,06-199,97)	112,1 (96,06-124,50)
3 min	32,21 (30,15-118,87)⁺	115,54 (105,47-119,22)	183,55 (166,31-200,94)	112,2 (100,19-127,50)
5 min	33,94 (30,08-138,19)⁺	117,94 (104,25-122,09)	179,96 (161,16-204,14)	108,6 (100,89-118,21)
7 min	37,01 (33,61-166,43)⁺	113,82 (101,72-121,04)	183,75 (148,72-203,36)	106,9 (103,1-110,3)
10 min	41,54 (34,01-158,68)⁺	116,24 (107,16-119,18)	181,78 (158,59-208,14)	102,1 (99,66-118,35)
Friedmanov χ^2	57,84**	4,60	12,11	16,46

*Značajna razlika u odnosu na pre-PAP mjerenje
⁺Značajna razliku u odnosu na 0,5 post-PAP mjerenje
**Statistička značajnost - p<0,05
VL – *m. vastus lateralis*; VM – *m.vastus medialis*; TMG – rezultat TMG testiranja; Dyno – rezultat dinamometrijskog testiranja

Kada je u pitanju Ts (tablica 4.), statistički značajne razlike između mjerenja su se javile kod TMG mjerenja mišića *vastus lateralis,* dok se ostale varijable ne razlikuju statistički značajno između mjerenja.

Iako ne statistički značajno, za razliku od mišića *vastus lateralis,* kod mišića *vastus medialis* može se primijetiti smanjenje trajanja vremena održanja krivulje iznad 50% najveće vrijednosti. Također, rezultati su slični onima zabilježenim kod Dm-a i T-a. Naime, kao što je to bio slučaj kod Dm-a i Tc-a, rezultati Ts-a se nisu statistički značajno razlikovali od pre-PAP mjerenja u desetoj minuti nakon aktivacijskog podražaja.

Tablica 5. Medijan i vrijednosti prvog i trećeg kvartila u varijabli Tr, zabilježenih na oba testirana mišića prilikom oba tipa testiranja. Statistička značajnost razlika između testiranja je izračunata Wilcoxonovim t-testom

Vrijeme polurelaksacije (Tr)				
	VL		VM	
	TMG	Dyno	TMG	Dyno
Pre	18,49 (9,10-73,26)+	32,51 (27,89-33,87)	52,71 (48,54-123,84)	45,16 (32,98-55,89)
0,5 min	8,14 (7,19-10,86)*	30,53 (29,35-35,16)	103,89 (71,75-150,33)	37,09 (31,22-49,79)
1 min	9,36 (7,64-71,74)*+	32,16 (29,64-37,37)	108,88 (55,91-161,98)*	38,56 (31,23-47,39)
2 min	9,73 (8,82-35,47) +	31,90 (26,93-37,92)	135,32 (55,99-161,04)*	39,83 (28,28-44,45)
3 min	11,47 (8,92-89,50) +	31,26 (27,09-36,53)	107,36 (53,14-148,12)*	40,72 (33,09-51,53)
5 min	11,93 (9,91-109,53) +	32,03 (29,45-33,52)	106,99 (47,33-155,47)	42,19 (36,09-48,45)
7 min	14,32 (9,57-95,74) +	31,17 (27,01-38,89)	59,57 (42,69-133,78)	41,38 (35,34-45,25)
10 min	14,93 (9,32-131,67) +	30,11 (27,33-33,58)	57,56 (44,72-128,27)	40,28 (36,13-47,61)
Friedmanov χ^2	51,91**	4,71	24,16**	4,11

*Značajna razlika u odnosu na pre-PAP mjerenje
+Značajna razliku u odnosu na 0,5 post-PAP mjerenje
**Statistička značajnost - p<0,05
VL – *m. vastus lateralis*; VM – *m. vastus medialis*; TMG – rezultat TMG testiranja; Dyno – rezultat dinamometrijskog testiranja

Iz tablice 5. može se primijetiti da se vrijeme polurelaksacije (Tr) statistički značajno razlikuje između TMG mjerenja u različitim vremenskim točkama, dok ovo nije slučaj kod dinamometrijskog testiranja. Međutim, iako su se javile statistički značajne razlike između vremenskih točaka, promjene su bile različito usmjerene kod dva testirana mišića. Tako, kod mišića *vastus lateralis* zabilježeno je smanjenje vremena polurelaksacije dok je kod mišića *vastus medialis* primijećeno povećanje istog parametra. Također, vremenski slijed je nešto drugačiji. Naime, kod prvoga su zabilježene statistički značajne promjene u prvoj vremenskoj točki nakon AP-a, dok je kod drugog primijećena odgoda učinaka te su oni različiti od pre-PAP mjerenja tek jednu minutu nakon aktivacijskog podražaja.

Na osnovu tablica 2–5. je uočljivo da je hipoteza H1 prihvaćena.

5.2. Razlike između longitudinalnih i transverzalnih kontraktilnih parametara

Kada je u pitanju komparacija između učinaka (H2), ona je izvršena isključivo kod normalno distribuiranih varijabli zbog toga što su statistički značajne promjene, kod ovih varijabli, izuzev

vremena kontrakcije mišića *vastus lateralis*, primijećene kod oba tipa testiranja. S obzirom na to da su deskriptivni parametri predstavljeni na početku ovog poglavlja, u narednoj tablici su prikazani rezultati dvofaktorske analize varijance za ponovljena mjerenja.

Tablica 6. Rezultati dvofaktorske analize varijance za ponovljena mjerenja – vrijeme × test za sve zavisne varijable s normalnom distribucijom. Predstavljeni su pripadajuća F-vrijednost, effect size i razina statističke značajnosti (p)

	Dm		Tc	
	VL	VM	VL	VM
F (7,22)	8,13	1,55	3,83	5,93
Parcijalni η^2	0,72	0,33	0,55	0,65
p vrijednost	<0,01	0,20	<0,01	0,01
Dm – maksimalna amplituda; Tc – vrijeme kontrakcije; VL – *m.vastus lateralis*; VM – *m.vastus medialis*;				

Na osnovu rezultata iz tablice 6. je uočljivo da je hipoteza H2 prihvaćena.

5.3. Povezanosti veličine postaktivacijskih učinaka tijekom transverzalnog mjerenja i udjela brzokontraktilnih mišićnih vlakana

Kada je u pitanju korelacija između veličine promjene transverzalnih kontraktilnih parametara nakon aktivacijskog podražaja i udjela brzokontraktilnih vlakana kod mišića *vastus medialis*, ona je bila statistički značajna u oba slučaja, s vrijednosti Tc-a zabilježenom prije aktivacijskog podražaja i vrijednosti MHC-1 izračunatom na osnovu kontraktilnih parametara zabilježenih u pre-PAP mjerenju.

Tablica 7. Rezultati korelacijske analize

Korelacija		
	MHC1	TC_{PRE}
Δ%PAP	0,67**	0,55*
*Korelacija je značajna na razini p<0,05 **Korelacija je značajna na razini p<0,01		

Iz tablice 7. je uočljivo da su oba pokazatelja kompozicije mišića *vastus medialis* povezana s veličinom PAP učinaka primijećenih u ovoj studiji. Na osnovu ovih rezultata hipoteza H3 je djelomično prihvaćena.

5.4. Dekompozicija TMG signala

Iako među primarnim ciljevima ove disertacije nije bilo predstavljanje dekompozicije TMG odgovora na elektrostimulaciju, ali da je ista predstavljena u posljednjem dijelu rasprave, vezanom uz „Povezanost veličine PAP učinaka tijekom transverzalnog mjerenja i udjela

brzokontraktilnih mišićnih vlakana“ u nastavku je dana tablica (tablica 8.) aritmetičkih sredina, standardnih devijacija i razine statističke značajnosti razlika između pre-PAP i svih post-PAP mjerenja za parametre a_1, b_1 i c_1.

Tablica 8. Prosječne vrijednosti i standardne devijacije rezultata u varijablama a_1 b_1 i c_1 (a), a_2 b_2 i c_2 (b) i a_3 b_3 i c_3 (c) TMG mjerenja m.vastus lateralis-a. Statistička značajnost razlika između testiranja izračunata analizom varijance za ponovljena mjerenja sa LSD testom za ponovljena mjerenja

a) a_1 - F (7,4)=4,02; p=0,09; ES=0,87; b_1 - F (7,4)=3,54; p=0,12; ES=0,86; c_1 - F (7,4)=1,94; p=0,27; ES=0,77

Pre	Pre	0,5 min	1 min	2 min	3 min	5 min	7 min	10 min
a_1	4,80±1,60	6,36±2,08*	5,89±1,70	6,06±1,71	5,88±1,39	5,38±1,22	5,51±1,18	5,37±1,40
b_1	58,69±16,13	45,93±3,12	55,20±16,25	60,04±21,04	56,92±17,33	56,78±15,78	58,30±16,80	65,75±21,59
c_1	23,26±11,22	15,85±2,45	21,12±9,83	24,50±13,77	21,98±10,48	21,84±9,13	22,89±9,77	27,44±13,82

*Značajna razlika u odnosu na pre-PAP mjerenje

b) a_2 - F (7,4)=1,86; p=0,28; ES=0,77; b_2 - F (7,4)=0,76; p=0,65; ES=0,57; c_2 - F (7,4)=0,92; p=0,57; ES=0,62

Pre	Pre	0,5 min	1 min	2 min	3 min	5 min	7 min	10 min
a_2	4,87±2,07	5,13±1,67	5,23±1,81	5,25±1,98	4,75±1,74	5,61±2,03	5,22±2,04	5,29±2,20
b_2	109,49±46,75	81,47±7,40	87,98±20,07	97,55±42,99	88,47±24,29	103,89±31,14	94,86±28,19	108,46±48,90
c_2	48,69±23,52	38,09±6,22	42,53±11,94	42,99±16,09	38,36±9,11	49,27±17,33	41,34±10,77	47,41±23,68

*Značajna razlika u odnosu na pre-PAP mjerenje

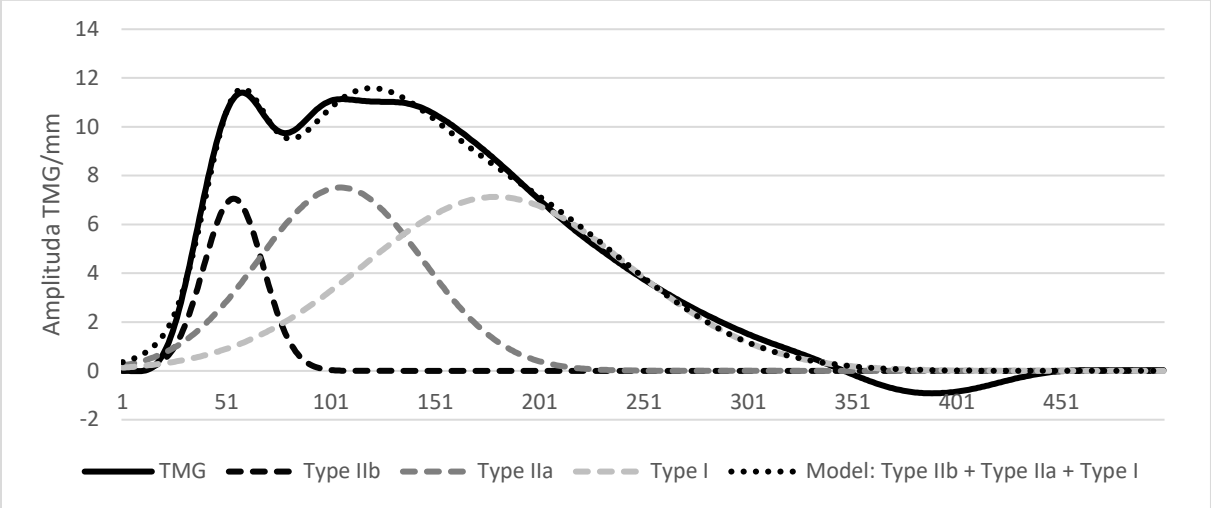
c) a_3 - F (7,4)=0,77; p=0,64; ES=0,57; b_3 - F (7,4)=11,22; p=0,02; ES=0,95; c_3 - F (7,4)=2,26; p=0,22; ES=0,79

Pre	Pre	0,5 min	1 min	2 min	3 min	5 min	7 min	10 min
a_3	5,35±1,91	5,59±1,70	5,80±1,92	6,09±1,12	6,76±1,97	6,05±2,31	6,2±2,02	5,64±1,58
b_3	126,83±35,65	157,44±23,84	156,38±41,86	137,59±46,47	150,10±40,73	135,04±52,45	148,34±39,19	119,95±45,54
c_3	59,63±20,85	75,45±23,63	77,39±22,91	68,14±26,74	74,40±23,67	64,57±28,42	70,28±22,09	57,79±26,62

*Značajna razlika u odnosu na pre-PAP mjerenje

Iz tablice 8. $_{(a, b, c)}$ može se uočiti da se statistički značajna razlika u odnosu na pre-PAP mjerenje javila kod parametra a_1, koji predstavlja amplitudu tipa IIb mišićnih vlakana. Iako ne statistički značajno, može se primijetiti trend smanjenja vremenskih parametara b_1 i c_1. Sličan trend je

zabilježen i kod a_2, b_2 i c_2, koji predstavljaju tip IIa mišićnih vlakana i a_3, dok je kod b_3 i c_3 (vremenskih parametara tip I mišićnih vlakana) primijećeno povećanje vrijednosti u odnosu na pre-PAP mjerenje. U nastavku je dan prikaz dekompozicije TMG signala za jednog ispitanika (slika 7.)



Slika 7. Prikaz dekompozicije TMG signala za jednog ispitanika

6. RASPRAVA

U 6. poglavlju, kronološkim redom, a u skladu s postavljenim hipotezama i redoslijedom predstavljenih rezultata, bit će predstavljene sve tri hipoteze.

Dobiveni rezultati detaljno su obrazloženi u sljedećim potpoglavljima.

U potpoglavlju 6.1. detaljno se raspravlja o učincima aktivacijskog podražaja na kontraktilne parametre tijekom longitudinalnog i transverzalnog mjerenja kod oba testirana mišića te potencijalnim pozadinskim mehanizmima. Nakon toga, u potpoglavlju 6.2. detaljno se raspravlja o razlikama između kontraktilnih parametara tijekom longitudinalnog i transverzalnog mjerenja kod oba testirana mišića te o potencijalnim pozadinskim mehanizmima, dok se u potpoglavlju 6.3. detaljno raspravlja o povezanosti veličine PAP učinaka tijekom transverzalnog mjerenja i udjela brzokontraktilnih mišićnih vlakana.

6.1. Učinci postaktivacijske potencijacije na kontraktilne parametre mišića

Najočitiji akutni učinak prethodnih visokointenzivnih ili visokoobimnih aktivnosti jest gubitak sposobnosti generiranja sile (MacIntosh i Rassier, 2002). Međutim, primijećeno je da kontraktilna povijest može rezultirati i poboljšanjem izvedbe (Smith i Fry, 2007; Grange i sur., 1993; Sweeney i sur., 1993). Dosadašnje studije su pokazala pozitivne učinke PAP-a na veličinu živčane aktivacije (Hamada i sur., 2000a; Moore i Stull, 1984; Suzuki i sur., 1988), ali i kontraktilne karakteristike (Hamada i sur., 2000a; Vandervoort i sur., 1983).

U većini dosadašnjih studija je primijećeno da značajna razlika postoji između kontraktilnih parametara mišića prije i nakon maksimalne voljne kontrakcije (Babault i sur., 2007). Neki autori (Chiu i sur., 2003; Davies i sur., 1982) čak navode da je nakon aktivacijskog protokola došlo do promjena u kontraktilnim svojstvima mišića iako njih nisu izolirano procjenjivali.

Procentualno, ukoliko su kontrakcije (ili kontraktilni parametri) nakon aktivacijskog podražaja 100% inicijalnih vrijednosti, PAP se nije javio, dok, vrijednost veća od 100% ukazuje na prisustvo PAP-a, a niža od 100% ukazuje na „postaktivacijsku depresiju" (Mola i sur., 2014) ili dominaciju nastalog zamora (Chiu i sur., 2003). U ostatku teksta će promjene u mjerenjima nakon aktivacijskog podražaja biti predstavljane procentualno u odnosu na inicijalno mjerenje.

Shima i suradnici (2006) u svojoj studiji navode da se pomoću MMG metoda mogu primijetiti akutni PAP učinci te da se promjena u kontraktilnim parametrima mišića može pripisati

isključivo intrinzičnim mehaničkim promjenama. Međutim, izuzev Shime i suradnika (2006) koji su MMG-om procjenjivali PAP učinke tijekom elektrostimulacije tibijalnog nerva, u dosadašnjoj literaturi se ne može pronaći nijedna studija u kojoj su učinci PAP-a evaluirani bočnim oscilacijama mišića tijekom perkutane elektrostimulacije. Upravo zbog toga, kada je u pitanju prvi dio diskusije rezultata ove studije, on je podijeljen u dva dijela te su individualno predstavljeni PAP učinci na longitudinalno i transverzalno mjerene kontraktilne parametre.

Rezultati ovog istraživanja ukazuju na to da se nakon aktivacijskog podražaja javljaju promjene u kontraktilnim parametrima oba testirana mišića prilikom oba tipa testiranja. Međutim, kao što se može primijetiti u prethodnom poglavlju, aktivacijski podražaj, u ovom slučaju 5 petosekundnih maksimalnih voljnih izometrijskih kontrakcija, nije rezultiralo statistički značajnim akutnim učincima na sve kontraktilne parametre pri svim tipovima testiranja kod oba testirana mišića.

Kada je u pitanju hipoteza H1, ona je prihvaćena, jer, kao što se može vidjeti iz prethodnog poglavlja, kontraktilni parametri nakon aktivacijskog podražaja statistički se značajno razlikuju od onih zabilježenih u pre-PAP mjerenju kod oba tipa testiranja i oba testirana mišića. Također, važno je napomenuti da, iako PAP rezultira promjenama u svim kontraktilnim parametrima te da se najveći učinci mogu primijetiti na najvećoj amplitudi (Dm) i vremenu kontrakcije (Tc), što je u skladu s većinom dosadašnjim studija, učinci se razlikuju, kako između mišića, tako i između metoda testiranja. Upravo zbog toga, u nastavku su predstavljeni učinci zabilježeni na pojedinačne kontraktilne parametre tijekom longitudinalnog (potpoglavlja 6.1.1.1.–6.1.1.4.) i transverzalnog (potpoglavlja 6.1.2.1.–6.1.2.4.) testiranja te pozadinski mehanizmi (potpoglavlje 6.1.3.) odgovorni za nastajanje zabilježenih promjena.

6.1.1. Učinci postaktivacijske potencijacije na longitudinalne kontraktilne parametre mišića

U ovom potpoglavlju su predstavljeni učinci zabilježeni tijekom izometrijskog, longitudinalnog testiranja i to sljedećim redoslijedom: 1. Dm, 2. Tc, 3. Tr i 4. Ts

6.1.1.1. Longitudinalni Dm

Najveća amplituda longitudinalno mjerenog odgovora mišića na električnu stimulaciju je primjenjivana i u nekim dosadašnjim studijama (Behm i sur., 2004; Pääsuke i sur., 2007; Mitchell i Sale, 2011 i dr.).

Dm je, kao i svi ostali kontraktilni parametri, u ovoj studiji mjeren na dvije glave kvadricepsa. Kod oba testirana mišića je došlo do statistički značajnih promjena već 30 sekundi nakon AP-a, ali veličina učinaka, kao i vremenski tijek, su bili nešto različiti između mišića, što će biti predstavljeno pojedinačno za obje mišićne glave.

Kada je u pitanju mišić *vastus lateralis*, statistički značajna razlika u odnosu na pre-PAP mjerenje je primijećena već u prvom post-PAP mjerenju (nakon 30 sekundi). U ovom mjerenju, vrijednost Dm-a je bila povećana za 56,6% što ukazuje na prisustvo i djelovanje PAP učinaka. Statistički značajne razlike u odnosu na pre-PAP mjerenje su primijećene sve do pete minute nakon aktivacijskog podražaja, u kojoj je vrijednost Dm-a bila uvećana za 14,3%.

Najveći PAP učinci su primijećeni 30 sekundi nakon AP-a te je njihova razina opadala sve do sedme minute kada se vrijednost Dm-a vratila na inicijalnu razinu. Promjene koje su zabilježene 30 sekundi nakon AP-a statistički su se značajno razlikovale od istog te je tako, već nakon prve minute (nakon AP-a) Dm bio 43,7% veći u odnosu na pre-PAP i -8,3% u odnosu na prvo post-PAP mjerenje (30 s). Ovi nalazi ukazuju da je veličina PAP učinaka počela da se smanjuje odmah nakon najviše zabilježene.

Kod mišića *vastus medialis* su primijećeni relativno slični PAP učinci. Naime, kao što je to slučaj kod mišića *vastus lateralis*, i kod ovog mišića je primijećena statistički značajna razlika u odnosu na pre-PAP mjerenje već u prvom post-PAP mjerenju. Međutim, veličina učinaka je bila nešto drugačija te je vrijednost Dm-a 30 sekundi nakon AP-a bila 63,5% veća u odnosu na pre-PAP mjerenje. Ovo je također pokazatelj prisustva PAP učinaka. Statistički značajne razlike u odnosu na pre-PAP mjerenje su primijećene sve do treće minute nakon aktivacijskog podražaja u kojoj je vrijednost Dm-a bila uvećana za 20,1%.

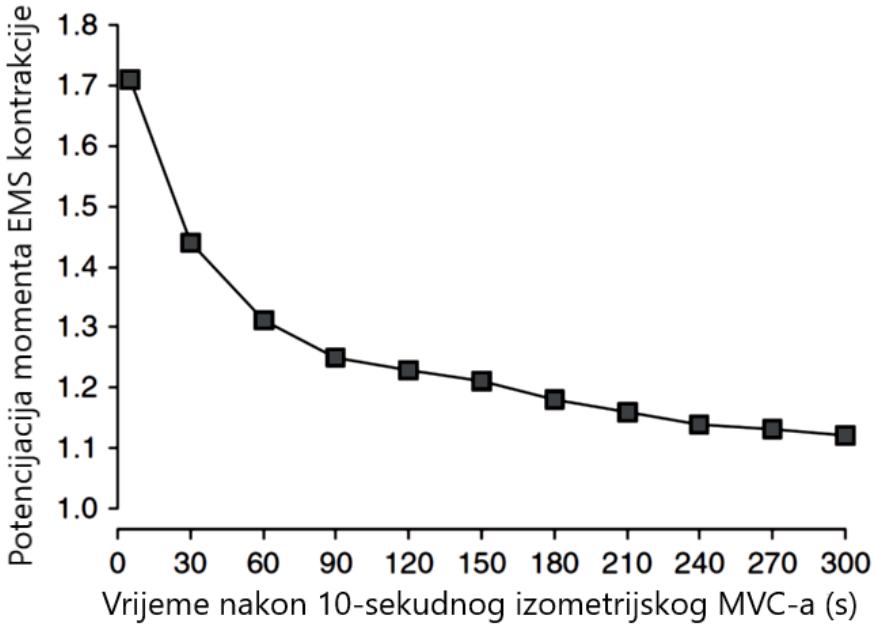
Kao i kod mišića *vastus lateralis*, najveći PAP učinci su primijećeni 30 sekundi nakon AP-a i kod mišića *vastus medialis*, međutim, kada je u pitanju ovaj mišić, vrijednost Dm-a se vratila na inicijalnu razinu već u petoj minuti nakon aktivacijskog podražaja. Nadalje, promjene koje su zabilježene 30 sekundi nakon AP-a statistički su se značajno razlikovale od istih te je tako, već nakon prve minute (nakon AP-a) Dm bio veći (34,4%) u odnosu na pre-PAP i manji (-17,8%) u odnosu na prvo post-PAP mjerenje. Ovi nalazi, također, ukazuju da se veličina PAP učinaka počela smanjivati odmah nakon najviše zabilježene, ali, da je, kada je u pitanju *m. vastus medialis*, pad PAP učinka nešto veći i kraći u odnosu na *m. vastus lateralis*.

Kada je u pitanju Dm, rezultati zabilježeni u ovoj studiji su u skladu s rezultatima dosadašnjih studija. Tako, najveći napredak od 56,6% i 63,5%, koji je zabilježen nakon 5 RM izometrijskog protokola u ovoj studiji, u skladu je s rezultatima koje su dobili Behm i suradnici (2004), Pääsuke i suradnici (2007), Michell i Sale (2011), Miyamoto i suradnici (2010), Hamada i suradnici (2000), Requena i suradnici (2008), Baudry i suradnici (2005), Baudry i Duchateau (2004) te Gago i suradnici (2014), koji su zabilježili promjene u rasponu od 10,7% i 55,6%. Ovi rezultati ukazuju na postojanje PAP učinaka nakon aktivacijskog podražaja, međutim, razlike koje su očigledne u dosadašnjim studijama mogu se pripisati različitim aktivacijskim podražajima. Tako, na primjer, u studiji koju su proveli Mitchell i Sale (2011), gdje su zabilježili najmanje pozitivne statistički značajne razlike, korišten je izotonični aktivacijski podražaj, koji je podrazumijevao jednu seriju 5 RM stražnjeg čučnja, dok je u studiji Behma i suradnika (2004), kod kojih je primijećena najveća razlika između pre- i post-PAP mjerenja, aktivacijski podražaj podrazumijevao 3x10 sekundi maksimalne voljne izometrijske kontrakcije.

U skladu s navedenim, može se pretpostaviti da bi primjena aktivacijskog podražaja drugačijih parametara rezultirala drugačijim rezultatima. Tako, na primjer, na osnovu studije koju su proveli Gago i suradnici (2014), koji su komparirali PAP učinke nakon različitih aktivacijskih podražaja, može se pretpostaviti da bi uporaba ekscentričnog aktivacijskog podražaja (u bilo kojem obliku) rezultirala nešto manjim rezultatima.

Međutim, iako se rezultati ove studije ne razlikuju od većine dosadašnjih studija, vrijedi navesti i jedinu studiju u kojoj su autori primijetili nešto drugačije rezultate. Naime, Jordan i suradnici (2010) su u svojoj studiji primijetili rezultate oprečne rezultatima ove, ali i svih prethodno navedenih studija. Oni su u svojoj studiji primijetili postaktivacijsku depresiju, odnosno, pad amplitude mišićnog odgovora kod eksperimentalne (-4,4%), ali i kontrolne (-19,5%) skupine jednu minutu nakon aktivacijskog podražaja. Razlozi neslaganja sa studijama drugih autora mogu se pronaći u trajanju i tipu aktivacijskog podražaja. Dok je većina aktivacijskih podražaja u dosadašnjim studijama bila u trajanju do 30 sekundi, ovi autori su primijenili 3×60 sekundi izometrijskog čučnja na vibracijskoj platformi. Pretpostavlja se da je ovaj aktivacijski podražaj rezultirao većom razinom lokalnog mišićnog zamora od potencijacije čime su autori dodatno skrenuli pažnju na interakciju između potencijacije i zamora (detaljnije o interakciji PAP/zamor u poglavlju 6.1.3.).

Kada je u pitanju duljina trajanja PAP učinaka na Dm, rezultati ukazuju na različite odgovore dva testirana mišića. Međutim, s obzirom na to da je u studiji Hamade i suradnika (2000) primijećeno povećanje Dm-a u rasponu 34–114% od inicijalne vrijednosti odmah nakon te i statistički značajno povećana vrijednost (~12%) 5 minuta nakon AP-a, uočljivo je da su veličina, ali i vremenski tijek učinaka bili u skladu s dosadašnjim studijama. Pored toga, nalaz da se vrijednost Dm-a, zabilježena u desetoj post-PAP minuti, ne razlikuje od pre-PAP vrijednosti u skladu je s većinom dosadašnjih studija (Vandervoort i sur., 1983; Hamada i sur., 2000b; Baudry i Duchateau, 2004). U dosadašnjoj literaturi se mogu naći i pojedinačne studije u kojima su primijećeni daleko duži PAP učinci, kao npr. 30 minuta u studiji Rixona i suradnika (2007), međutim, ovi nalazi nisu potvrđeni ni u jednoj naknadnoj studiji.



Slika 8. Vremenski tijek PAP učinaka na longitudinalni Dm primijećen u studiji Hamade i suradnika (2000)

Iako se razlike mogu primijetiti između različitih studija, razlike u duljini učinaka su primijećene u pojedinačnim studijama. Tako su, na primjer, Gago i suradnici (2014a) u svojoj studiji primijetili statistički značajne PAP učinke 4 minute nakon 4 dinamička (spori/brzi x koncentrični/ekscentrični) i 5 minuta nakon izometrijskog aktivacijskog protokola. Kada je u pitanju izometrijski aktivacijski podražaj, u studiji koju su proveli Gago i suradnici (2014a), Dm je tijekom elektrostimulirane kontrakcije 5 sekundi nakon aktivacijskog podražaja bio 67% veći od pre-PAP vrijednosti te je, nakon 5 minuta (još uvijek statistički značajno) bio 11% veći od inicijalne vrijednosti. Vrijedi napomenuti da je PAP učinak nakon izometrijskog aktivacijskog podražaja bio veći od onog zabilježenog nakon ekscentričnog aktivacijskog

podražaja tijekom svih točki mjerenja, dok su vrijednosti nakon koncentričnog bile veće od izometrijskog tijekom prve dvije minute nakon čega su, ipak, zabilježene veće vrijednosti kod izometrijskog protokola.

Vremenski tijek djelovanja PAP učinaka također se ne razlikuje te je u ovoj, kao i u prethodnim (Pääsuke i sur., 2007; Miyamoto i sur., 2010, 2013; Hamada i sur., 2000; Baudry i Duchateau, 2004; Gago i sur., 2014), primijećeno najveće povećanje vrijednosti Dm-a u prvom post-PAP mjerenju te i progresivno smanjenje istog u naknadnim.

6.1.1.2. Longitudinalni Tc

Pored amplitude, a kao što se može vidjeti iz rezultata predstavljenih u prethodnom poglavlju, PAP utječe i na vremenske parametre elektrostimulirane kontrakcije. Ovo je također primijećeno u nekim ranijim studijama (Garner i sur., 1989; Grange i Houston, 1991; Hicks i sur., 1991; O'Leary i sur., 1997; Sweeney i sur., 1993; Binder-Macleod i sur., 2002; Hamada i sur., 2000; Sale, 2002), međutim, iako komparacija učinaka na dva testirana mišića nije cilj ovog rada, može se primijetiti da se učinci zabilježeni između dva testirana mišića razlikuju.

Statistički značajne razlike su se, kod Tc-a, nakon aktivacijskog podražaja javile kod mišića *vastus medialis*, dok je vrijeme kontrakcije kod mišića *vastus lateralis* ostalo nepromijenjeno. Samim time, uočljivo je da ovim tipom testiranja nisu primijećeni PAP učinci na drugom mišiću.

Kada je u pitanju izostanak PAP učinaka, koji je primijećen kod mišića *vastus lateralis*, isto je primijećeno i u studijama koje su proveli Petrella i suradnici (1989), Klass i suradnici (2004) te Lanza i suradnici (2003), međutim, razlikuje se od nekih drugih studija. One će biti detaljno predstavljene nakon rasprave o rezultatima kod mišića *vastus medialis*.

Nasuprot mišiću *vastus lateralis*, kod mišića *vastus medialis* su se javile statistički značajne razlike između mjerenja. Razlika u odnosu na pre-PAP mjerenje je primijećena isključivo 30 sekundi nakon aktivacijskog podražaja. Vrijeme kontrakcije je u ovom mjerenju bilo uvećano za 16,1%. Nakon toga, vrijeme kontrakcije se vratilo na pre-PAP razinu. Ovi nalazi ukazuju na kratkotrajne učinke na vrijeme kontrakcije.

Kada su u pitanju rezultati dosadašnjih studija, oni se uglavnom razlikuju od ove. Tako, na primjer, Kernell i suradnici (1975), Vandervoort i suradnici (1983) te Alway i suradnici (1987) su u svojim studijama, koje se mogu smatrati temeljnim u analizi PAP-a, primijetili skraćeno

vrijeme kontrakcije nakon aktivacijskog podražaja. Ovi nalazi, da je vrijeme kontrakcije tijekom PAP-a smanjeno, provjereni su i potvrđeni i u nekim kasnijim studijama (O'Leary i sur., 1997; Hamada i sur., 2000; Gago i sur., 2014). Ovakve promjene su primijećene na ekstenzorima koljena (Hamada i sur., 2000), plantarnim (Vandervoort i sur., 1983) i dorzalnim (O'Leary i sur., 1997, 1998) fleksorima, te, pored činjenice da se PAP javlja kod svih mišićnih skupina, on se javlja i nakon svih tipova aktivacijskog podražaja. Tako su, na primjer, Baudry i Duchateau (2004) primijetili statistički značajnu promjenu kontraktilnih parametara, primarno vremena kontrakcije i polurelaksacije, nakon 6 sekundi izometrijske, koncentrične i ekscentrične maksimalne voljne kontrakcije.

Uzimajući u obzir prethodno navedene studije i različite promjene kod dva testirana mišića, koje su primijećene u ovoj studiji, može se pretpostaviti da su, a kako to navode u prethodnim istraživanjima (MacIntosh i sur., 1994; Rassier i MacIntosh, 2000), različiti omjeri lokalnog mišićnog zamora rezultirali ovakvim promjenama. Konkretno objašnjenje ovakvih rezultata bi mogla biti povećana razina lokalnog mišićnog zamora. Naime, kako MacIntosh i suradnici (1994) navode u svojoj studiji, lokalni mišićni zamor ima djelovanje oprečno PAP djelovanju te može rezultirati sporijim vremenom kontrakcije, ili pak, ukoliko su razina PAP-a i zamora jednake (Rassier i MacIntosh, 2000), neće doći do promjene u vremenu kontrakcije (detaljnije u 6.1.3.).

Iako različiti od većine dosadašnjih studija, ovakvi rezultati se mogu naći u literaturi. Requena i suradnici (2008), na primjer, nisu primijetili promjene u vremenu kontrakcije nakon submaksimalnog voljnog, ali ni elektrostimuliranog aktivacijskog podražaja, dok su Hamada i suradnici (2003) primijetili povećanje vremena kontrakcije tijekom povećane razine lokalnog mišićnog zamora (u odnosu na PAP).

6.1.1.3. Longitudinalni Tr

Kao i prethodni parametri, i vrijeme polurelaksacije je mjereno na dvije glave kvadricepsa. Prilikom longitudinalne procjene nisu primijećene statistički značajne razlike između vremena polurelaksacije u različitim točkama mjerenja. Ovo ukazuje na izostanak PAP učinaka na ovaj parametar. Pored vremena kontrakcije, vrijeme polurelaksacije je procjenjivano i u nekim dosadašnjim studijama (Requena i sur., 2008; Baudry i sur., 2005 i dr.).

Kada je u pitanju izostanak PAP učinaka na vrijeme polurelaksacije, isto je primijećeno u studijama koje su proveli Petrella i suradnici (1989), Requena i suradnici (2008) te Miyamoto

i suradnici (2011), međutim, teorijska osnova, ali i neke druge studije ukazuju da se uslijed djelovanja PAP učinaka vrijeme polurelaksacije mijenja.

U većini studija u kojima su procjenjivani PAP učinci na vrijeme polurelaksacije primijećeno je smanjenje vrijednosti Tr-a (Hamada i sur., 2000; Requena i sur., 2008; Gago i sur., 2014), međutim, uslijed povećane razine lokalnog mišićnog zamora, može se primijetiti i povećanje tog parametra. Tako su, na primjer, Hamada i suradnici (2003) primijetili povećanje vremena polurelaksacije tijekom povećane razine lokalnog mišićnog zamora (u odnosu na PAP), te pored toga, da se s povećanjem lokalnog mišićnog zamora povećava i vrijeme polurelaksacije. Slične učinke su primijetili i Pääsuke i suradnici (2007) kod djevojaka koje su uključene u trening jakosti i snage.

6.1.1.4. Longitudinalni Ts

Izuzev vremena kontrakcije i polurelaksacije, koji su procjenjivani i u dosadašnjim studijama, vrijeme održanja iznad 50% amplitude (po znanju autora) nije evaluirano ni u jednoj dosadašnjoj studiji. Nadalje, baš kao što je to slučaj u prethodnoj varijabli, prilikom longitudinalne procjene nisu primijećene statistički značajne razlike između vremena održanja iznad 50% amplitude u različitim točkama mjerenja. Ovo ukazuje na izostanak PAP učinaka na ovaj parametar.

Kada je u pitanju izostanak PAP učinaka u ovoj varijabli, on se najjednostavnije može objasniti izravnom ovisnošću ove varijable o dvjema prethodno pomenutim varijablama (Tc i Tr). Naime, potencijacija izometrijskih elektrostimuliranih kontrakcija ogleda se kroz skraćenje vremena kontrakcije i polurelaksacije (Vandervoort i sur., 1983; Hamada i sur., 2000), odnosno, povećanom stopom razvoja sile i relaksacije mišića (Grange i sur., 1993; Pääsuke i sur., 1998, 2007; Baudry i Duchateau, 2004), te stoga, a s obzirom na to da vrijeme održanja sile izravno ovisi o ovim dvama parametrima, jasno je da će zbog izostanka promjena u nekom od ova dva parametra, ili pak oba parametra, kako je to slučaj kod mišića *vastus lateralis*, izostati promjena i u vremenu održanja amplitude iznad 50%.

6.1.2. Učinci postaktivacijske potencijacije na transverzalne kontraktilne parametre mišića

U ovom potpoglavlju su predstavljeni učinci zabilježeni tijekom izometrijskog, transverzalnog testiranja i to sljedećim redoslijedom: 1. Dm, 2. Tc, 3. Tr i 4. Ts

S obzirom na to da su u prethodnim potpoglavljima rezultati ovog istraživanja kompарirani sa prethodnim studijama, u narednim potpoglavljima će samo biti predstavljene karakteristike PAP učinaka zabilježene transverzalnim mjerenjem. S dosadašnjim studijama će biti kompарirane isključivo one koje se razlikuju od onih zabilježenih prilikom longitudinalnog mjerenja te će one biti detaljno kompарirane u idućem potpoglavlju (6.2.).

6.1.2.1. Transverzalni Dm

Najveća amplituda longitudinalno mjerenog odgovora mišića na električnu stimulaciju primjenjivana je i u nekim dosadašnjim studijama (Behm i sur., 2004; Pääsuke i sur., 2007; Mitchell i Sale, 2011 i dr.). Međutim, prema saznanju autora, u dosadašnjim istraživanjima ne postoji studija koje je proučavala PAP učinke procjenom transverzalnih kontraktilnih parametara. U skladu s tim, jedan od ciljeva ove disertacije bio je ustanoviti veličinu PAP učinaka na transverzalni, tenziomiografski, mišićni odgovor.

Transverzalni Dm je, kao i longitudinalni kontraktilni parametri, u ovoj studiji istovremeno mjeren na dvije glave kvadricepsa. Kod oba testirana mišića došlo je do statistički značajnih promjena odmah u prvoj točki mjerenja, ali, veličina učinaka, kao i vremenski tijek, bili su nešto različiti te će oni biti predstavljeni pojedinačno za obje mišićne glave.

Kod mišića *vastus lateralis* statistički značajna razlika u odnosu na pre-PAP mjerenje primijećena je već 30 sekundi nakon aktivacijskog podražaja. U ovom mjerenju, vrijednost Dm-a je bila povećana za 35,9%, što ukazuje na prisustvo i djelovanje PAP učinaka. Statistički značajne razlike u odnosu na pre-PAP mjerenje primijećene su sve do sedme minute nakon aktivacijskog podražaja, u kojoj je vrijednost Dm-a bila uvećana za 20%.

Najveći PAP učinci su primijećeni 30 sekundi nakon AP-a, a razina postaktivacijske potencijacije, mjerena transverzalnim mišićnim odgovorom, nije se razlikovala od prvog post-PAP mjerenja (30 s) sve do pete minute nakon čega se desio pad vrijednosti te je, u sedmoj minuti nakon aktivacijskog podražaja, primijećen rezultat statistički značajno viši od pre-PAP, ali i niži od onog zabilježenog 30 sekundi nakon AP-a (-11,4%), dok se povratak na inicijalnu (pre-PAP) razinu desio tek u desetoj minuti nakon aktivacijskog podražaja. Ovi nalazi ukazuju na to da se tijekom djelovanja PAP učinaka, prilikom transverzalnog mjerenja javlja povećanje, koje je konstantno (plato), u izvedbi koja traje sve do pete minute nakon aktivacijskog podražaja.

Kod mišića *vastus medialis* primijećeni su nešto niži PAP učinci. Naime, kao što je to slučaj kod mišića *vastus lateralis*, i kod ovog mišića je primijećena statistički značajna razlika u odnosu na pre-PAP mjerenje već u prvom post-PAP mjerenju. Međutim, vrijednost Dm-a u prvom post-PAP mjerenju je bila 17,8% veća u odnosu na pre-PAP mjerenje. Ovo je također pokazatelj prisustva PAP učinaka. Statistički značajne razlike u odnosu na pre-PAP mjerenje primijećene su sve do treće minute nakon aktivacijskog podražaja, u kojoj je vrijednost Dm-a bila uvećana za 14,7%.

Kao i kod mišića *vastus lateralis*, najveći PAP učinci primijećeni su 30 sekundi nakon aktivacijskog podražaja i kod mišića *vastus medialis*, međutim, kada je u pitanju ovaj mišić, vrijednost Dm-a se vratila na inicijalnu razinu već u petoj minuti nakon AP-a. Nadalje, promjene koje su zabilježene 30 sekundi nakon AP-a nisu se statistički značajno razlikovale od njega sve do desete minute nakon AP-a. Ovi nalazi ukazuju na to da se tijekom djelovanja PAP učinaka, prilikom transverzalnog mjerenja javlja povećanje, koje je konstantno (plato), u izvedbi koje u nešto kraćem trajanju, u odnosu na *vastus lateralis*, kod mišića *vastus medialis* djeluje sve do treće minute nakon aktivacijskog podražaja.

6.1.2.2. Transverzalni Tc

Kada je u pitanju transverzalno vrijeme kontrakcije, kod oba testirana mišića primijećene su statistički značajne razlike u post-PAP u odnosu na pre-PAP mjerenje, ali veličina učinaka, kao i vremenski tijek, bili su nešto različiti te će oni biti predstavljeni pojedinačno za obje mišićne glave.

Kada je u pitanju mišić *vastus lateralis*, statistički značajna razlika u odnosu na pre-PAP mjerenje primijećena je već 30 sekundi nakon AP-a. U ovom mjerenju vrijednost Tc-a je bila umanjena te je zabilježena vrijednost bila -9,2% niža od pre-PAP mjerenja što ukazuje na prisustvo i djelovanje PAP učinaka. Statistički značajne razlike u odnosu na pre-PAP mjerenje primijećene su tijekom prve minute nakon aktivacijskog podražaja na koncu koje je vrijednost Tc-a bila -7% od pre-PAP vrijednosti.

Najveći PAP učinci su primijećeni 30 sekundi nakon AP-a te je njegova razina ostala konstantna (nije se statistički značajno razlikovala između vrijednosti zabilježenih 30 sekundi i jedne minute nakon AP-a) tijekom prve minute nakon aktivacijskog podražaja. Povratak na inicijalnu vrijednost je zabilježen već tijekom druge minute nakon aktivacijskog podražaja. Ovi nalazi ukazuju na to da se tijekom djelovanja PAP učinaka, prilikom transverzalnog mjerenja javlja

smanjenje vremena kontrakcije, koje je konstantno (plato), te traje isključivo jednu minutu nakon aktivacijskog podražaja.

Kod mišića *vastus medialis* primijećeni su nešto drugačiji PAP učinci na Tc. Naime, kao što je to slučaj kod mišića *vastus lateralis*, i kod ovog mišića je primijećena statistički značajna razlika u odnosu na pre-PAP mjerenje već 30 sekundi nakon AP-a. Međutim, veličina učinaka je bila nešto drugačija te je vrijednost Tc-a u ovoj točki mjerenja (30 sekundi nakon AP-a) bila -16,4% u odnosu na pre-PAP mjerenje. Ovo je također pokazatelj prisustva PAP učinaka. Statistički značajne razlike u odnosu na pre-PAP mjerenje primijećene su do druge minute nakon aktivacijskog podražaja u kojoj je vrijednost Tc-a bila -8,7% u odnosu na pre-PAP mjerenje.

Kao i kod mišića *vastus lateralis*, najveći PAP učinci su primijećeni 30 sekundi nakon AP-a i kod mišića *vastus medialis*, međutim, kada je u pitanju ovaj mišić, vrijednost Tc-a se vratila na inicijalnu razinu u trećoj minuti nakon aktivacijskog podražaja. Nadalje, promjene koje su zabilježene nakon 30 sekundi statistički su se značajno razlikovale od istog te je tako, već nakon prve minute (nakon AP-a) Tc bio manji (-10,4%) u odnosu na pre-PAP i veći (7,2%) u odnosu na vrijednost zabilježenu 30 sekundi nakon aktivacijskog podražaja. Ovi nalazi, za razliku od onih zabilježenih kod mišića *vastus lateralis*, kod kojih se može primijetiti plato, ukazuju na to da se veličina PAP učinaka počela smanjivati odmah nakon najviše zabilježene, te, da je, kada je u pitanju *m. vastus medialis*, povratak vrijednosti Tc-a bio nešto sporiji u odnosu na *m. vastus lateralis*.

Ovakve promjene u vremenskim parametrima elektrostimulirane kontrakcije primijećene su i u nekim prethodnim studijama (Kernell i sur., 1975; Vandervoort i sur., 1983; Alway i sur.,1987; O'Leary i sur., 1997; Hamada i sur., 2000; Gago i sur., 2014). Svi navedeni autori su u svojim studijama primijetili skraćeno vrijeme kontrakcije nakon aktivacijskog podražaja. Pored toga, u dosadašnjim studijama je primijećeno da PAP učinak, kod skeletne muskulature, mjeren elektrostimuliranim izometrijskim kontrakcijama, dostiže maksimalnu vrijednost odmah nakon aktivacijskog podražaja (Hamada i sur., 2000; Baudry i Duchateau, 2004; Shima i sur., 2006; Pääsuke i sur., 2007), progresivno opada tijekom vremena te je primijećen i do desete minute nakon aktivacijskog podražaja (Vandervoort i sur., 1983; Hamada i sur., 2000; Baudry i Duchateau, 2004).

Vremenski slijed koji je primijećen u dosadašnjim studijama primijećen je i u ovoj. Međutim, učinci PAP-a na vremenske parametre, zabilježeni u ovoj studiji, trajali su nešto kraće u odnosu na dosadašnje studije. Tako, rezultati ove studije ukazuju da se vrijeme kontrakcije statistički značajno razlikovalo od pre-PAP mjerenja jednu minutu kod mišića *vastus lateralis* i dvije minute kod mišića *vastus medialis* te da su, kao što je to bio slučaj i u prethodnim studijama, učinci bili najveći u prvom post-PAP mjerenju.

6.1.2.3. Transverzalni Tr

Kod oba testirana mišića primijećene su statistički značajne razlike u Tr-u u post-PAP u odnosu na pre-PAP mjerenje, ali, veličina učinaka, kao i vremenski tijek, baš kao što je to bio slučaj u nekim prethodnim varijablama, su bili nešto različiti te će oni biti predstavljeni pojedinačno za obje mišićne glave.

Kada je u pitanju *m. vastus lateralis*, statistički značajna razlika u odnosu na pre-PAP mjerenje primijećena je već 30 sekundi nakon aktivacijskog podražaja. U ovom mjerenju, vrijednost Tr-a je bila umanjena te je zabilježena vrijednost bila -56,2% niža od pre-PAP mjerenja, što ukazuje na prisustvo i djelovanje PAP učinaka. Statistički značajne razlike u odnosu na pre-PAP mjerenje primijećene su tijekom prve minute nakon aktivacijskog podražaja, na koncu koje je vrijeme polurelaksacije bilo -49% od pre-PAP vrijednosti.

Najveći PAP učinci su primijećeni u prvom post-PAP mjerenju te je njegova razina ostala konstantna (nije se statistički značajno razlikovala između prvog i drugog post-PAP mjerenja) tijekom prve minute nakon aktivacijskog podražaja. Povratak na razinu koja se ne razlikuje statistički značajno od pre-PAP vrijednosti zabilježen je već tijekom druge minute nakon aktivacijskog podražaja. Ovi nalazi ukazuju da se tijekom djelovanja PAP učinaka, prilikom transverzalnog mjerenja javlja smanjenje vremena polurelaksacije, koje je konstantno (plato) te traje jednu minutu nakon aktivacijskog podražaja.

Kod mišića *vastus medialis* primijećeni su nešto drugačiji učinci. Naime, za razliku od mišića *vastus lateralis*, kod ovog mišića je primijećena statistički značajna razlika u odnosu na pre-PAP mjerenje tek u drugom post-PAP mjerenju (jednu minutu nakon aktivacijskog podražaja). Međutim, učinci su bili nešto drugačiji. Naime, vrijednost Tr-a u drugom post-PAP mjerenju je bila skoro udvostručena te je imala 97% veću vrijednost u odnosu na pre-PAP mjerenje. Statistički značajne razlike u odnosu na pre-PAP mjerenje su primijećene sve do treće minute

nakon aktivacijskog podražaja tijekom koje je vrijednost Tr-a bila 102% veća od pre-PAP vrijednosti.

Za razliku od mišića *vastus lateralis*, statistički značajna razlika u odnosu na pre-PAP javila se jednu minutu nakon aktivacijskog podražaja te se u drugoj minuti (nakon aktivacijskog podražaja) dodatno povećala i bila čak 156,7% veća u odnosu na inicijalno mjerenje. Povratak na razinu koja se ne razlikuje statistički značajno od pre-PAP vrijednosti je zabilježen tijekom pete minute nakon aktivacijskog podražaja. Mjerenja u kojima je zabilježena povećana vrijednost Tr-a nisu se razlikovala statistički značajno, što ukazuje da se i u ovom slučaju javio plato, ali djelovanja suprotnog onome primijećenom kod mišića *vastus lateralis*. Ovi nalazi, međutim, ukazuju na povećano prisustvo lokalnog mišićnog zamora, koji je, u ovom slučaju, nadjačao PAP učinke (Hamada i sur., 2003).

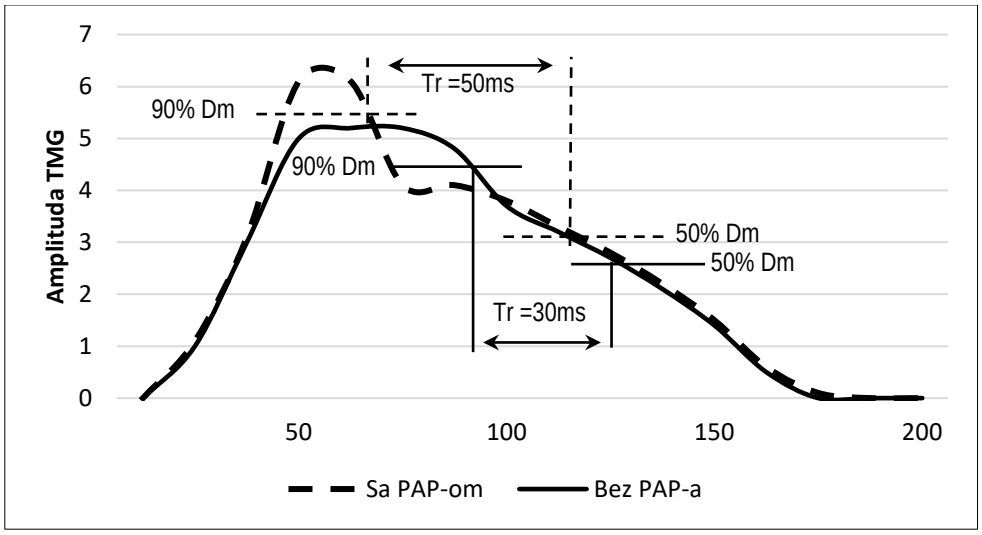
Kada je u pitanju pojava lokalnog mišićnog zamora, vrijedi napomenuti da je u studijama u kojima je PAP evaluiran na mišićnoj razini, ona je primijećena u jako malo slučajeva. Rassier (2000) čak navodi da lokalni mišićni zamor ne narušava učinke PAP-a ukoliko se oni procjenjuju koristeći elektrostimulirane kontrakcije. Međutim, za razliku od dinamometrije (koja je korištena u svim dosadašnjim studijama), TMG je „osjetljiv" na lokalni mišićni zamor. Tako, na primjer, Križaj i suradnici (2008), Rey i suradnici (2012) te Valenčič i Knez (1997) navode da je povećana vrijednost Tr-a prilikom tenziomiografskog testiranja rezultat povišene razine lokalnog mišićnog zamora. Istovremeno, činjenica da PAP kompenzira gubitak sile uslijed lokalnog mišićnog zamora (Garner i sur., 1989; Grange i sur., 1993; Green i Jones, 1989) dodatno objašnjava izostanak negativnih promjena (povećanja) u Tc-u.

Pad izvedbe je primijećen uslijed nastanka zamora u nekim slučajevima. Tako, na primjer, Kilduff i suradnici (2007) navode da su, 15 sekundi nakon aktivacijskog podražaja, kod ispitanika iz eksperimentalne skupine zabilježeni niži rezultati u izvedbi motoričkih zadataka donjih (skok iz čučnja s pripremom) i gornjih (izbačaj sa ravne klupe) ekstremiteta od onog zabilježenog u kontrolnom mjerenju. Pored njih, Hough i suradnici (2009), Khamoui i suradnici (2009) te Kilduff i suradnici (2007) primijetili su umanjenu sposobnost izvedbe eksplozivnih aktivnosti nakon aktivacijskog podražaja.

Sobzirom na to da se potencijacija i zamor javljaju simultano, Rassier i Macintsh (2000) navode da se izvedba poboljšava onog trenutka kada se količina zamora smanji te je PAP nadmaši,

međutim, ukoliko je razina lokalnog mišićnog zamora značajno povećana, dolazi do pada izvedbe.

Sličan vremenski tijek su u svojim studijama primijetili Gago i suradnici (2014a, b). Oni su u svojim studijama primijetili značajno povećanje vremena polurelaksacije u odnosu na prvo post-PAP mjerenje (5 sekundi nakon AP-a) između prve i četvrte minute nakon aktivacijskog podražaja, međutim, za razliku od navedenih studija, u ovoj nije primijećeno inicijalno smanjenje vremena polurelaksacije. U skladu sa rezultatima istraživanja Hamade i suradnika (2003), može se pretpostaviti da se kod ovog mišića javilo povećano djelovanje lokalnog mišićnog zamora.



Slika 9. Shematski prikaz razloga niže pouzdanosti Tr-a po prijedlogu Šimuniča (2012)

Pored zamora, nužno je napomenuti i da su vrijednosti ICC-a i CV-a Tr-a u dosadašnjim studijama (Tous-Fajardo i sur., 2010; Šimunič, 2012) pokazali najniži nivo (najniži ICC i najviši CV). Upravo bi manja pouzdanost ovog vremenskog parametra mogla biti dodatni razlog ovako velikih promijena, primijećenih u ovoj studiji.

Obrazloženje prethodno navedene niže pouzdanosti u svojoj je studiji obrazložio Šimunič (2012). Naime, kako on navodi, prvi zubac tenziomiograma se tijekom PAP-a povećava te se, samim time i vrijednost 90% Dm-a, kao početna vremenska točka Tr-a, pomakne u lijevo (slika 8.), čime se vrijednost Tr-a znatno poveća.

Iako je u ovoj studiji jedan mjeritelj testirao sve ispitanike, te su, kako je ranije navedeno, elektrode postavljene prije i skinute nakon eksperimentalnog protokola, vrijedi spomenuti da su Tous-Fajardo i suradnici (2010) zabilježili interklasni koeficijent korelacije (ICC) u

vrijednosti 0,77–0,97 između mjerenja s različitim mjeriteljima i 0,62–0,97 s različitim pozicijama elektroda. Najniži ICC u ovoj studiji zabilježen je kod Tr-a (vremena polurelaksacije).

6.1.2.4. Transverzalni Ts

Kao što je ranije navedeno, izuzev vremena kontrakcije i polurelaksacije, koji su procjenjivani i u dosadašnjim studijama, vrijeme održanja iznad 50% amplitude (po znanju autora) nije evaluirano ni u jednoj dosadašnjoj studiji.

Suprotno longitudinalnoj procjeni, tijekom transverzalne procjene kontraktilnih parametara primijećene su statistički značajne razlike između vremena održanja iznad 50% amplitude u različitim točkama mjerenja, ali isključivo kod mišića *vastus lateralis*.

Statistički značajne razlike koje su primijećene kod mišića *vastus lateralis* javile su se odmah u prvom post-PAP mjerenju. Naime, 30 sekundi nakon aktivacijskog podražaja, vrijednost Ts-a se smanjila za 30,8%. Nadalje, jednu minutu nakon aktivacijskog podražaja, ova razlika je bila nešto niža, ali se u ovom slučaju statistički značajno razlikovala od pre-PAP mjerenja, ali i vrijednosti zabilježene 30 sekundi nakon AP-a. Konkretnije, Ts je u ovoj točki mjerenja bio niži (-23%) u odnosu na pre-PAP i viši (10,1%) od prvog post-PAP mjerenja.

Kako je ranije navedeno, s obzirom na to da vrijeme održanja sile izravno ovisi o Tc i Tr, a imajući u vidu da su kod mišića *vastus lateralis* u ove dvije vremenske točke (30 s i 1 min nakon AP-a), primijećene statistički značajno niže vrijednosti u odnosu na pre-PAP mjerenje, javile su se i promjene na vrijeme održanja amplitude iznad 50%.

6.1.3. Pozadinski mehanizmi PAP učinaka

Iako su u nekim parametrima primijećene razlike između studija, mehanizmi potencijacije izometrijskih elektrostimuliranih kontrakcija se ne razlikuju od onih odgovornih za potencijaciju maksimalnih voljnih kontrakcija, te se, s ovim tipom kontrakcija primarno povezuje fosforilacija regulatornih lakih lanaca miozina (Grange i sur., 1993; Sweeney i sur., 1993; Metzger i sur., 1989) i promjena u ekscitabilnosti α-moto-neurona što se vidi po promjenama H-refleksa (Misiaszek, 2003; Zucker i Regehr, 2002). Naime, za razliku od funkcionalnih testiranja prilikom kojih se s povećanim PAP učincima povezuje stimulacija SŽS-a (Rixon i sur., 2007), koja se manifestira kroz povećanje živčane provodljivosti i smanjenje presinaptičke inhibicije, što rezultira boljom sinkronizacijom aktivacije motornih

jedinica višeg reda (Aagard i sur., 2002; Chiu i sur., 2003; Güllich i Schmidtbleicher, 1996; Tillin i Bishop, 2009), učinci na MMG odgovor elektrostimuliranih kontrakcija su rezultat isključivo intrinzičnih mehaničkih promjena te, on nije povezan s jačinom EMG signala (Shima i sur., 2006).

S obzirom na to da ovaj tip testiranja (TMG) daje uvid u intrinzične mišićne promjene, učinci nastali nakon aktivacijskog podražaja ovise o primarno dva regulacijska mehanizma. Naime, lokalni mišićni zamor i PAP (slika 1.) su dva oblika regulacije mišićne sile tijekom ponavljanih kontrakcija skeletne muskulature (Rassier, 2000). Dosadašnja istraživanja ukazuju da obje navedene pojave ovise o Ca^{2+} procesima. Lokalni mišićni zamor nastaje uslijed smanjene koncentracije Ca^{2+} te smanjene senzitivnosti filamenata na njega (Allen i sur., 1989, 2008; Westerblad i Allen, 1991), dok se PAP javlja uslijed fosforilacije regulatornih lakih lanaca miozina, odnosno, procesa koji rezultira povećanjem senzitivnosti filamenata na Ca^{2+} (Persechini i sur., 1985; Sweeney i Stull, 1986; Stuart i sur., 1988) te samim time i povećanom sposobnošću generiranja sile, kako tijekom elektrostimulirane, tako i voljne kontrakcije.

Važno je napomenuti da se akutne promjene mogu, osim voljnom, izazvati i elektrostimuliranom kontrakcijom. Međutim, iako se u dosadašnjoj literaturi mogu naći studije koje su evaluirale potencijacijske učinke nakon elektrostimuliranih tetaničkih kontrakcija (posttetanična potencijacija), prema autorovom saznanju nijedna nije komparirala učinke maksimalnih kontrakcija. Tako su, na primjer, Jubeau i suradnici (2010), koji su komparirali razinu potencijacije nakon voljnih i elektrostimuliranih kontrakcija intenziteta 40% 1RM-a, primijetili veću razinu PAP-a nakon voljnih kontrakcija. Razlog ovomu se može naći u studijama Adamsa i suradnika (1993) i Jubeaua i suradnika (2007), koji navode da je ukupni broj aktiviranih motornih jedinica tijekom elektrostimulirane kontrakcije niži od onog prilikom voljne kontrakcije za identični submaksimalni izlaz sile. Koja je veličina PAP učinaka nakon maksimalnih kontrakcija i koji tip kontrakcija rezultira većim PAP učincima ostaje pitanje koje je neophodno odgovoriti.

Fosforilacija regulatornih lakih lanaca miozina poboljšava kontraktilna svojstva mišića uslijed povećanja osjetljivosti kontraktilnih proteina na Ca^{2+} otpušten iz sarkoplazmatskog retikuluma (Palmer i Moore, 1989; Sweeney i sur., 1993; Grange i sur., 1998; Hanson i sur., 2007; Hodgson i sur., 2005; Sale, 2002). Ova povećana osjetljivost može se pripisati promjeni rasporeda debelih i tankih filamenata, odnosno, optimalnoj razdaljini između aktina i miozina (Yang i sur., 1998), koja rezultira njihovom boljom interakcijom (Sweeney i sur., 1993; Levine i sur.,

1996). Da se povećana razina fosforilacije regulatornih lakih lanaca miozina javlja nakon izvedbe maksimalne mišićne kontrakcije primijećeno je u studiji koju su proveli Smith i Fry (2007), koji su na osnovu dvije mišićne biopsije, prije i nakon 10 sekundi maksimalne voljne izometrijske kontrakcije, ustanovili da je kod 7 od ukupno 11 ispitanika došlo do povećanja razine fosforilacije regulatornih lakih lanaca miozina, dok je kod 4 primijećen njen pad. Empirijski je dokazano i da se akutno povećanje tonusa mišića javlja uslijed fosforilacije regulatornih lakih lanaca miozina nakon aktivacijskog podražaja (Proske i Morgan, 1999; Ritz-Gold i sur., 1980).

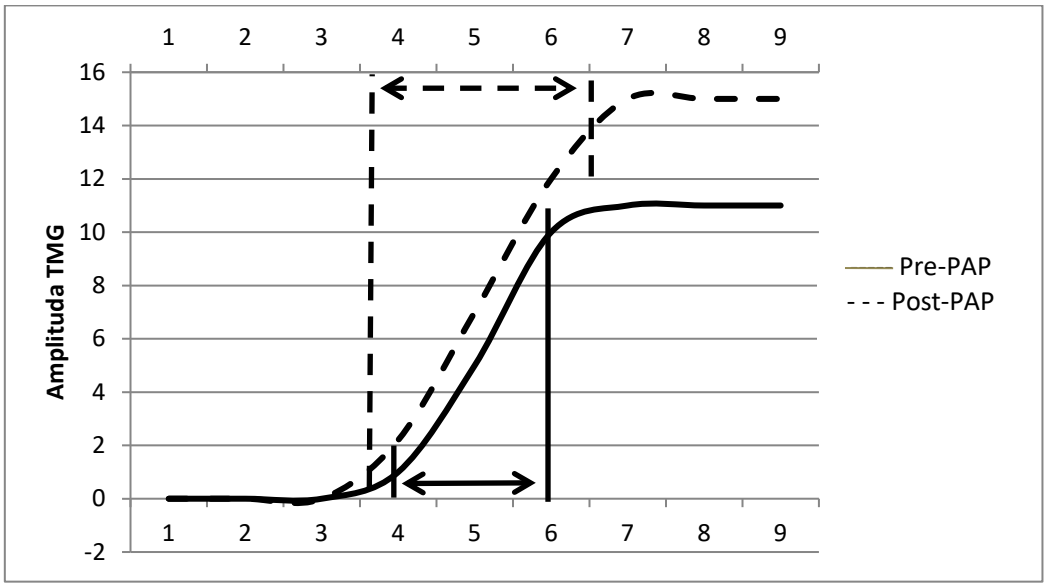
Pored fosforilacije regulatornih lakih lanaca miozina, neki od pozadinskih mehanizama PAP-a jesu i povećana razdražljivost moto-neurona, bolja sinkronizacija rada motoričkih jedinica (Hodgson i sur., 2005; Rassier i Macintosh, 2000), akutne promjene kuta mišićnih vlakana (Tillin i Bishop, 2009), povećanje broja i bolja interakcija aktin – miozin veza (Güllich i Schmidtbleicher, 1996), poboljšavanje sinkronizacije podražaj – kontrakcija i povećanje aktivacije (Zhi i sur., 2005; Szczena i sur., 2002) i sposobnosti generiranja sile (Klein i sur., 2001; De Luca i sur., 1996) motornih jedinica.

Suzuki i suradnici (1988) su pored navednih mehanizama primijetili i povećan broj aktiviranih motornih jedinica tijekom PAP učinaka. Međutim, studije u kojima nisu primijećeni ovakvi učinci dovode u pitanje ovu tvrdnju. Naime, u nekim prethodnim studijama (Garland i sur., 1994, 1997; Person i Kudina, 1972) primijećeno je smanjenje EMG aktivnosti tijekom dugotrajne submaksimalne izometrijske kontrakcije, što ukazuje na smanjenje broja aktiviranih motornih jedinica, ali i niže razine sinkronizacije motoričkih jedinica tijekom povećanog djelovanja lokalnog mišićnog zamora, dok su Klein i suradnici (2001) i De Luca i suradnici (1996) u svojim studijama potvrdili da se dodatne motoričke jedinice nisu aktivirale kako bi kompenzirale pad EMG aktivnosti. Pored prethodno navedenih, izostanak promjena amplitude M-talasa u svojim su studijama primijetili i Metzger i suradnici (1989) i Baudry i Duchateau (2007).

Nakon visokointenzivnih aktivnosti, za razliku od svih „pozitivnih" mehanizama, javlja se i lokalni mišićni zamor koji rezultira smanjenom Ca^{2+} osjetljivošću (Westerblad i sur., 1993; Lee i sur., 1991; Westerblad i Allen, 1991) te stoga ovaj proces ima dijametralno suprotan učinak od fosforilacije, modulira same PAP učinke i rezultira manjom produkcijom sile bez obzira na koncentraciju Ca^{2+} (Rassier i MacIntosh, 2000). Pored toga, tijekom lokalnog mišićnog zamora, otpuštanje Ca^{2+} iz sarkoplazmatskog retikuluma je smanjeno (Hill i sur., 2001; Westerblad i

sur., 1993). Prema tome, pad mišićne sile, uslijed nastanka lokalnog mišićnog zamora jest rezultat smanjene koncentracije Ca^{2+} unutar mišića (Allen i sur., 1989; Westerblad i Allen, 1996; Westerblad i sur., 1993) ili smanjene osjetljivosti na Ca^{2+} (Westerblad i sur., 1991).

Rassier i MacIntosh (2000) su dali izrazito slikovit prikaz ovisnosti potencijacije i zamora o razini osjetljivosti na Ca^{2+}. Naime, kako oni navode, ukoliko potencijacija ovisi o osjetljivosti na Ca^{2+}, a zamor rezultira smanjenom razinom Ca^{2+} osjetljivosti te da se s povećanjem intenziteta opterećenja povećava i koncentracija Ca^{2+} unutar mišića, s povećanom koncentracijom Ca^{2+} unutar mišića po nestanku lokalnog mišićnog zamora bit će povećana i sposobnost generiranja sile tijekom potencijacije. Ukoliko su, međutim, neto učinci potencijacije (povećana Ca^{2+} osjetljivost) i zamora (umanjena Ca^{2+} osjetljivost) jednaki, u tom slučaju zamor može poništiti potencijaciju.



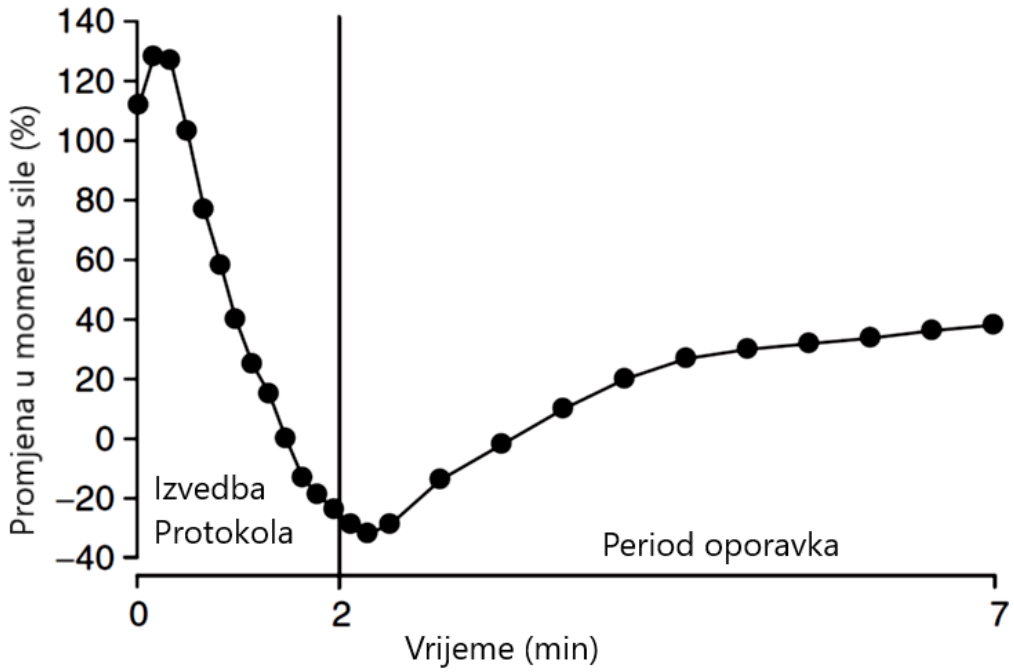
Slika 10. Hipotetski odnos Ca^{2+} sila koji prikazuje dulje vrijeme kontrakcije tijekom istovremeno povećane razine potencijacije i zamora (modificirano iz: Rassier i MacIntosh, 2000)

U suštini, hoće li razina sile nakon aktivacijskog podražaja biti povećana, umanjena ili se eventualno neće desiti nikakve promjene, ovisi isključivo o dva parametra, razini Ca^{2+} osjetljivosti i koncentraciji Ca^{2+}, tj. razini fosforilacije regulatornih lakih lanaca miozina. Ono što je zanimljivo, prema Rassieru i MacIntoshu (2000), jest da su osnovni pokazatelji koegzistencije potencijacije i zamora, povećano vrijeme kontrakcije i relaksacije usprkos činjenici da je sila elektrostimulirane kontrakcije povećana. Naime, ukoliko je brzina aktivacije mišićnih vlakana tipa II smanjena zbog nastanka lokalnog mišićnog zamora, a proces

fosforilacije regulatornih lakih lanaca miozina se odvija neometano, nakon odgođenog odgovora se javlja veća sila, generirana upravo od strane brzokontraktilnih mišićnih vlakana.

Ovakvi su učinci primijećeni prilikom longitudinalnog testiranja mišića *vastus medialis*: povećanje Dm-a od 63,5% i povećanje Tc-a od 16,1%. Za pretpostaviti je da se povećano vrijeme kontrakcije javilo zbog velike promjene u amplitudi. Pored toga, odgođeno vrijeme nastanka statistički značajnih negativnih razlika kod vremena polurelaksacije (prilikom TMG testiranja mišića *vastus medialis*) moglo bi se objasniti dominacijom zamora u odnosu na PAP (Baudry i Duchateau, 2004; Baudry i sur., 2005; Ding i sur., 2003).

Različiti unutarmišićni procesi tijekom koncentracije i relaksacije mišića ovise o razini Ca^{2+}, porast vremena kontrakcije u najvećoj mjeri ovisi o brzini formiranja veza između aktina i miozina (Kugelberg i Thornell, 1983), dok vrijeme relaksacije ovisi o brzini razdvajanja aktinskih i miozinskih niti (Houston i sur., 1987).



Slika 11. Promjene u obrtnom momentu elektrostimulirane kontrakcije tijekom protokola (16 5-sekundnih maksimalnih voljnih izometrijskih kontrakcija sa stankama od 3 sekunde između ponavljanja) primijećene od strane Hamade i suradnika (2003)

Kada je u pitanju interakcija zamora i potencijacije, primijećena su tri pokazatelja koegzistencije PAP učinaka i umora (Hamada i sur., 2003). Naime, u svojoj studiji Hamada i suradnici (2003) su primijetili potpunu dominaciju lokalnog mišićnog zamora nakon 9 (od 16) petosekundnih maksimalnih voljnih izometrijskih kontrakcija (Slika 10) sa stankama od 3 sekunde između ponavljanja te pored toga navode i sljedeće opaske:

1. Sila elektrostimuliranih kontrakcija je bila statistički značajno povećana više od polovine eksperimentalnog protokola, odnosno, dok zamor nije prevladao.
2. Nakon pada sile elektrostimuliranih kontrakcija, koji se javio u drugom dijelu eksperimentalnog protokola, nakon samog protokola (koji se sastojao od 16 maksimalnih voljnih kontrakcija) primijećeno je njeno ponovno povećanje, što ukazuje na to da je PAP učinak još bio prisutan ali je „zamaskiran" lokalnim mišićnim zamorom,
3. Pozitivne promjene u vremenu kontrakcije i polurelaksacije, odnosno, smanjenje oba ova parametra, javile su se prije i nakon perioda dominacije lokalnog mišićnog zamora.

6.2. Razlike između longitudinalnih i transverzalnih kontraktilnih parametara

U dosadašnjoj literaturi se može naći mnogo studija koje su evaluirale fenomen postaktivacijske potencijacije, ali, kada su u pitanju rezultati dosadašnjih studija, osim različitih rezultata koji su detaljnije predstavljeni u prethodnom dijelu teksta, uočljivo je da se razlike javljaju i između studija u kojima su primjenjivani različiti tipovi testiranja ili su pak numeričke vrijednosti pojedinih parametara prikupljane simultano tijekom evaluacije (Behm i sur., 2004; Boullosa i sur., 2011, 2013; Sale, 2002). Naime, učinci PAP-a se mogu javiti na jedan parametar dok se kod drugoga može primijetiti stagnacija ili pad vrijednosti. Tako je, na primjer, u nekim dosadašnjim studijama (Chaouachi i sur., 2011; Khamoui i sur., 2009; Rixon i sur., 2007) nakon izvođenja stražnjeg čučnja primijećeno povećanje sile tijekom odraza bez statistički značajnog povećanja same visine skoka.

Obrtni moment tijekom elektrostimulirane kontrakcije može biti uvećan nakon kratkotrajne voljne (Hamada i sur., 2000; Miyamoto i sur., 2009; Vandervoort i sur., 1983) i elektrostimulirane (O'Leary i sur., 1997; Requena i sur., 2005) kontrakcije tako da je prisustvo PAP-a primijećeno u većini studija u kojima je ovaj fenomen procjenjivan elektrostimuliranim mišićnim kontrakcijama (Abbate i sur., 2000; Baudry i Duchateau, 2004; Hamada i sur., 2000b; Skurvydas i Mamkus, 2000; Vandervoort i sur., 1983).

Iako voljne kontrakcije ne podrazumijevaju elektrostimulaciju (Stein i Parmiggiani, 1981), procjena kontraktilnih svojstava izometrijskih elektrostimuliranih kontrakcija je korisna metoda procjene lokalnog zamora i potencijacije na razini mišića. Jedna od prednosti ovog tipa testiranja nad ostalim ogleda se u obrascu regrutacije motornih jedinica, koji se, tijekom elektrostimulacije razlikuje od onog primijećenog tijekom voljnih kontrakcija. Naime, tijekom elektrostimulirane kontrakcije, brzokontraktilna mišićna vlakna mogu biti stimulirana nižim intenzitetima nego što je to slučaj tijekom voljne kontrakcije (Knaflitz i sur., 1990; Feiereisen i sur., 1997).

Kada je u pitanju obrazac regrutacije motornih jedinica prilikom voljne kontrakcije, on je objašnjen Hannemanovim principom veličine (1965) prema kojem se motorne jedinice aktiviraju redom od najmanje ka najvećoj po veličini izlazne sile. U skladu s navedenim principom, s povećanjem potrebe za silom aktiviraju se dodatne motorne jedinice te se time aktivira broj motornih jedinica dovoljan za izvedbu određenog zadatka. Ovaj pricip ukazuje na dva bitna fiziološka benefita: 1) minimiziranje količine lokalnog mišićnog zamora primarnom

aktivacijom mišićnih vlakana otpornih na zamor (tip I i II) optimizacija količine ispoljene sile u skladu s potrebama određenog zadatka. S druge strane, obrazac regrutacije motornih jedinica prilikom perkutane elektrostimulacije razlikuje se od onog zabilježenog prilikom voljne kontrakcije (Heyters i sur., 1994; Feiereisen i sur., 1997; Enoka, 2002), ali i stimulacije živca (Rodriguez-Falces i Place, 2013). U ovom slučaju, regrutacija motornih jedinica pokazala se asinkronom i neselektivnom, tj. nasumičnom (Gregory i Bickel, 2005; Jubeau et al., 2007), što za posljedicu ima drugačiji broj ukupno aktiviranih motornih jedinica. S obzirom na to da se i ovom prilikom mogu aktivirati (ukoliko se radi o submaksimalnoj elektrostimulaciji) pojedine motorne jedinice, dok su druge pasivne, a s obzirom na to da se odmah mogu aktivirati one koje su manje otporne na lokalni mišićni zamor (tip II), što ukazuje na manjak optimizacije količine ispoljene sile, lokalni mišićni zamor se najčešće javlja ranije prilikom elektrostimuliranih (tetaničkih) za razliku od voljnih kontrakcija (Petrofsky, 1979).

Pored navedena dva tipa kontrakcija, važno je napomenuti i da se redoslijed aktivacije motornih jedinica tijekom elektrostimulacije nerva razlikuje od onog zabilježenog tijekom voljne kontrakcije. Naime, prema Savelbergu (2000), elektrostimulacija nerva rezultira redoslijedom aktivacije motornih jedinica oprečnim onome primijećenom od strane Hannemana, odnosno, ovom prilikom se prvo aktiviraju brzokontraktilna, a potom sporokontraktilna mišićna vlakna.

Kod opružača koljena, međutim, postoji nekoliko razloga zbog kojih treba izbjegavati živčanu elektrostimulaciju (femoralni živac). Naime, Button i Behm (2008) su primijetili da živčana elektrostimulacija može prouzročiti osjećaj nelagode te zbog toga postoji mogućnost odustajanja od protokola. Pored toga, elektrodu za elektrostimulaciju može pomjeriti obližnja tetiva tijekom izvođenja voljnih kontrakcija, što u velikoj mjeri može umanjiti intenzitet stimulacije samog mišića (Place i sur., 2010). Na ukupni obrtni moment, osim kvadricepsa, tijekom elektrostimulacije femoralnog živca, može utjecati i aktivacija krojačkog mišića (*m. sartorius*) (Place i sur., 2010). U skladu s tim, a uzevši u obzir da je perkutana elektrostimulacija kvadricepsa validna alternativa stimulaciji femoralnog živca (Place i sur., 2010), ona se prilikom procjene ove skupine mišića preporučuje. Upravo je ovo razlog uporabe TMG-a, ali i perkutane elektrostimulacije, u ovoj studiji.

U dosadašnjim studijama je primijećena povezanost rezultata MMG parametara i mišićne sile tijekom voljnih (Maton i sur., 1990; Orizio i sur., 1989) i elektrostimuliranih kontrakcija (Barry i sur., 1992; Orizio i sur., 1999; Yoshitake i Moritani, 1999). Tako su, na primjer, Klein i sur. (2001) u svojoj studiji primijetili povezanost (r=-0,74) između sile i vremena polurelaksacije

elektrostimulirane kontrakcije. Naime, kada se mišićna vlakna aktiviraju, depolarizacija membrane izaziva njihovo skraćivanje. Ovaj proces je odgovoran za generiranje sile, koja se može kvantificirati pomoću dinamometra tijekom elektrostimulirane mišićne kontrakcije (McMillan i sur., 1990). Pored toga, uzevši u obzir da se mišićna vlakna mogu modelirati kao komore (ili cilindri) napunjene tečnošću (Gordon i Holburn, 1948), njihovo skraćivanje izaziva povećanje dijametra koji stvara bočne oscilacije koje izazvaju deformaciju mišićne površine (Orizio i sur., 1999). Bočne oscilacije nastale uslijed mišićne kontrakcije mogu se mjeriti na površini kože te se u tu svrhu koriste različite mehanomiografske metode (Akataki i sur., 1999; Yoshitake i Moritani, 2002).

Slična razina korelacije primijećena je u studiji koju su proveli Loturco i suradnici (2015), koji su primijetili statistički značajnu negativnu korelaciju (r=-0.61 – 0.72) između TMG parametara i visine skoka što ukazuje da TMG parametri daju dobar uvid u eksplozivnu snagu donjih ekstremiteta. S obzirom na to da na visinu skoka utječe mnogo čimbenika koji ne utječu na rezultate TMG testiranja (npr. longitudinalnu elastičnost mišića, tetiva i ligamenata, trenje unutar zgloba i dr.), te da se pomoću TMG-a vrši procjena isključivo jednog mišića, Loturco i suradnici (2015) navode da je pored standardiziranih terenskih testova, u procjenu funkcionalnih sposobnosti muskulature, poželjno uključiti i TMG testiranje.

Pored navedenih studija, razlog izoliranog testiranja mišića se može naći u studiji koju su proveli Mitchell i Sale (2011). Iako su ovi autori primijetili statistički značajne PAP učinke tijekom dva tipa testiranja, primijetili su i neke razlike između učinaka. Naime, 4 minute nakon 5 RM čučnja primijećeno je statistički značajno povećanje obrtnog momenta elektrostimulirane kontrakcije (10,7%), ali i visine skoka iz čučnja s pripremom (2,9%) u odnosu na pre-PAP mjerenje (Mitchell i Sale, 2011). Međutim, ono što je interesantno jest da, iako su primijećena poboljšanja u obrtnom momentu i visini skoka, u ovoj studiji nije primijećena korelacija između veličine PAP učinaka mjerenih na ova dva načina. Ovi rezultati su se vjerojatno javili zbog toga što je obrtni moment sile procjenjivan pri živčanoj stimulaciji isključivo kvadricepsa, dok su prilikom izvedbe skoka iz čučnja s pripremom u izvedbu uključeni i opružači kuka i plantarni fleksori skočnog zgloba, kod kojih se mogao javiti lokalni mišićni zamor koji, iako je kvadriceps potenciran, može umanjiti učinke. Za razliku od akutnih učinaka iz prethodne studije, kronični učinci, primijećeni u studiji Zupca i Šimuniča (2017) ukazuju na promjene u vidu smanjenja Tc-a kod svih evaluiranih mišića (*m. vastus lateralis, m. biceps femoris, m. tibialis anterior, m. gastrocnemius medialis, m. gastrocnemius lateralis*) nakon osmotjednog pliometrijskog treninga.

U dosadašnjoj se literaturi mogu naći samo tri studije u kojima su *in vivo* komparirani tenziomiografski i dinamometrijski pokazatelji kontraktilnih parametara. To su studije od Šimuniča (2003), Šimuniča i suradnika (2010) te Korena i suradnika (2015). Vrijedi spomenuti da je Šimunič (2003) u svojoj disertaciji komparirao amplitudu mišićnog odgovora, mjerenu TMG-om, i silu mjerenu dinamometrijom, elektrostimulirane kontrakcije kod ljudi (*in vivo*) i životinja (žabe) (*in vitro*).

Kao što se može vidjeti iz prethodnog poglavlja, razlike između kontraktilnih parametara tijekom eksperimentalnog protokola statistički se značajno razlikuju između longitudinalnog i transverzalnog testiranja. Ovi rezultati dodatno potvrđuju zaključke studija Šimuniča i suradnika (2010) i Korena i suradnika (2015), koji navode da TMG daje uvid u više intrinzična svojstva mišića. U skladu s tim, može se primijetiti da je TMG selektivan te mjeri isključivo kontraktilne parametre testirane glave mišića, dok na dinamometrijsko testiranje utječu i okolne strukture. U skladu s navedenim, hipoteza H2 je prihvaćena.

U nastavku su predstavljene razlike između zabilježenih učinaka na pojedinačne kontraktilne parametre (potpoglavlja 6.2.1.–6.2.4.) i pozadinski mehanizmi (potpoglavlje 6.2.5.) odgovorni za nastajanje zabilježenih razlika.

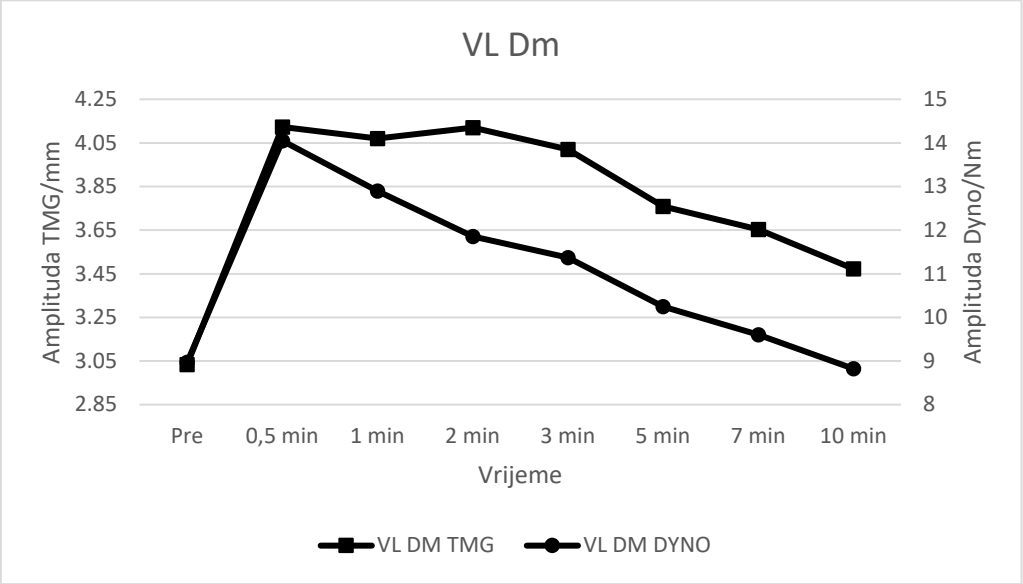
6.2.1. Razlike između longitudinalnog i transverzalnog Dm-a

Longitudinalno i transverzalno mjerena najveća amplituda mišićnog odgovora tijekom elektrostimulirane kontrakcije statistički se značajno razlikovala od pre-PAP mjerenja odmah u prvom post-PAP mjerenju (30 sekundi nakon aktivacijskog podražaja). Također, smjer djelovanja PAP učinaka je isti, te su prilikom oba tipa testiranja primjećene povećane post-PAP vrijednosti.

Izuzev vremena pojave i smjera djelovanja, koji se ne razlikuju, veličina i vremenski tijek (trajanje) PAP učinaka su se razlikovali između ova dva tipa testiranja. Pored toga, zabilježeni rezultati su također nešto drugačiji kod dva testirana mišića. Ono što je zajedničko za obje testirane glave kvadricepsa jesu veći učinci, ukoliko su kvantificirani, prilikom longitudinalnog testiranja.

Kod mišića *vastus lateralis* u prvoj post-PAP točki mjerenja primijećeno je povećanje Dm-a od 56,6% prilikom longitudinalnog i 35,9% prilikom transverzalnog testiranja. Kod longitudinalno mjerenog Dm-a zabilježen je konstantni pad tijekom narednih mjerenja te je u posljednjoj točki

mjerenja, statistički značajno različitoj od pre-PAP mjerenja (5 min), Dm bio uvećan za 14,3% u odnosu na pre-PAP mjerenje. Za razliku od longitudinalnog, kod transverzalnog Dm-a je u prvoj post-PAP točki mjerenja zabilježen porast vrijednosti od 35,9% u odnosu na pre-PAP mjerenje te je povećana vrijednost ostala na konstantnoj razini sve do sedme minute tijekom koje je zabilježen statistički značajan pad vrijednosti Dm-a, iako je zabilježena vrijednost i dalje bila veća ($p<0,05$) od pre-PAP mjerenja.

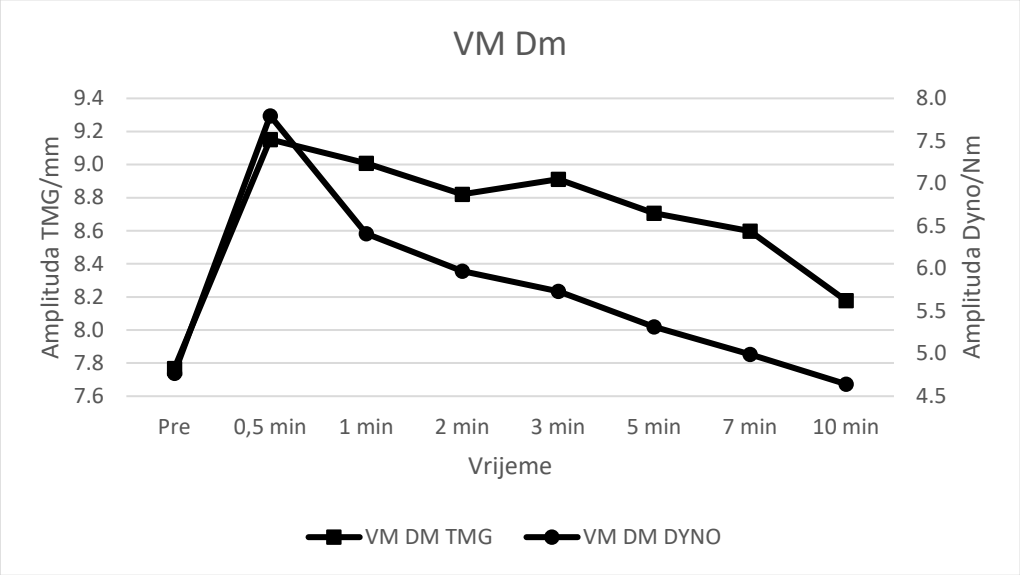


Slika 12. Grafički prikaz longitudinalnog i transverzalnog Dm-a kod mišića vastus lateralis

Konkretne razlike između ova dva tipa testiranja mogu se primijetiti u duljini i načinu manifestiranja PAP učinaka. Statistički značajne razlike u odnosu na pre-PAP mjerenje, kod longitudinalnog testiranja, su zabilježene pet minuta nakon aktivacijskog podražaja, dok u prilikom transverzalnog testiranja učinci bili statistički značajni sve do sedme minute. Također, pad vrijednosti Dm-a nakon aktivacijskog podražaja, koji je zabilježen prilikom longitudinalnog mjerenja, nije se javio prilikom TMG testiranja, prilikom kojeg je primijećen petominutni plato u izvedbi te ukupno trajanje PAP učinaka od 7 minuta.

Kod mišića *vastus medialis* u prvoj post-PAP točki mjerenja primijećeno je povećanje Dm-a od 63,5% prilikom longitudinalnog i 17,8% prilikom transverzalnog testiranja. Kod longitudinalno mjerenog Dm-a zabilježen je konstantni pad tijekom narednih mjerenja te je u posljednjoj točki mjerenja, statistički značajno različitoj od pre-PAP mjerenja, (3 min) Dm bio uvećan za 20,2% u odnosu na pre-PAP mjerenje. Za razliku od longitudinalnog, kod transverzalnog Dm-a je u prvoj post-PAP točki mjerenja zabilježen porast vrijednosti od 17,8%

u odnosu na pre-PAP mjerenje te je povećana vrijednost ostala na konstantnoj razini do treće minute tijekom koje je zabilježena vrijednost bila 14,7% veća od pre-PAP vrijednosti.



Slika 13. Grafički prikaz longitudinalnog i transverzalnog Dm-a kod mišića vastus medialis

Za razliku od mišića *vastus lateralis,* kod mišića *vastus medialis* zabilježeno je jednako vrijeme trajanja PAP učinaka prilikom oba tipa testiranja. Međutim, baš kao što je to bio slučaj kod prethodnog mišića, prilikom longitudinalnog testiranja primijećen je brzi pad vrijednosti Dm-a, dok je prilikom transverzalnog, prije pada vrijednosti, primijećen trominutni plato u izvedbi.

Razlike u vrijednosti Dm-a između ova dva tipa testiranja mogle bi se objasniti samom postavkom eksperimentalnog protokola. Naime, jakost elektrostimulacije je podešena tako da daje optimalni TMG odgovor te je upravo zbog toga vrijednost TMG Dm-a imala znantno niži niži prostor za povećanje vrijednosti. Ovo su u svojim studijama primijetili i Šimunič i suradnici (2010) i Koren i suradnici (2015), koji navode da TMG odgovor doseže maksimalnu amplitudu pri nižoj jakosti elektrostimulacije nego što je to slučaj kod dinamometrijskog testiranja. Također, uzevši u obzir da je dinamometrijsko testiranje neselektivno, elektrostimulacija jedne glave kvadricepsa mogla je rezultirati aktivacijom, iako relativno malom, i drugih, okolnih mišića.

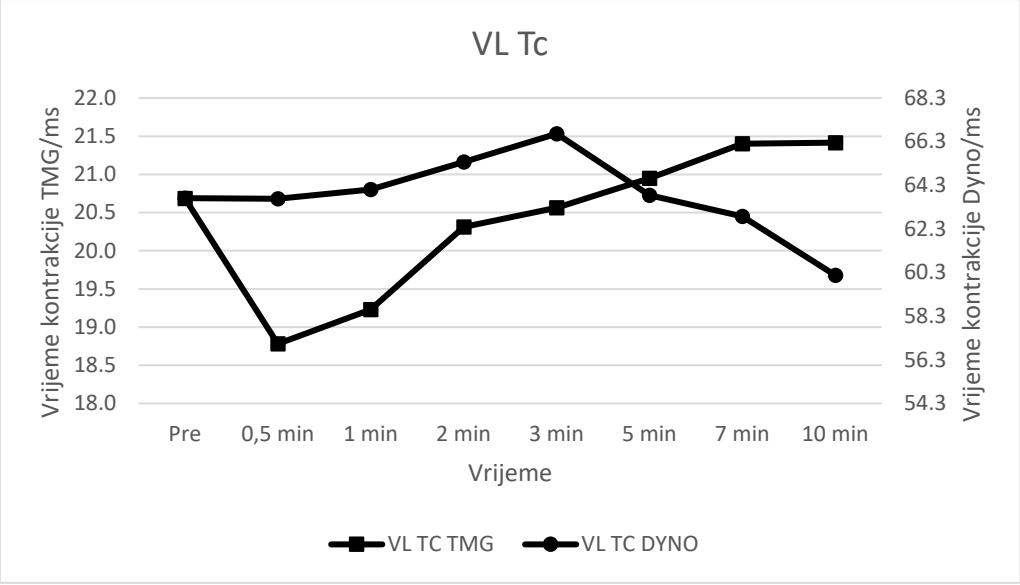
Nalazi prilikom TMG testiranja razlikuju se od longitudinalnog, ali i većine nalaza koji se mogu naći u dosadašnjoj literaturi. Promjene u najvećoj amplitudi elektrostimulirane kontrakcije razlikovale su se između ova dva tipa mjerenja, te su bile nešto manje prilikom TMG testiranja, dok je pored toga razlika primijećena i vremenskom tijeku PAP učinaka. Prilikom

dinamometrijskog mjerenja primijećen je porast te odmah i pad, dok je kod TMG testiranja primijećen plato u izvedbi.

6.2.2. Razlike između longitudinalnog i transverzalnog Tc-a

Prilikom procjene vremena kontrakcije primijećene su razlike između rezultata longitudinalnog i transverzalnog mjerenja. Kod mišića *vastus lateralis* primijećeno je statistički značajno smanjenje Tc-a u odnosu na pre-PAP mjerenje isključivo prilikom TMG testiranja (-9,2% i -7%), dok su kod mišića *vastus medialis* statistički značajne bile promjene prilikom oba tipa testiranja, s tim da je prilikom TMG testiranja zabilježeno smanjenje (-16,4% i -8,7%), a prilikom longitudinalnog povećanje (+16,1%) Tc-a.

Prilikom TMG testiranja mišića *vastus lateralis*, povećana vrijednost Tc-a primijećena je jednu minutu nakon aktivacijskog podražaja, nakon čega se vrijednost vratila na razinu na kojoj je bila u pre-PAP mjerenju. Prvo i drugo post-PAP mjerenje se nisu razlikovali statistički značajno, što ukazuje na kratkotrajni plato u izvedbi. Rezultati longitudinalnog testiranja nisu bili statistički značajni.

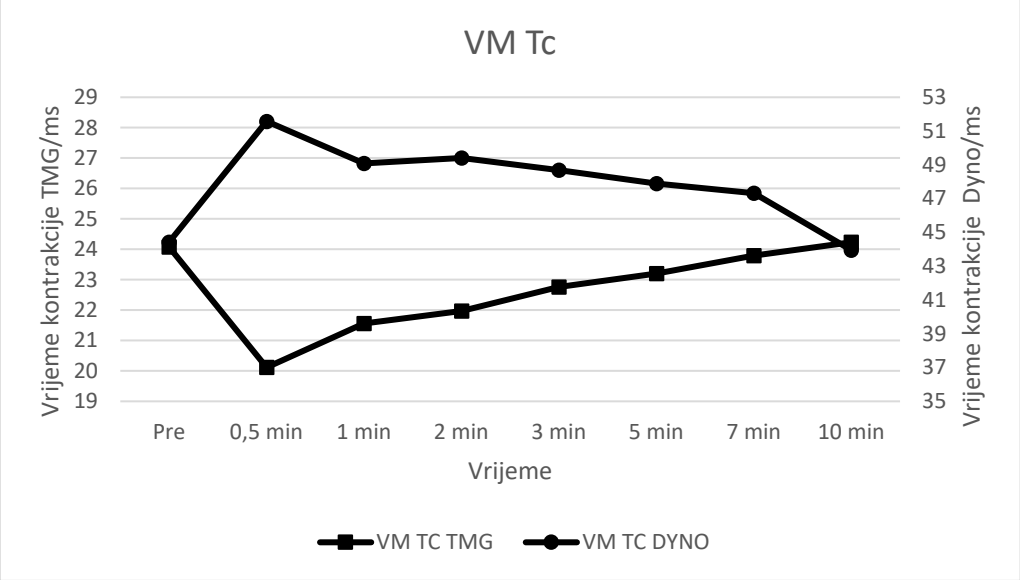


Slika 14. Grafički prikaz longitudinalnog i transverzalnog Tc-a kod mišića vastus lateralis

Nešto drugačiji rezultati su primijećeni kod mišića *vastus medialis*. Naime, iako su se statistički značajne razlike u odnosu na pre-PAP mjerenje javile u prvom post-PAP mjerenju, smjer promjena je bio suprotan. Tako, prilikom longitudinalnog testiranja zabilježeno je povećanje (+16,1%), dok je prilikom TMG testiranja primijećeno smanjenje (-16,4%) vremena kontrakcije. Razlika se također javila i u vremenu trajanja učinaka. Naime, razlika u odnosu na

pre-PAP mjerenje prilikom longitudinalnog testiranja bila je statistički značajna samo u prvom post-PAP mjerenju (0,5 minuta), dok je, prilikom TMG testiranja, razlika bila statistički značajna dvije minute nakon aktivacijskog podražaja.

Za razliku od mišića *vastus lateralis*, kod mišića *vastus medialis* nije primijećen plato u izvedbi te se razlika u odnosu na pre-PAP mjerenje počela smanjivati već u drugom post-PAP mjerenju te je bila statistički značajno niža od one zabilježene u prvom.



Slika 15. Grafički prikaz longitudinalnog i transverzalnog Tc-a kod mišića vastus medialis

Uočljivo je da su duljina i pravac promjena kod longitudinalnog i transverzalnog Tc-a različiti. Međutim, rezultati zabilježeni prilikom longitudinalnog testiranja mogu se naći u literaturi, ali ukazuju na pojavu povećanog lokalnog mišićnog zamora. Postavlja se pitanje zašto je vrijeme kontrakcije skraćeno prilikom TMG testiranja, a povećano tijekom longitudinalnog. Vrlo je vjerojatno da, kako to navode Šimunič i suradnici (2010) i Koren i suradnici (2015), na longitudinalni odgovor utječu i okolne, pasivne strukture.

Uporište za pretpostavku da pasivne strukture utječu na longitudinalno testiranje – prilikom kojeg je kod Tc-a mišića *vastus medialis* zabilježeno povećanje vrijednosti nakon aktivacijskog podražaja, za razliku od TMG testiranja prilikom kojeg je zabilježeno smanjenje istog parametra –može se naći u studiji Fanga i Mortimera (1991), koji navode da je dulje trajanje Tc-a i Tr-a pokazatelj regrutacije malog broja motornih jedinica, dok kraće trajanje ova dva parametra ukazuje na veći broj aktiviranih motornih jedinica. Naime, ako se uzme u obzir da su longitudinalni i transverzalni parametri mjereni simultano, razlika se mogla javiti isključivo zbog negativnog utjecaja pasivnih struktura koje okružuju mišić.

Pored navedenog, baš kao što je to bio slučaj kod amplitude elektrostimulirane kontrakcije, nalazi prilikom TMG testiranja mišića *vastus lateralis* se razlikuju od dosadašnje literature zbog postojanja platoa nakon aktivacijskog podražaja.

6.2.3. Razlike između longitudinalnog i transverzalnog Tr-a

Kada je u pitanju Tr, statistički značajne razlike u odnosu na pre-PAP mjerenje javile su se isključivo prilikom TMG testiranja. Međutim, iako statistički značajne, vremenski slijed, veličina i smjer promjena su se razlikovali između dva testirana mišića.

Promjene u odnosu na pre-PAP mjerenje su se prilikom transverzalnog mjerenja kod mišića *vastus lateralis* javile u prvom post-PAP mjerenju (-56%) te su bile značajne jednu minutu nakon AP-a, nakon čega se vrijednost Tr-a vratila na inicijalnu razinu, dok se vrijednosti Tr-a nisu statistički značajno razlikovale ni u jednoj vremenskoj točki tijekom longitudinalnog mjerenja.

Razlike koje su se javile kod mišića *vastus medialis* nešto su drugačije. Naime, statistički značajne razlike, koje su se javile kod ovog mišića bile su oprečne onim zabilježenim kod mišića *vastus lateralis*. Pored toga, za razliku od svih ostalih varijabli, prilikom TMG testiranja Tr-a mišića *vastus medialis* primijećeni su odgođeni učinci te se statistički značajna razlika u odnosu na pre-PAP mjerenje javila tek jednu minutu nakon aktivacijskog podražaja. U ovoj točki mjerenja zabilježena srednja vrijednost (medijan) Tr-a bila je više od duplo (+106,6%) veća u odnosu na pre-PAP mjerenje te je u narednoj minuti dodatno povećana (+156,7% u odnosu na pre-PAP mjerenje), nakon čega se smanjuje te se u petoj minuti nakon aktivacijskog podražaja nije statistički značajno razlikovala od pre-PAP vrijednosti.

Kada su u pitanju rezultati longitudinalnog testiranja, oni se mogu naći u prethodnoj literaturi (Petrella i sur., 1989; Requena i sur., 2008; Miyamoto i sur., 2011) te ukazuju na prisustvo iste razine potencijacije i lokalnog mišićnog zamora.

Pored toga, kada je u pitanju TMG testiranje, rezultati zabilježeni kod mišića *vastus lateralis* u potpunosti su u skladu s većinom dosadašnjih studija o PAP-u, dok, rezultati zabilježeni kod mišića *vastus medialis* ukazuju na dominaciju lokalnog mišićnog zamora. Postavlja se pitanje zašto se ova dva tipa testiranja razlikuju. Vrlo je vjerojatno da su ovome doprinijeli učinci aktivacijskog podražaja na tetive koje vrše transfer sile. Detaljnije u poglavlju 6.2.5.

6.2.4. Razlike između longitudinalnog i transverzalnog Ts-a

Vrijeme održanja sile iznad 50% statistički se značajno razlikovalo između longitudinalnog i transverzalnog mjerenja isključivo kod mišića *vastus lateralis*. Statistički značajne razlike između različitih točki mjerenja nisu primijećene kod mišića *vastus medialis,* bez obzira na tip testiranja.

Iako se statistički značajne razlike između vrijednosti zabilježenih tijekom različitih vremenskih točki nisu javile prilikom longitudinalnog testiranja miišića *vastus lateralis*, statistički značajna razlika u odnosu na pre-PAP mjerenje zabilježena je u prve dvije post-PAP točke mjerenja prilikom TMG testiranja. Kao što je ranije navedeno, uzevši u obzir da je Ts zbir Tc-a i Tr-a, vrlo je vjerojatno da se razlika javila zbog toga što su se kod ovog mišića prilikom TMG testiranja javile razlike u oba navedena parametra u prve post-PAP točke mjerenja.

6.2.5. Pozadinski mehanizmi razlika između longitudinalnog i transverzalnog odgovora

Mnogo faktora utječe na mjerenje longitudinalnog mišićnog odgovora na jedan električni impuls (*twitch*). Sila generirana tijekom jednog elektrostimuliranog podražaja manja je od 10% maksimalne voljne kontrakcije (Prasartwuth i sur., 2006) te se prenosi kroz elastične dijelove lokomotornog aparata do točke mjerenja (Šimunič i sur., 2011), koji mogu utjecati na rezultat. Pored toga javlja se trenje između aktivnog dijela mišića i pasivnih dijelova mišića ili drugih neaktivnih mišića koji ga okružuju (a inače su sinergisti u nekom pokretu) (Huijing i Baan, 2001) te je odgovor mišića umanjen uslijed mehaničkog prigušivanja aktivnog mišića, tkivima koja ga okružuju (Stevens i sur., 1980).

Allen i suradnici (1989) navode da elektrostimulirane kontrakcije mogu rezultirati nedovoljnom aktivacijom mišića u svrhu dinamometrijske procjene sile maksimalnog izometrijskog mišićnog odgovora te pored toga Hoyle (1983) i Kawakami i Lieber (2000) navode da sila mišića mora djelovati kroz zglob i niz elastičnih struktura prije nego se izmjeri pomoću odgovarajuće opreme (najčešće dinamometra). Pored navedenog, i interakcija s okolnim mišićima, ukoliko se radi o perkutanoj elektrostimulaciji jednog mišića ili glave mišića može negativno utjecati na longitudinalni odgovor (silu) elektrostimulirane kontrakcije (Šimunič i sur., 2010).

Za razliku od navedene metode, TMG je manje ovisan o elastičnim karakteristikama mišića i tetiva, ali i o mehaničkim karakteristikama zgloba (Šimunič, 2003). Koren i suradnici (2015) su na osnovu matematičkog modela, koji je postavio Šimunič (2003), primijetili da prethodno navedeni čimbenici u velikoj mjeri (x4,6) utječu na rezultate obrtnog momenta sile u odnosu na TMG parametre.

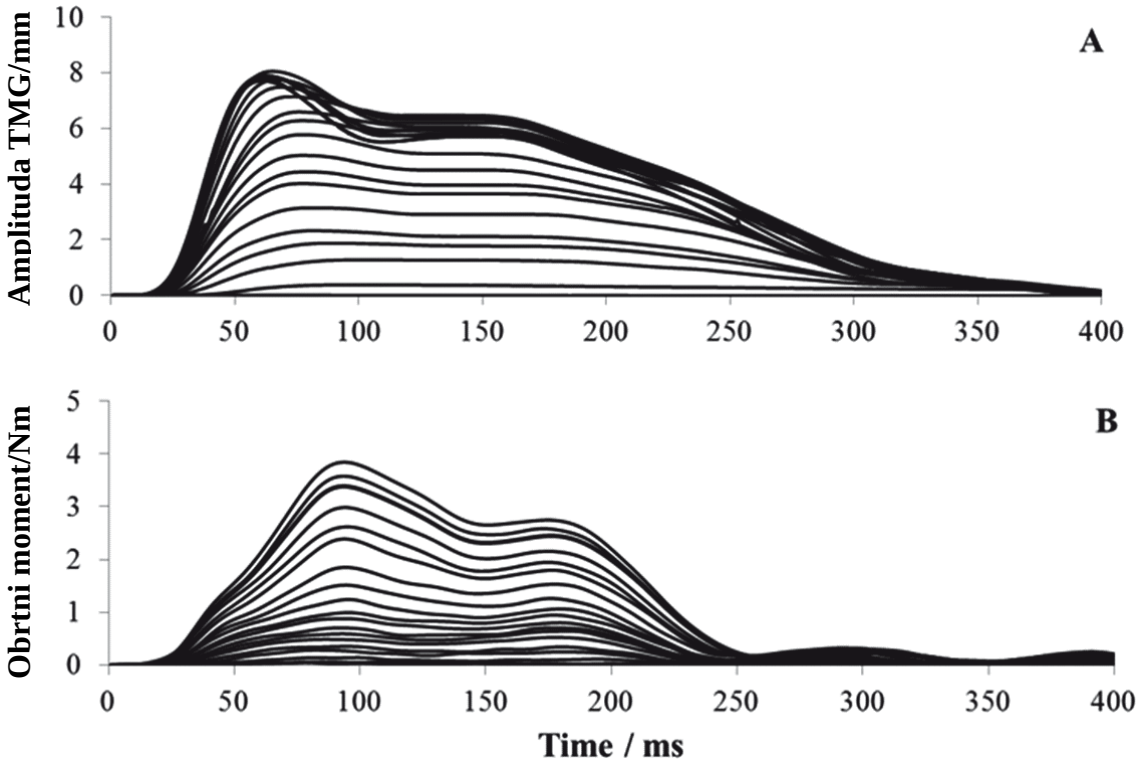
Koren i suradnici (2015) su došli do zaključka da rezultati TMG-a, a na osnovu primijećenih kraćih vremenskih parametara, za razliku od longitudinalnog odgovora, daju bolji uvid u intrinzična svojstva skeletne muskulature. Tako, ti su znanstvenici primijetili 42,7% kraće vrijeme kontrakcije mišića *vastus lateralis* kod transverzalnog u odnosu na longitudinalno testiranje. Nešto veću razliku (~61,3% – izračunato na osnovu aritmetičkih sredina) su kod mišića *biceps brachii* primijetili Šimunič i suradnici (2010). Pored toga, važno je navesti sve razlike između transverzalnog i longitudinalnog odgovora mišića tijekom elektrostimulirane kontrakcije, koje su primijetili Šimunič i suradnici (2010).

1. Najveći odgovor se javlja ranije kod transverzalnog, u odnosu na longitudinalni odgovor.
2. Faza relaksacije kod longitudinalnog odgovora je kraća u odnosu na transverzalni.
3. Dva zubca, kao pokazatelji aktivacije brzokontraktilnih i sporokontraktilnih vlakana primijećena su isključivo kod transverzalnog odgovora.

Sve tri razlike su primijećene i u ovoj studiji, međutim, ono što se razlikuje od svih (koliko je poznato autoru) dinamometrijskih i MMG (izuzev TMG) studija jesu dva zubca koja ukazuju na aktivaciju različitih tipova mišića. Naime, dva zubca u transverzalnom odgovoru mišića (kod mišića *gastrocnemius* mačke) nisu primijećena u studijama Orizija i suradnika (1999, 2000), u kojima su bočne oscilacije mjerene laserom, međutim Šimunič i suradnici (2010) navode da su u svom neobjavljenom istraživanju, pomoću lasera i brze kamere, kao alternative za TMG senzor, primijetili dva zubca u transverzalnom odgovoru prilikom elektrostimulacije mišića *biceps brachii*.

Hill (1938) navodi da sila generirana uslijed mišićne kontrakcije ovisi o aktivnim (mišić) i pasivnim (tetive i fascije) segmentima mišića. Prema tome, osim od mišićnog odgovora, kontraktilna svojstva elektrostimuliranih kontrakcija ovise i o mehaničkim parametrima tetiva (Pearson i Onambele, 2006). Konkretnije, s obzirom na to da su tetive „zadužene" za prijenos mišićne sile na kosti, te da je u dosadašnjim studijama primijećena korelacija (r=0,55-0,86)

rigiditeta tetiva i razine izvedbe različitih motoričkih zadataka (Onambélé i sur., 2007; Bojsen-Møller i sur., 2005), osobito ukoliko se radi o maksimalnim voljnim kontrakcijama (Bojsen-Møller i sur., 2005), on može utjecati na rezultate longitudinalnog mjerenja kontraktilnih parametara. Utjecaj pasivnih struktura na longitudinalne kontraktilne parametre elektrostimulirane izometrijske kontrakcije primijećen je u studiji Korena i suradnika (2015). Naime, ovi autori u svojoj studiji nisu primijetili statistički značajnu korelaciju između longitudinalno i transverzalno mjerenih Td i Tc kod mišića *vastus lateralis.*



Slika 16. Prikaz krivulje TMG (A) i dinamometrijskog mišićnog odgovora (B) na jedan električni impuls kod mišića vastus lateralis *(preuzeto iz: Koren i sur., 2015)*

Međutim, konkretni učinci PAP-a na pasivne segmente mišića nisu u potpunosti dokazani. Tako, Behm i suradnici (2004) i Baudry i suradnici (2005) navode da se učinci PAP-a mogu primijetiti i na tetivi „aktiviranog" mišića, Obst i suradnici (2013) te Tardioli i suradnici (2012) u svojim preglednim člancima navode da se tenzija Ahilove tetive akutno mijenja u skladu s intenzitetom, trajanjem i tipom izvedenog motoričkog zadatka dok, na primjer, Gago i suradnici (2014) navode da kratko trajanje aktivacijskog podražaja, u svrhu generiranja PAP-a, nije dovoljno za akutnu promjenu tenzije Ahilove tetive. Pored njih, Butler i suradnici (1978) i Mademli i suradnici (2006) navode da je podražaj namijenjen generiranju PAP-a (visok intenzitet i nizak obim) ispod praga neophodnog za značajne akutno-rezidualne učinke.

Za razliku od prethodnih, treći pak navode da jedna maksimalna voljna izometrijska kontrakcija može izazvati povećanu tenziju tetive (npr. 5,1% u studiji od Muramatsu i sur., 2001), ali samo tijekom aktivne faze kontrakcije. Pored toga, kako neki autori navode (Comyns i sur., 2007; Moir i sur., 2011), povećan rigiditet i tenzija tetive ne javljaju se u samoj tetivi nego su ovisni o tonusu mišića. Naime, akutno povećanje tonusa mišića nakon visokointenzivnih aktivnosti, prema Maloneyju i suradnicima (2014), moglo bi predstavljati razlog povećane tenzije pasivnog dijela mišićnog aparata. Konkretnije, kada su u pitanju učinci aktivacijskog podražaja različitih intenziteta na izvedbu skokova, De Vilarreal i suradnici (2007) i Comyns i suradnici (2007) navode da najbolje učinke imaju intenziteti iznad 80% -1 RM (što je objašnjeno svim prethodno navedenim mehanizmima) te da su ovi nalazi vrlo vjerojatno povezani s višom razinom ukupnog mišićno-tetivnog rigiditeta (Till i Cooke, 2009), što za rezultat ima smanjeno vrijeme transfera sile s mišića na skeletni sustav. U suštini, povećan tonus mišića rezultira pretenzijom u pasivnim komponentama lokomotornog aparata (McMahon i Pearson, 2012).

U dosadašnjim istraživanjima se mogu naći i studije koje ukazuju na umanjen rigiditet Ahilove tetive nakon serije maksimalnih voljnih izometrijskih kontrakcija (Kay i Blazevich, 2009a, b, 2010), koji se može primijetiti i 30 minuta nakon podražaja (Kay i Blazevich, 2009a). Ovi su autori (Kay i Blazevich, 2009a) zabilježili da 6x8 sekundi maksimalne voljne izometrijske kontrakcije rezultira statistički značajnim smanjenjem (-10,9%) rigiditeta Ahilove tetive.

Vrijedi navesti i studiju koju su proveli Moir i suradnici (2011), koja je ujedno i oprečna većini dosadašnjih istraživanja, u kojoj su autori primijetili veću tenziju tetiva, ali ne i povećanje visine skoka, nakon aktivacijskog podražaja (čučanj) visokog intenziteta u odnosu na onaj velikog volumena.

S obzirom na to da smanjena vrijednost Dm-a ukazuje na povećan tonus testiranog mišića (Rey i sur., 2012; Valenčič i Knez, 1997) te da je u svim post-PAP mjerenjima primijećena viša vrijednost ovog parametra u odnosu na pre-PAP, iako nije direktno mjereno, može se pretpostaviti da se prethodno spomenuta pretenzija pasivnih komponenti lokomotornog aparata nije javila te da je prenos sile kroz ove strukture, između ostalog, mogao rezultirati različitim nalazima primijećenim tijekom ova dva tipa testiranja.

U skladu s navedenim, a i s obzirom na to da se prilikom evaluacije PAP-a različitim funkcionalnim zadacima, ili pak, kao u ovom slučaju, longitudinalnim dinamometrijskim mjerenjem, neophodno je u vidu imati da transfer elastične energije može utjecati na interakciju

potencijacije i zamora i obrnuto (Wilson i Flanagan, 2008; Boullosa i sur., 2011) te je stoga, kako se može i primijetiti iz rezultata studije, PAP učinke na kontraktilne parametre pojedinačnih mišića bolje procjenjivati koristeći TMG nego dinamometriju.

Pored transfera sile, longitudinalni odgovor na elektrostimuliranu kontrakciju, tijekom procjene pojedinačnih mišića odgođen je uslijed mehaničkog prigušivanja, aktivnog mišića, tkivima koja ga okružuju. Tako su Oda i suradnici (2007) primijetili odgođenu (10–30ms) produkciju sile mišićā *gastrocnemius lateralis* i *soleus* nakon električne stimulacije živca u odnosu na perkutanu elektrostimulaciju. Prema tome, može se zaključiti da interakcija mišića s tkivima koja ga okružuju utječe na vremenske parametre kontrakcije. Ovo je u skladu s prethodno navedenim nalazima Šimuniča i suradnika (2010).

Dodatni razlog zbog kojeg je bolje rabiti TMG, ukoliko je cilj procjena kontraktilnih parametara mišića jest sam način testiranja. Naime, TMG testiranje se vrši pod unaprijed određenim kutom za svaki pojedinačni mišić dok su, prilikom dinamometrijskog testiranja, a kako se može primijetiti u dosadašnjim studijama, različiti autori procjenjivali kontraktilne parametre kvadricepsa pod različitim kutovima koljena. Ovakve razlike značajno utječu na same rezultate. Naime, čimbenici koji utječu na vezu obrtnog momenta i kuta jesu duljina sarkomere (Gordon i sur., 1966; Herzog i sur., 1992) te promjene u elastičnim komponentama i mišićnoj arhitekturi (An i sur., 1981). Pored toga, osjetljivost na Ca^{2+}, kao primarni mehanizam PAP-a na mišićnoj razini, ovisna je o duljini mišića (Stephenson i Williams, 1982; Martyn i Gordon, 1988; Balnave i Allen, 1996). Rassier (2000) čak navodi da su, konkretno, učinci fosforilacije regulatornih lakih lanaca miozina manji kod produljenog, u odnosu na skraćeni mišić.

Uzevši u obzir da, kako je primijećeno i u ovoj studiji, postoje razlike između različitih metoda evaluacije kontraktilnih parametara, ali i da su Madeleine i suradnici (2006) primijetili da se prilikom korištenja različitih MMG senzora tijekom mjerenja mogu javiti nedosljednosti u rezultatima, neophodno je imati u vidu da se mogu javiti nedosljednosti u rezultatima i nepravilnosti prilikom komparacije samih rezultata između studija.

Kada je u pitanju „nekomparabilnost" rezultata, vrijedi spomenuti studiju Cescona i suradnika (2007). Cilj ove studije je bio procijeniti topografski MMG odgovor tijekom voljne kontrakcije motornih jedinica niskog praga (eng. *low-threshold*) pomoću 15 akcelerometara pričvršćenih na površinu mišića. Oni su primijetili heterogene rezultate akceleracije i distribucije bočnih vibracija na površini mišića tijekom aktivacije jednog tipa mišićnih vlakana. Amplituda MMG

signala općenito nije u velikoj mjeri ovisila o longitudinalnoj poziciji, a najveće bočne oscilacije su primijećene na površini trbuha, mišića što je primijećeno i u drugim MMG studijama (Cescon i sur., 2004; Alves i sur., 2010). Iako metoda korištena u ovoj studiji daje izuzetno detaljne rezultate, ona će, primarno zbog kompliciranosti, koja se ogleda u opremi (15 senzora) i vremenu potrebnom za njeno pozicioniranje, vjerojatno biti uporabljana od strane izuzetno malog broja znanstvenika te još manjeg broja praktičara.

6.3. Povezanosti veličine postaktivacijskih učinaka tijekom transverzalnog mjerenja i udjela brzokontraktilnih mišićnih vlakana

Funkcionalne karakteristike skeletne muskulature ovise o svojstvima mišićnih vlakana, primarno izoformnim oblicima miozinskih teških lanaca koji ujedno i determiniraju određene tipove mišića (Dahmane i sur., 2006). U većini dosadašnjih studija susreću se tri osnovna tipa, koja se mogu podijeliti u dvije skupine, sporokontraktilna (tip I) i brzokontraktilna (tipovi IIa i IIb) mišićna vlakna (Brooke i Kaiser, 1970).

Veličina PAP učinaka, kako je primijećeno u dosadašnjim studijama, ovisi o intrinzičnim mišićnim karakteristikama, te se najveći PAP učinci javljaju kod mišića s većinskim udjelom brzokontraktilnih mišićnih vlakana (Moore i Stull, 1984; Hamada i sur., 2000; Miyamoto i sur., 2009, 2010). Prema tomu, kompozicija mišića je jedan od odlučujućih čimbenika koji utječu na veličinu PAP učinaka (Hamada i sur., 2000; Chiu i sur., 2004). O njoj ovise brzina oporavka i povratak izvedbe na početnu razinu (Docherty i Hodgson, 2007).

Razlog ovomu leži u činjenici da pojedinci s većim udjelom brzokontraktilnih mišićnih vlakana posjeduju povećanu sposobnost fosforilacije regulatornih lakih lanaca miozina (Hamada i sur., 2000; Parry i sur., 2008; Smith i Fry, 2007) te stoga i generiraju veći PAP učinak (Chiu i sur., 2003; Jo i sur., 2009; Ruben i sur., 2010; Tillin i Bishop, 2009).

TMG, kako je ranije navedeno, daje informacije o kontraktilnim karakteristikama mišića (Valenčič i Knez, 1997), tonusu mišića, brzini kontrakcije, lokalnom mišićnom zamoru (Rey i sur., 2012; Rusu i sur., 2013) te pored toga mogućnosti praćenja zamora mišićnih vlakana (Knez i sur., 1999). Međutim, ono najbitnije te samim time i razlog posljednje hipoteze jest činjenica da TMG daje uvid u tip dominantnih mišićnih vlakana (Dahmane i sur., 2001) te, kako navode Šimunič (2003) i Šimunič i suradnici (2010), daje prikaz integrativnog odgovora brzokontraktilnih i sporokontraktilnih mišićnih vlakana.

Iako je biopsija mišića osnovno sredstvo procjene sastava mišića, u studiji Šimuniča i suradnika (2011) predložena je jednostavnija, neinvazivna, TMG metoda koja daje precizne informacije o sastavu mišića. Naime, Šimunič i suradnici (2011) su primijetili linearnu, pozitivnu povezanost vremena kontrakcije, mjerenog TMG-om, i omjera MHC-1 (izoformni oblici miozinskih teških lanaca) kod mišića *vastus lateralis*. Pored toga, u studiji Šimuniča i suradnika (2011) primijećene su statistički značajne ($p<0,001$) pozitivne korelacije između MHC-1 i Tc-a ($r=0,88$), Tr-a ($r=0,67$) i Td-a (0,61). Povezanost rezultata biopsije mišića i TMG kontraktilnih

parametara primijećena je i u nekim drugim dosadašnjim studijama (Dahmane i sur., 2001; 2005). Tako su, Dahmane i suradnici (2005) u svojoj studiji primijetili povezanost omjera različitih tipova mišićnih vlakana (rezultata biopsije 9 mišića) s kontraktilnim parametrima TMG mjerenja.

Dahmane i suradnici (2001, 2005) navode da, što je veći udio sporokontraktilnih mišićnih vlakana unutar testiranog mišića, dulje je vrijeme kontrakcije te njihovi rezultati ukazuju da je postotak mišićnih vlakana tipa I unutar mišića u statistički značajnoj korelaciji (r=0,76–0,9) s kontraktilnim parametrima tijekom 10% i 50% maksimalne električne stimulacije (Dahmane i sur., 2005). Daleko najveći koeficijent korelacije koji je zabilježen između TMG kontraktilnih parametara i tipa I mišićnih (r=0,93) također su primijetili Dahmane i suradnici (2001). U suštini, ukoliko bi se pojednostavilo, povećana vrijednost Tc-a, a naročito iznad 30 ms, ukazuje na veći udio sporokontraktilnih vlakana, u odnosu na brzokontraktilna, u testiranom mišiću (Rey i sur., 2012; Valenčič i Knez, 1997).

Pored toga, važno je navesti da, s obzirom na to da se na TMG signalu jasno razlikuju odgovori brzokontraktilnih i sporokontraktilnih mišićnih vlakana, što je ranije spomenuto u razlikama između longitudinalnog i transverzalnog mišićnog odgovora na elektrostimulaciju, ova metoda manipulacijom jačine struje omogućava grubu procjenu prostorne distribucije različitih tipova mišićnih vlakana unutar skeletne muskulature (Dahmane i sur., 2005).

Kada su u pitanju rezultati ovog istraživanja, kao što se može primijetiti u poglavlju s rezultatima, nije zabilježena statistički značajna povezanost između rezultata dviju neinvazivnih procjena udjela brzokontraktilnih mišićnih vlakana mišića *vastus lateralis* i veličine PAP učinaka, međutim ona je primijećena kod mišića *vastus medialis*, i to u oba slučaja.

U skladu s navedenim može se reći da je hipoteza H3 djelomično potvrđena jer se statistički značajna korelacija između veličine promjene transverzalnih kontraktilnih parametara nakon PAP-a i udjela brzokontraktilnih vlakana nije javila kod mišića *vastus lateralis*, ali se javila kod mišića *vastus medialis*.

Kada su u pitanju rezultati korelacijske analize između dviju neinvazivnih procjena udjela brzokontraktilnih mišićnih vlakana i veličine PAP učinaka, Pearsonov koeficijent korelacije je bio statistički značajan u oba slučaja. Vrijednost Tc-a zabilježena prije aktivacijskog podražaja statistički je značajno korelirala s najvećim procentualnim (Δ%) porastom Tc-a nakon

aktivacijskog podražaja dok je koeficijent korelacije između istog parametra (Δ%) i rezultata jednadžbe predložene od strane Šimuniča i suradnika (2011) bio nešto viši.

$$\mathrm{MHC1}[\%] = 2.829 \times \mathrm{Tc} + 2.980 \times \mathrm{Td} + 0.127 \times \mathrm{Tr} - 121.023$$

Ovi rezultati su u skladu s većinom prethodnih studija. Tako su, na primjer, Terzis i suradnici (2009) primijetili jaku korelaciju ($r=0,76$; $p<0,01$) između veličine PAP-a i postotka brzokontraktilnih mišićnih vlakana mišića *vastus lateralis*. Pored ove studije, u nekoliko navrata je primijećeno da su PAP učinci najveći kod mišića koji imaju najkraće vrijeme kontrakcije (Tc), odnosno, koji imaju najveći udio mišićnih vlakana tipa II. Ovo je primijećeno kod opružača koljena (Pääsuke i sur., 2007; Hamada i sur., 2000b), te dorzalnih (O'Leary i sur., 1997) i plantarnih (Vandervoort i sur., 1983; Vandervoort i McComas, 1983; Miyamoto i sur., 2009) fleksora.

U dosadašnjim studijama, koje su procijenjivale učinke između različitih mišića, veća razina potencijacije je primijećena na mišićima s većim udjelom brzokontraktilnih mišićnih vlakana (Hamada i sur., 2000). Tako su, na primjer, Johnson i suradnici (1973) primijetili veći PAP učinak na mišić *tibialis anterior*, koji ima ~27%, nego na mišić *soleus*, koji ima ~11% brzokontraktilnih mišićnih vlakana. Primijećeno je, također, da je PAP učinak na *m. gastrocnemius*, koji ima veći udio mišićnih vlakana tipa II, veći od onog zabilježenog na mišiću *soleus* (Vandervoort i McComas, 1983; Miyamoto i sur., 2009). Ovi nalazi ukazuju na to da aktivacijski podražaj može, na različite mišiće, koji sudjeluju u istom pokretu, rezultirati različitim razinama potencijacije. Razlog ovomu bi, primarno, mogao biti sastav ovih dvaju mišića. Naime, *m. gastrocnemius medialis* u svom sastavu ima >50% brzokontraktilnih mišićnih vlakana, dok *m. soleus* ima 70-100% sporokontraktilnih mišićnih vlakana (Miyamoto i sur., 2010).

Slični nalazi se mogu pronaći i u ovoj studiji. Naime, iako nije direktno mjereno, na osnovu rezultata se može pretpostaviti da *m. vatus medialis* ima veći udio brzokontraktilnih mišićnih vlakana nego *m. vastus lateralis*.

Pored prethodno navedenih studija u kojima su nalazi koji su u skladu s rezultatima ove studije, u dosadašnjoj literaturi se mogu naći studije koje potvrđuju i rezultate koji su kod ispitivanja mišića *vastus lateralis*. Naime, u studijama Stuarta i suradnika (1988) te Hamade i suradnika (2000) nije primijećena statistički značajna korelacija između veličine PAP učinaka i procenta mišićnih vlakana tipa II kod mišića *vastus lateralis*.

Rezultati koji su interesantni jesu oni koje su dobili Hamada i suradnici (2000). Naime, ovi autori nisu primijetili statistički značajnu korelaciju između veličine PAP učinaka i postotka brzokontraktilnih (tip II) mišićnih vlakana, međutim, oni su alteracijama u statističkoj analizi, konkretnije, nakon što su iz uzorka izdvojili i analizirali 4 ispitanika s najmanjim i 4 s najvećim PAP učincima primijetili 36% veću površinu mišićnih vlakana tipa II (32% IIa i 40% IIb) te pored toga i veći procentualni udio brzokontraktilnih mišićnih kod ispitanika, kod kojih je primijećen veći (71,8±9,2 %) u odnosu na one kod kojih je primijećen manji (38,6±6,9 %) PAP učinak. Interesantno je da je kod ispitanika s većim PAP učinkom, on bio statistički značajan isključivo tijekom prve 2,5 minute nakon aktivacijskog podražaja, što je bio slučaj i s drugom skupinom.

Ovi autori su, pored toga, imali i još nekoliko metodoloških propusta. Naime, ono što je moglo uvelike utjecati na rezultate ove studije jest činjenica da je PAP induciran 10-sekundnom maksimalnom voljnom izometrijskom ekstenzijom koljena u kojoj sudjeluju sve glave kvadricepsa, dok je mišićna biopsija rađena isključivo na mišiću *vastus lateralis*. Za razliku od biopsije, koja je vršena isključivo na mišiću *vastus lateralis*, vrijeme kontrakcije je zabilježeno tijekom perkutane elektrostimulacije femoralnog živca, tako da su, tijekom ove kontrakcije, ponovo, aktivne bile sve glave kvadricepsa. Važno je napomenuti da nijedna analiza u ovoj studiji nije rezultirala statistički značajnom korelacijom između veličine PAP učinaka i vremena polurelaksacije.

Nalazi primijećeni u ovoj studiji, odnosno, statistički značajna korelacija između navedenih parametara dodatno potvrđuje predložene pozadinske mehanizme, koji ukazuju da je najveća razina PAP-a nakon primjene maksimalnih opterećenja primijećena kod brzokontraktilnih (tip II) mišićnih vlakana (Hamada i sur., 2000a, b; Sale, 2002; Smith i Fry, 2007). Razlog tome je veća razina fosforilacije regulatornih lakih lanaca miozina kod brzokontraktilnih u odnosu na sporokontraktilna mišićna vlakna (Sweeney i sur., 1993). Ovakvi učinci su primijećeni kod sisavaca (Moore i Stull, 1984) i ljudi (Hamada i sur., 2000; O'Leary i sur., 1997).

Pored toga, Wetzel i Gros (1998) su primijetili veliku razliku u vremenu kontrakcije između izoliranih brzokontraktilnih (29 ms) i sporokontraktilnih (151 ms) motornih jedinica.

6.3.1. Dekompozicija TMG signala

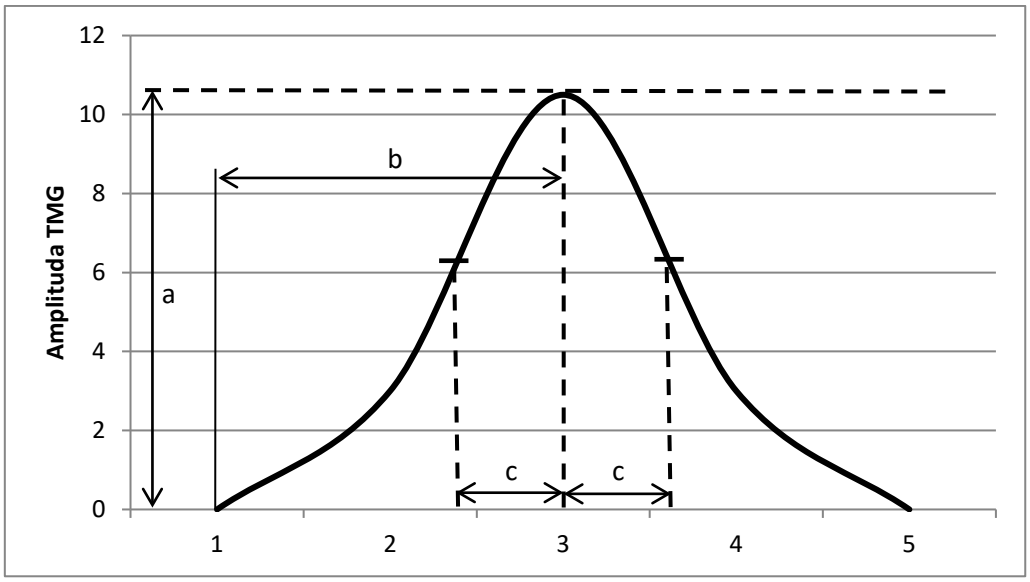
Kako je ranije spomenuto, Šimunič i suradnici (2010) su primijetili dva vrška tijekom TMG testiranja. Oni navode da su upravo ova dva vrška mogući pokazatelji aktivacije

brzokontraktilnih i sporokontraktilnih vlakana te da se oni mogu primijetiti isključivo kod transverzalnog odgovora. U skladu s tim, podešavanjem krivulje se mogu, teoretski, ekstrapolirati vrijednosti vremenskih parametara različitih tipova mišićnih vlakana, odnosno, ukoliko bi se matematičkim modelom napravila dekompozicija TMG signala, mogao bi se dobiti detaljan uvid u promjene koje su se, uslijed djelovanja postaktivacijske potencijacije, javile kod različitih tipova mišićnih vlakana.

U formuli 3. (*eq 3.*) je predstavljen matematički model dekompozicije TMG signala:

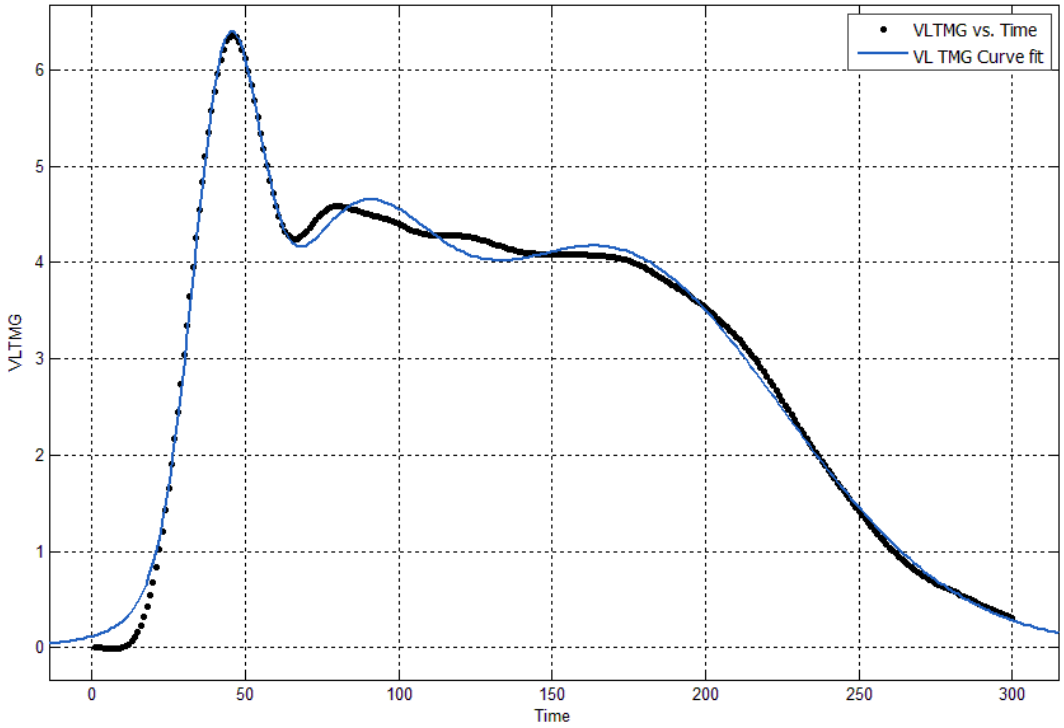
$$eq3. \quad a_1 e^{-\left(\frac{x-b_1}{c_1}\right)^2} + a_2 e^{-\left(\frac{x-b_2}{c_2}\right)^2} + a_3 e^{-\left(\frac{x-b_3}{c_3}\right)^2} = \sum_{k=1}^{3} a_k e^{-\left(\frac{x-b_k}{c_k}\right)^2}$$

gdje je x vrijeme, a_1, a_2, a_3 amplituda, b_1, b_2, b_3 vrijeme najviše amplitude, c_1, c_2, c_3 vrijeme pada amplitude na 63,2% početne vrijednosti. Dekompozicija signala podrazumijeva podešavanje tri Gaussove krive unutar TMG odgovora na način da svaka predstavlja jedan od tri tipa mišićnih vlakana. Pri ovom podešavanju krivulja (eng. *curve fitting*) svaka od tri navedene ima istu polaznu točku, a to zbog činjenice da se tijekom perkutane elektrostimulacije, za razliku od voljne kontrakcije u kojoj se mišićna vlakna aktiviraju po principu veličine, simultano, neselektivno aktiviraju različiti tipovi mišićnih vlakana. Nakon podešavanja Gaussovih krivulja, parametri *a*, *b* i *c* se ekstrapoliraju iz sve tri krivulje. Pri komparaciji s TMG parametrima, *a* predstavlja Dm, *b* predstavlja Tc, dok *c* ukazuje na vrijeme od maksimalne vrijednosti Dm do 63,2% Dm-a te je pokazatelj vremena relaksacije (ali i kontrakcije – s obzirom na to da se radi o Gaussovoj krivulji).



Slika 17. Shematski prikaz dekompozicije TMG signala i pripadajućih parametara

Nakon detaljne analize parametara *a* (amplitude), *b* (vrijeme do maksimalne amplitude) i *c* (vremena relaksacije) tri dobivene krivulje te nakon analize svih prethodno navedenih parametara analizom varijance za ponovljena mjerenja, kojoj su podvrgnuti TMG i dinamometrijski mišićni odgovori u svrhu provjere prve hipoteze, može se primijetiti da su se statistički značajne razlike između pre-PAP i ostalih točki mjerenja, nastale uslijed djelovanja PAP-a, javile isključivo kod prve krivulje, dok kod druge dvije nisu primijećene statistički značajne razlike. Naime, statistički značajne negativne razlike primijećene su u odnosu na $b_1$pre i $c_1$pre samo u prvoj točki mjerenja (30 s nakon aktivacijskog podražaja) dok je vrijednost $a_1$pre bila statistički značajno manja u odnosu na a_1 vrijednosti zabilježene u tri post-PAP mjerenja (30 s, 1 i 2 minute). Kada su u pitanju parametri preostalih dviju krivulja, $a_{(2,3)}$, $b_{(2,3)}$, $c_{(2,3)}$, oni se nisu statistički značajno razlikovali između mjerenja.



Slika 18. Prikaz dekompozicije signala

Ovi rezultati su u skladu s dosadašnjim studijama, u kojima autori navode da postaktivacijska potencijacija ima najveći učinak na brzokontraktilna mišićna vlakna (Hamada i sur., 2000a, b; Sale, 2002; Smith i Fry, 2007). Također, ovi rezultati, uzevši u obzir da je došlo do promjena (iako ne statistički značajnih) i u parametrima krivulja koje predstavljaju sporokontraktilna mišićna vlakna, potvrđuju nalaze studija koje su proveli Close i Hoh, (1969), Vandervoort i suradnici (1983), Binder-Macleod i suradnici (2002) te Miyamoto i suradnici (2011), koji navode da, iako se potencijacija javlja uglavnom kod brzokontraktilnih mišićnih vlakana, ona

ima učinak i na sporokontraktilna mišićna vlakna te je veća kod brzokontraktilnih u odnosu na sporokontraktilna vlakna (Moore i Stull, 1984). Važno je napomenuti da bi ovi nalazi (rezultati dekompozicije) vrlo vjerojatno bili niži ukoliko se ne bi primjenjivala maksimalna voljna kontrakcija tijekom aktivacijskog podražaja zbog toga što se PAP javlja, uglavnom, nakon dovoljne stimulacije brzokontraktilnih vlakana (Sweeney i sur., 1993; Brown i Loeb, 1998).

S obzirom na to da jedan od primarnih ciljeva ove disertacije nije bio predstaviti dekompoziciju TMG odgovora na elektrostimulaciju, ali da je ona predstavljena u posljednjem njenu dijelu, u posljednjem dijelu poglavlja *Rezultati* je dana tablica (tablica 10.) aritmetičkih sredina, standardnih devijacija i razine statističke značajnosti razlika između pre-PAP i svih post-PAP mjerenja za parametre a_1, b_1 i c_1.

Na osnovu rezultata dekompozicije TMG signala, a i razlika zabilježenih između pre- i post-PAP mjerenja, moguće je pretpostaviti da se ovom metodom može dobiti detaljniji uvid u kontraktilna svojstva različitih tipova mišićnih vlakana, te indirektno ustanoviti razina fosforilacije brzokontraktilnih vlakana. Ova pretpostavka ipak ostaje za buduća istraživanja.

7. OGRANIČENJA ISTRAŽIVANJA I SMJERNICE BUDUĆIH ISTRAŽIVANJA

Jedno od temeljnih ograničenja studije jest činjenica da se, konkretno u svrhu procjene utjecaja udjela mišićnih vlakana na razinu postaktivacijske potencijacije, nije radila biopsija mišića koja bi dala daleko više informacija o ovom segmentu istraživanja. U skladu s navedenim, osnovna preporuka za buduća istraživanja ovoga tipa je implementacija biopsije mišića.

Pored prethodno navedene biospije mišića, za buduća istraživanja se može preporučiti i uporaba tetaničkih elektrostimulacija, kako tijekom aktivacijskog podražaja, tako i u različitim točkama mjerenja. Ovime bi autori također mogli dobiti detaljniji uvid u kontraktilna svojstva, ali i mehanizme same postaktivacijske potencijacije.

8. ZAKLJUČAK

U skladu s postavljenim ciljevima i hipotezama može se zaključiti sljedeće:

U skladu s prvim ciljem, a na osnovu rezultata, može se zaključiti da obje metode procjene kontraktilnih parametara mišića mogu uspješno procijeniti PAP učinke na obje testirane glave mišića *quadriceps femoris* te one mogu biti kvantificirane, bez obzira na mišić ili način testiranja.

U skladu s pretpostavkom da će transverzalni odgovor mišićā *vastus medialis* i *vastus lateralis* na jedan električni impuls dati bolji uvid u kontraktilna svojstva ovih mišića od longitudinalnog, mjerenog obrtnim momentom sile, može se zaključiti da visok omjer signala i šuma, ali i druge karakteristike TMG uređaja daju bolje informacije o duljini i razini učinaka postaktivacijske potencijacije. Te razlike se najviše primijete kroz (1) kraći Tc kod TMG u odnosu na longitudinalno testiranje i (2) veće promjene primijećene kod Tc prilikom TMG u odnosu na longitudinalno testiranje, koje su u skladu s teorijskim pretpostavkama ukazuju na činjenicu da longitudinalno testiranje nije dovoljno senzibilno da bi ove promjene prepoznalo.

Na osnovu rezultata se može zaključiti da neinvazivni pokazatelji procentualnog udjela brzokontraktilnih mišićnih vlakana mogu predvidjeti veličinu PAP učinaka kod mišića *vastus medialis*, ali ne i kod mišića *vastus lateralis*, te da, za razliku od zlatnog standarda za procjenu kontraktilnih parametara mišića, TMG daje bolje informacije o intrinzičnim mišićnim promjenama.

Praktična vrijednost rada se primarno ogleda u činjenici da ovo istraživanje daje razlog i opravdanje uporabe TMG u studijama koje za cilj imaju procjenu karakteristika postaktivacijske potencijacije. Nadalje, izuzetno je važan nalaz da TMG daje bolje informacije o intrinzičnim mišićnim promjenama, što ukazuje na mogućnost, ali u neku ruku i potrebu implementacije ove dijagnostičke metode u kreiranje kompleksnih i kontrastnih trenažnih protokola za svakog pojedinca posebno.

Pored prethodno navedenog, vrijednost rada leži i u prijedlogu dekompozicije TMG, koji je u ovom slučaju bio u skladu s teorijskom osnovom te pokazao potencijaciju isključivo brzokontraktilnih mišićnih vlakana.

9. LITERATURA

1. Aagaard, P., Simonsen, E. B., Andersen, J. L., Magnusson, P., & Dyhre-Poulsen, P. (2002). Neural adaptation to resistance training: changes in evoked V-wave and H-reflex responses. *Journal of Applied Physiology, 92*(6), 2309-2318.
2. Abbate, F., Sargeant, A., Verdijk, P., & De Haan, A. (2000). Effects of high-frequency initial pulses and posttetanic potentiation on power output of skeletal muscle. *Journal of Applied Physiology, 88*(1), 35-40.
3. Adams, G. R., Harris, R. T., Woodard, D., & Dudley, G. A. (1993). Mapping of electrical muscle stimulation using MRI. *Journal of Applied Physiology, 74*(2), 532-537.
4. Akataki, K., Mita, K., & Itoh, Y. (1999). Repeatability study of mechanomyography in submaximal isometric contractions using coefficient of variation and intraclass correlation coefficient. *Electromyography and Clinical Neurophysiology, 39*(3), 161-166.
5. Allen, D. G., Lee, J. A., & Westerblad, H. (1989). Intracellular calcium and tension during fatigue in isolated single muscle fibres from Xenopus laevis. The Journal of Physiology, 415(1), 433-458.
6. Allen, D. G., Lamb, G. D., & Westerblad, H. (2008). Skeletal muscle fatigue: cellular mechanisms. *Physiological Reviews, 88*(1), 287-332.
7. Alvarez-Diaz, P., Alentorn-Geli, E., Ramon, S., Marin, M., Steinbacher, G., Rius, M., . . . Cugat, R. (2016). Comparison of tensiomyographic neuromuscular characteristics between muscles of the dominant and non-dominant lower extremity in male soccer players. *Knee Surgery, Sports Traumatology, Arthroscopy, 24*(7), 2259-2263.
8. Alves, N., Sejdić, E., Sahota, B., & Chau, T. (2010). The effect of accelerometer location on the classification of single-site forearm mechanomyograms. *Biomedical Engineering Online, 9*(1), 23.
9. Alway, S., Hughson, R., Green, H., Patla, A., & Frank, J. (1987). Twitch potentiation after fatiguing exercise in man. *European Journal of Applied Physiology and Occupational Physiology, 56*(4), 461-466.
10. An, K.-N., Hui, F., Morrey, B., Linscheid, R., & Chao, E. (1981). Muscles across the elbow joint: a biomechanical analysis. *Journal of Biomechanics, 14*(10), 659663-661669.
11. Babault, N., Maffiuletti, N. A., & Pousson, M. (2008). Postactivation potentiation in human knee extensors during dynamic passive movements. *Medicine and Science in Sports and Exercise, 40*(4), 735.

12. Babault, N., Pousson, M., Michaut, A., & Van Hoecke, J. (2003). Effect of quadriceps femoris muscle length on neural activation during isometric and concentric contractions. *Journal of Applied Physiology, 94*(3), 983-990.
13. Baker, D. (2003). Acute effect of alternating heavy and light resistances on power output during upper-body complex power training. *The Journal of Strength & Conditioning Research, 17*(3), 493-497.
14. Baker, D., & Newton, R. U. (2005). Acute effect on power output of alternating an agonist and antagonist muscle exercise during complex training. *The Journal of Strength & Conditioning Research, 19*(1), 202-205.
15. Balnave, C., & Allen, D. (1996). The effect of muscle length on intracellular calcium and force in single fibres from mouse skeletal muscle. *The Journal of Physiology, 492*(3), 705-713.
16. Barry, D. T., Hill, T., & Im, D. (1992). Muscle fatigue measured with evoked muscle vibrations. *Muscle & Nerve, 15*(3), 303-309.
17. Batista, M. A., Roschel, H., Barroso, R., Ugrinowitsch, C., & Tricoli, V. (2011). Influence of strength training background on postactivation potentiation response. *The Journal of Strength & Conditioning Research, 25*(9), 2496-2502.
18. Batista, M. A., Ugrinowitsch, C., Roschel, H., Lotufo, R., Ricard, M. D., & Tricoli, V. A. (2007). Intermittent exercise as a conditioning activity to induce postactivation potentiation. *The Journal of Strength & Conditioning Research, 21*(3), 837-840.
19. Baudry, S., & Duchateau, J. (2004). Postactivation potentiation in human muscle is not related to the type of maximal conditioning contraction. *Muscle & Nerve, 30*(3), 328-336.
20. Baudry, S., & Duchateau, J. (2007). Postactivation potentiation in a human muscle: effect on the load-velocity relation of tetanic and voluntary shortening contractions. *Journal of Applied Physiology, 103*(4), 1318-1325.
21. Baudry, S., Klass, M., & Duchateau, J. (2005). Postactivation potentiation influences differently the nonlinear summation of contractions in young and elderly adults. *Journal of Applied Physiology, 98*(4), 1243-1250.
22. Bazett-Jones, D. (2004). Neither stretching nor postactivation potentiation affect maximal force and rate of force production during seven one-minute trials. *Journal of Undergraduate Research, VII*.
23. Behm, D. G., Button, D. C., Barbour, G., Butt, J. C., & Young, W. B. (2004). Conflicting effects of fatigue and potentiation on voluntary force. *The Journal of Strength & Conditioning Research, 18*(2), 365-372.

24. Berg, H., Tedner, B., & Tesch, P. (1993). Changes in lower limb muscle cross-sectional area and tissue fluid volume after transition from standing to supine. *Acta Physiologica, 148*(4), 379-385.
25. Binder-Macleod, S. A., Dean, J. C., & Ding, J. (2002). Electrical stimulation factors in potentiation of human quadriceps femoris. *Muscle & Nerve, 25*(2), 271-279.
26. Bojsen-Møller, J., Magnusson, S. P., Rasmussen, L. R., Kjaer, M., & Aagaard, P. (2005). Muscle performance during maximal isometric and dynamic contractions is influenced by the stiffness of the tendinous structures. *Journal of Applied Physiology, 99*(3), 986-994.
27. Boullosa, D. A., Abreu, L., Beltrame, L. G., & Behm, D. G. (2013). The acute effect of different half squat set configurations on jump potentiation. *The Journal of Strength & Conditioning Research, 27*(8), 2059-2066.
28. Boullosa, D. A., Tuimil, J. L., Alegre, L. M., Iglesias, E., & Lusquiños, F. (2011). Concurrent fatigue and potentiation in endurance athletes. *International Journal of Sports Physiology and Performance, 6*(1), 82-93.
29. Boyd, D. A., Donald, N., & Balshaw, T. G. (2014). Comparison of Acute Countermovement Jump Responses After Functional Isometric and Dynamic Half Squats. *The Journal of Strength & Conditioning Research, 28*(12), 3363-3374.
30. Brooke, M. H., & Kaiser, K. K. (1970). Muscle fiber types: how many and what kind? *Archives of neurology, 23*(4), 369-379.
31. Brown, I. E., & Loeb, G. E. (1998). Post-activation potentiation—a clue for simplifying models of muscle dynamics. *American Zoologist, 38*(4), 743-754.
32. Burger, H., Valenčič, V., Marinček, Č., & Kogovšek, N. (1996). Properties of musculus gluteus maximus in above-knee amputees. *Clinical Biomechanics, 11*(1), 35-38.
33. Butler, D. L., Grood, E. S., Noyes, F. R., & Zernicke, R. F. (1978). Biomechanics of Ligaments and Tendons. *Exercise and Sports Sciences Reviews, 6*, 125-181
34. Buttifant, D., & Hrysomallis, C. (2015). Effect of various practical warm-up protocols on acute lower-body power. *The Journal of Strength & Conditioning Research, 29*(3), 656-660.
35. Button, D. C., & Behm, D. G. (2008). The effect of stimulus anticipation on the interpolated twitch technique. *Journal of Sports Science and Medicine, 7*(4), 520-524.
36. Cè, E., Rampichini, S., Maggioni, M. A., Veicsteinas, A., & Merati, G. (2008). Effects of passive stretching on post-activation potentiation and fibre conduction velocity of biceps brachii muscle. *Sport Sciences for Health, 4*(3), 43-50.

37. Cescon, C., Farina, D., Gobbo, M., Merletti, R., & Orizio, C. (2004). Effect of accelerometer location on mechanomyogram variables during voluntary, constant-force contractions in three human muscles. *Medical and Biological Engineering and Computing, 42*(1), 121-127.
38. Cescon, C., Madeleine, P., Graven-Nielsen, T., Merletti, R., & Farina, D. (2007). Two-dimensional spatial distribution of surface mechanomyographical response to single motor unit activity. *Journal of Neuroscience Methods, 159*(1), 19-25.
39. Chaouachi, A., Poulos, N., Abed, F., Turki, O., Brughelli, M., Chamari, K., . . . Behm, D. G. (2011). Volume, intensity, and timing of muscle power potentiation are variable. *Applied Physiology, Nutrition, and Metabolism, 36*(5), 736-747.
40. Cheng, A. J., & Rice, C. L. (2005). Fatigue and recovery of power and isometric torque following isotonic knee extensions. *Journal of Applied Physiology, 99*(4), 1446-1452.
41. Chiu, L., Fry, A., Schilling, B., Johnson, E., & Weiss, L. (2004). Neuromuscular fatigue and potentiation following two successive high intensity resistance exercise sessions. *European Journal of Applied Physiology, 92*(4-5), 385-392.
42. Chiu, L. Z., Fry, A. C., Weiss, L. W., Schilling, B. K., Brown, L. E., & Smith, S. L. (2003). Postactivation potentiation response in athletic and recreationally trained individuals. *The Journal of Strength & Conditioning Research, 17*(4), 671-677.
43. Clark, R. A., Bryant, A. L., & Reaburn, P. (2006). The acute effects of a single set of contrast preloading on a loaded countermovement jump training session. *The Journal of Strength & Conditioning Research, 20*(1), 162-166.
44. Close, R., & Hoh, J. (1969). Post-tetanic potentiation of twitch contractions of cross-innervated rat fast and slow muscles. *Nature, 221*(5176), 179-181.
45. Cohen, J. (1977). *Statistical power analysis for the behavioral sciences (Revised Edition).* Academic Press
46. Comyns, T. M., Harrison, A. J., Hennessy, L., & Jensen, R. L. (2007). Identifying the optimal resistive load for complex training in male rugby players. *Sports Biomechanics, 6*(1), 59-70.
47. Conchola, E. C., Thiele, R. M., Palmer, T. B., Smith, D. B., & Thompson, B. J. (2015). Acute postexercise time course responses of hypertrophic vs. power-endurance squat exercise protocols on maximal and rapid torque of the knee extensors. *The Journal of Strength & Conditioning Research, 29*(5), 1285-1294.
48. Dahmane, R., Djordjevič, S., & Smerdu, V. (2006). Adaptive potential of human biceps femoris muscle demonstrated by histochemical, immunohistochemical and

mechanomyographical methods. *Medical and Biological Engineering and Computing, 44*(11), 999.

49. Dahmane, R., Djordjevič, S., Šimunič, B., & Valenčič, V. (2005). Spatial fiber type distribution in normal human muscle: histochemical and tensiomyographical evaluation. *Journal of Biomechanics, 38*(12), 2451-2459.
50. Dahmane, R., Valenčič, V., Knez, N., & Eržen, I. (2001). Evaluation of the ability to make non-invasive estimation of muscle contractile properties on the basis of the muscle belly response. *Medical and Biological Engineering and Computing, 39*(1), 51-55.
51. Davies, C. T., Mecrow, I., & White, M. (1982). Contractile properties of the human triceps surae with some observations on the effects of temperature and exercise. *European Journal of Applied Physiology and Occupational Physiology, 49*(2), 255-269.
52. de Luca, C. J., Foley, P. J., & Erim, Z. (1996). Motor unit control properties in constant-force isometric contractions. *Journal of Neurophysiology, 76*(3), 1503-1516.
53. De Villarreal, E. S. S., González-Badillo, J. J., & Izquierdo, M. (2007). Optimal warm-up stimuli of muscle activation to enhance short and long-term acute jumping performance. *European Journal of Applied Physiology, 100*(4), 393-401.
54. Ding, J., Wexler, A. S., & Binder-Macleod, S. A. (2003). Mathematical models for fatigue minimization during functional electrical stimulation. *Journal of Electromyography and Kinesiology, 13*(6), 575-588.
55. Ditroilo, M., Hunter, A. M., Haslam, S., & De Vito, G. (2011). The effectiveness of two novel techniques in establishing the mechanical and contractile responses of biceps femoris. *Physiological Measurement, 32*(8), 1315.
56. Ditroilo, M., Smith, I. J., Fairweather, M. M., & Hunter, A. M. (2013). Long-term stability of tensiomyography measured under different muscle conditions. *Journal of Electromyography and Kinesiology, 23*(3), 558-563.
57. Docherty, D., & Hodgson, M. J. (2007). The application of postactivation potentiation to elite sport. *International Journal of Sports Physiology and Performance, 2*(4), 439-444.
58. Ebben, W. P., Jensen, R. L., & Blackard, D. O. (2000). Electromyographic and kinetic analysis of complex training variables. *The Journal of Strength & Conditioning Research, 14*(4), 451-456.
59. Eberstein, A., & Sandow, A. (1963). *Fatigue Mechanisms in Muscle Fibres.* In: The Effect of Use and Disuse on Neuromuscular Functions, ed. by Gutmann, E., & Hnik, P. Czechoslovak Academy of Sciences, Prague, pp. 515-526.

60. Edwards, R., Hill, D., Jones, D., & Merton, P. (1977). Fatigue of long duration in human skeletal muscle after exercise. *The Journal of Physiology, 272*(3), 769.
61. Enoka, R. M. (2002). Activation order of motor axons in electrically evoked contractions. *Muscle & Nerve, 25*(6), 763-764.
62. Evetovich, T. K., Conley, D. S., & McCawley, P. F. (2015). Postactivation potentiation enhances upper-and lower-body athletic performance in collegiate male and female athletes. *The Journal of Strength & Conditioning Research, 29*(2), 336-342.
63. Faigenbaum, A. D., McFarland, J. E., Schwerdtman, J. A., Ratamess, N. A., Kang, J., & Hoffman, J. R. (2006). Dynamic warm-up protocols, with and without a weighted vest, and fitness performance in high school female athletes. *Journal of Athletic Training, 41*(4), 357.
64. Fang, Z.-P., & Mortimer, J. T. (1991). Selective activation of small motor axons by quasitrapezoidal current pulses. IEEE *Transactions on Biomedical Engineering, 38*(2), 168-174.
65. Feiereisen, P., Duchateau, J., & Hainaut, K. (1997). Motor unit recruitment order during voluntary and electrically induced contractions in the tibialis anterior. *Experimental Brain Research, 114*(1), 117-123.
66. Fletcher, I. M. (2010). The effect of different dynamic stretch velocities on jump performance. *European Journal of Applied Physiology, 109*(3), 491-498.
67. Fukutani, A., Hirata, K., Miyamoto, N., Kanehisa, H., Yanai, T., & Kawakami, Y. (2014). Effect of conditioning contraction intensity on postactivation potentiation is muscle dependent. *Journal of Electromyography and Kinesiology, 24*(2), 240-245.
68. Fukutani, A., Takei, S., Hirata, K., Miyamoto, N., Kanehisa, H., & Kawakami, Y. (2014). Influence of the intensity of squat exercises on the subsequent jump performance. *The Journal of Strength & Conditioning Research, 28*(8), 2236-2243.
69. Gago, P., Arndt, A., Tarassova, O., & Ekblom, M. M. (2014). Post activation potentiation can be induced without impairing tendon stiffness. *European Journal of Applied Physiology, 114*(11), 2299-2308.
70. Gago, P., Marques, M. C., Marinho, D. A., & Ekblom, M. M. (2014). Passive muscle length changes affect twitch potentiation in power athletes. *Medicine & Science in Sports & Exercise, 46*(7), 1334-1342.
71. García-Manso, J. M., Rodríguez-Matoso, D., Rodríguez-Ruiz, D., Sarmiento, S., de Saa, Y., & Calderón, J. (2011). Effect of cold-water immersion on skeletal muscle contractile

properties in soccer players. *American Journal of Physical Medicine & Rehabilitation, 90*(5), 356-363.

72. García-Manso, J. M., Rodríguez-Matoso, D., Sarmiento, S., de Saa, Y., Vaamonde, D., Rodríguez-Ruiz, D., & Da Silva-Grigoletto, M. E. (2012). Effect of high-load and high-volume resistance exercise on the tensiomyographic twitch response of biceps brachii. *Journal of Electromyography and Kinesiology, 22*(4), 612-619.
73. García-Manso, J. M., Rodríguez-Ruiz, D., Rodríguez-Matoso, D., de Saa, Y., Sarmiento, S., & Quiroga, M. (2011). Assessment of muscle fatigue after an ultra-endurance triathlon using tensiomyography (TMG). *Journal of Sports Sciences, 29*(6), 619-625.
74. Garland, S., Enoka, R., Serrano, L., & Robinson, G. (1994). Behavior of motor units in human biceps brachii during a submaximal fatiguing contraction. *Journal of Applied Physiology, 76*(6), 2411-2419.
75. Garland, S., Griffin, L., & Ivanova, T. (1997). Motor unit discharge rate is not associated with muscle relaxation time in sustained submaximal contractions in humans. *Neuroscience Letters, 239*(1), 25-28.
76. Garner, S. H., Hicks, A. L., & McComas, A. J. (1989). Prolongation of twitch potentiating mechanism throughout muscle fatigue and recovery. *Experimental Neurology, 103*(3), 277-281.
77. Gordon, A., Huxley, A. F., & Julian, F. (1966). The variation in isometric tension with sarcomere length in vertebrate muscle fibres. *The Journal of Physiology, 184*(1), 170.
78. Gordon, G., & Holbourn, A. (1948). The sounds from single motor units in a contracting muscle. *The Journal of Physiology, 107*(4), 456.
79. Gossen, E. R., & Sale, D. G. (2000). Effect of postactivation potentiation on dynamic knee extension performance. *European Journal of Applied Physiology, 83*(6), 524-530.
80. Grabljevec, K., Burger, H., Kerševan, K., Valenčič, V., & Marinček, Č. (2005). Strength and endurance of knee extensors in subjects after paralytic poliomyelitis. *Disability and Rehabilitation, 27*(14), 791-799.
81. Grange, R., Vandenboom, R., Xeni, J., & Houston, M. (1998). Potentiation of in vitro concentric work in mouse fast muscle. *Journal of Applied Physiology, 84*(1), 236-243.
82. Grange, R. W., & Houston, M. E. (1991). Simultaneous potentiation and fatigue in quadriceps after a 60-second maximal voluntary isometric contraction. *Journal of Applied Physiology, 70*(2), 726-731.

83. Grange, R. W., Vandenboom, R., & Houston, M. E. (1993). Physiological significance of myosin phosphorylation in skeletal muscle. *Canadian Journal of Applied Physiology, 18*(3), 229-242.
84. Green, H., & Jones, S. (1989). Does post-tetanic potentiation compensate for low frequency fatigue? *Clinical Physiology and Functional Imaging, 9*(5), 499-514.
85. Gregory, C. M., & Bickel, C. S. (2005). Recruitment patterns in human skeletal muscle during electrical stimulation. *Physical Therapy, 85*(4), 358.
86. Griffin, L., Godfrey, S., & Thomas, C. K. (2002). Stimulation pattern that maximizes force in paralyzed and control whole thenar muscles. *Journal of Neurophysiology, 87*(5), 2271-2278.
87. Güllich, A., & Schmidtbleicher, D. (1996). MVC-induced short-term potentiation of explosive force. *New Studies in Athletics, 11*, 67-84.
88. Hall, J. E. (2015). *Guyton and Hall Textbook of Medical Physiology*. Elsevier Health Sciences.
89. Hamada, T., Sale, D., MacDougall, J., & Tarnopolsky, M. (2003). Interaction of fibre type, potentiation and fatigue in human knee extensor muscles. *Acta Physiologica Scandinavica, 178*(2), 165-173.
90. Hamada, T., Sale, D. G., & Macdougall, J. D. (2000). Postactivation potentiation in endurance-trained male athletes. *Medicine and Science in Sports and Exercise, 32*(2), 403-411.
91. Hamada, T., Sale, D. G., MacDougall, J. D., & Tarnopolsky, M. A. (2000). Postactivation potentiation, fiber type, and twitch contraction time in human knee extensor muscles. *Journal of Applied Physiology, 88*(6), 2131-2137.
92. Hanson, E. D., Leigh, S., & Mynark, R. G. (2007). Acute effects of heavy-and light-load squat exercise on the kinetic measures of vertical jumping. *The Journal of Strength & Conditioning Research, 21*(4), 1012-1017.
93. Henneman, E., Somjen, G., & Carpenter, D. O. (1965). Functional significance of cell size in spinal motoneurons. *Journal of Neurophysiology, 28*(3), 560-580.
94. Herzog, W., Leonard, T., Renaud, J., Wallace, J., Chaki, G., & Bornemisza, S. (1992). Force-length properties and functional demands of cat gastrocnemius, soleus and plantaris muscles. *Journal of Biomechanics, 25*(11), 1329-1335.
95. Heyters, M., Carpentier, A., Duchateau, J., & Hainaut, K. (1994). Twitch analysis as an approach to motor unit activation during electrical stimulation. *Canadian Journal of Applied Physiology, 19*(4), 451-461.

96. Hicks, A. L., Cupido, C. M., Martin, J., & Dent, J. (1991). Twitch potentiation during fatiguing exercise in the elderly: the effects of training. *European Journal of Applied Physiology and Occupational Physiology, 63*(3), 278-281.
97. Hill, A. V. (1938). The heat of shortening and the dynamic constants of muscle. Proceedings of the Royal Society of London B: *Biological Sciences, 126*(843), 136-195.
98. Hill, C. A., Thompson, M. W., Ruell, P. A., Thom, J. M., & White, M. J. (2001). Sarcoplasmic reticulum function and muscle contractile character following fatiguing exercise in humans. *The Journal of Physiology, 531*(3), 871-878.
99. Hodgson, M., Docherty, D., & Robbins, D. (2005). Post-activation potentiation. *Sports Medicine, 35*(7), 585-595.
100. Horcholle-Bossavit, G., Jami, L., Petit, J., & Scott, J. (1987). Activation of cat motor units by paired stimuli at short intervals. *The Journal of Physiology, 387*, 385.
101. Hough, P. A., Ross, E. Z., & Howatson, G. (2009). Effects of dynamic and static stretching on vertical jump performance and electromyographic activity. *The Journal of Strength & Conditioning Research, 23*(2), 507-512.
102. Houston, M., Lingley, M., Stuart, D., & Grange, R. (1987). Myosin light chain phosphorylation in intact human muscle. *FEBS Letters, 219*(2), 469-471.
103. Houston, M. E., & Grange, R. (1991). Torque potentiation and myosin light-chain phosphorylation in human muscle following a fatiguing contraction. *Canadian Journal of Physiology and Pharmacology, 69*(2), 269-273.
104. Hoyle, G. (1983). Forms of modulatable tension in skeletal muscles. *Comparative Biochemistry and Physiology Part A: Physiology, 76*(2), 203-210.
105. Huijing, P., & Baan, G. (2001). Myofascial force transmission causes interaction between adjacent muscles and connective tissue: effects of blunt dissection and compartmental fasciotomy on length force characteristics of rat extensor digitorum longus muscle. *Archives of Physiology and Biochemistry, 109*(2), 97-109.
106. Jensen, R. L., & Ebben, W. P. (2003). Kinetic analysis of complex training rest interval effect on vertical jump performance. *The Journal of Strength & Conditioning Research, 17*(2), 345-349.
107. Jo, E., Judelson, D. A., Brown, L. E., Coburn, J. W., & Dabbs, N. C. (2010). Influence of recovery duration after a potentiating stimulus on muscular power in recreationally trained individuals. *The Journal of Strength & Conditioning Research, 24*(2), 343-347.

108. Johnson, M. A., Polgar, J., Weightman, D., & Appleton, D. (1973). Data on the distribution of fibre types in thirty-six human muscles: an autopsy study. *Journal of the Neurological Sciences, 18*(1), 111-129.

109. Jones, P., & Lees, A. (2003). A biomechanical analysis of the acute effects of complex training using lower limb exercises. *The Journal of Strength & Conditioning Research, 17*(4), 694-700.

110. Jordan, M., Norris, S., Smith, D., & Herzog, W. (2010). Acute effects of whole-body vibration on peak isometric torque, muscle twitch torque and voluntary muscle activation of the knee extensors. *Scandinavian Journal of Medicine & Science in Sports, 20*(3), 535-540.

111. Jubeau, M., Gondin, J., Martin, A., Sartorio, A., & Maffiuletti, N. A. (2007). Random motor unit activation by electrostimulation. *International Journal of Sports Medicine, 28*(11), 901-904.

112. Jubeau, M., Gondin, J., Martin, A., Van Hoecke, J., & Maffiuletti, N. (2010). Differences in twitch potentiation between voluntary and stimulated quadriceps contractions of equal intensity. *Scandinavian Journal of Medicine & Science in Sports, 20*(1), e56-e62.

113. Kamavuako, E. N., & Farina, D. (2010). Time-dependent effects of pre-conditioning activation on muscle fiber conduction velocity and twitch torque. *Muscle & Nerve, 42*(4), 547-555.

114. Kawakami, Y., & Lieber, R. L. (2000). Interaction between series compliance and sarcomere kinetics determines internal sarcomere shortening during fixed-end contraction. *Journal of Biomechanics, 33*(10), 1249-1255.

115. Kay, A. D., & Blazevich, A. J. (2009). Isometric contractions reduce plantar flexor moment, Achilles tendon stiffness, and neuromuscular activity but remove the subsequent effects of stretch. *Journal of Applied Physiology, 107*(4), 1181-1189.

116. Kay, A. D., & Blazevich, A. J. (2009). Moderate-duration static stretch reduces active and passive plantar flexor moment but not Achilles tendon stiffness or active muscle length. *Journal of Applied Physiology, 106*(4), 1249-1256.

117. Kay, A. D., & Blazevich, A. J. (2010). Concentric muscle contractions before static stretching minimize, but do not remove, stretch-induced force deficits. Journal of Applied Physiology, 108(3), 637-645.

118. Kendrick, I. P., Harris, R. C., Kim, H. J., Kim, C. K., Dang, V. H., Lam, T. Q., . . . Wise, J. A. (2008). The effects of 10 weeks of resistance training combined with β-alanine

supplementation on whole body strength, force production, muscular endurance and body composition. *Amino Acids, 34*(4), 547-554.

119. Kernell, D., Ducati, A., & Sjo, H. (1975). Properties of motor units in the first deep lumbrical muscle of the cat's foot. *Brain Research, 98*(1), 37-55.

120. Khamoui, A. V., Brown, L. E., Coburn, J. W., Judelson, D. A., Uribe, B. P., Nguyen, D., . . . Noffal, G. J. (2009). Effect of potentiating exercise volume on vertical jump parameters in recreationally trained men. *The Journal of Strength & Conditioning Research, 23*(5), 1465-1469.

121. Kilduff, L. P., Bevan, H. R., Kingsley, M. I., Owen, N. J., Bennett, M. A., Bunce, P. J., . . . Cunningham, D. J. (2007). Postactivation potentiation in professional rugby players: optimal recovery. *The Journal of Strength & Conditioning Research, 21*(4), 1134-1138.

122. Klass, M., Guissard, N., & Duchateau, J. (2004). Limiting mechanisms of force production after repetitive dynamic contractions in human triceps surae. *Journal of Applied Physiology, 96*(4), 1516-1521.

123. Klein, C., Rice, C., & Marsh, G. (2001). Normalized force, activation, and coactivation in the arm muscles of young and old men. *Journal of Applied Physiology, 91*(3), 1341-1349.

124. Knaflitz, M., Merletti, R., & De Luca, C. J. (1990). Inference of motor unit recruitment order in voluntary and electrically elicited contractions. *Journal of Applied Physiology, 68*(4), 1657-1667.

125. Knez, N., Valencic, V., Godina, N., & Djordjevic, S. (1999). Non-invasive measurement of muscle tension and its relevance in sport. *Sport kinetic.*

126. Koren, K., Šimunič, B., Rejc, E., Lazzer, S., & Pišot, R. (2015). Differences between skeletal muscle contractile parameters estimated from transversal tensiomyographic and longitudinal torque twitch response. *Kinesiology, 47*(1), 19-26.

127. Križaj, D., Šimunič, B., & Žagar, T. (2008). Short-term repeatability of parameters extracted from radial displacement of muscle belly. *Journal of Electromyography and Kinesiology, 18*(4), 645-651.

128. Kugelberg, E., & Thornell, L. E. (1983). Contraction time, histochemical type, and terminal cisternae volume of rat motor units. *Muscle & Nerve, 6*(2), 149-153.

129. Lanza, I. R., Towse, T. F., Caldwell, G. E., Wigmore, D., & Kent-Braun, J. A. (2003). Effects of age on human muscle torque, velocity, and power in two muscle groups. *Journal of Applied Physiology, 95*(6), 2361-2369.

130. Lee, J., Westerblad, H., & Allen, D. (1991). Changes in tetanic and resting [Ca^{2+}] i during fatigue and recovery of single muscle fibres from Xenopus laevis. *The Journal of Physiology, 433*, 307.

131. Lefebvre, R., Leroux, A., Poumarat, G., Galtier, B., Guillot, M., Vanneuville, G., & Boucher, J. P. (2006). Vastus medialis: anatomical and functional considerations and implications based upon human and cadaveric studies. *Journal of Manipulative and Physiological Therapeutics, 29*(2), 139-144.

132. Levine, T. R., & Hullett, C. R. (2002). Eta squared, partial eta squared, and misreporting of effect size in communication research. *Human Communication Research, 28*(4), 612-625.

133. Levine, R., Kensler, R. W., Yang, Z., Stull, J. T., & Sweeney, H. L. (1996). Myosin light chain phosphorylation affects the structure of rabbit skeletal muscle thick filaments. *Biophysical Journal, 71*(2), 898-907.

134. Lieb, F., & Perry, J. (1971). Quadriceps function. An electromyographic study under isometric conditions. *The Journal of Bone and Joint Surgery. American Volume, 53*(4), 749.

135. Lieb, F. J., & Perry, J. (1968). Quadriceps function: an anatomical and mechanical study using amputated limbs. *The Journal of Bone and Joint Surgery. American Volume, 50*(8), 1535-1548.

136. Lim, J. J., & Kong, P. W. (2013). Effects of isometric and dynamic postactivation potentiation protocols on maximal sprint performance. *The Journal of Strength & Conditioning Research, 27*(10), 2730-2736.

137. Lin, F., Wang, G., Koh, J. L., Hendrix, R. W., & Zhang, L.-q. (2004). In vivo and Noninvasive Three-dimensional Patellar Tracking Induced by Individual Heads of Quadriceps. *Medicine & Science in Sports & Exercise, 36*(1), 93-101.

138. Loturco, I., Gil, S., de Souza Laurino, C. F., Roschel, H., Kobal, R., Abad, C. C. C., & Nakamura, F. Y. (2015). Differences in muscle mechanical properties between elite power and endurance athletes: a comparative study. *The Journal of Strength & Conditioning Research, 29*(6), 1723-1728.

139. MacIntosh, B. R., & Gardiner, P. F. (1987). Posttetanic potentiation and skeletal muscle fatigue: interactions with caffeine. *Canadian Journal of Physiology and Pharmacology, 65*(2), 260-268.

140. MacIntosh, B. R., Grange, R. W., Cory, C. R., & Houston, M. E. (1994). Contractile properties of rat gastrocnemius muscle during staircase, fatigue and recovery. *Experimental Physiology, 79*(1), 59-70.
141. MacIntosh, B. R., & Rassier, D. E. (2002). What is fatigue? *Canadian Journal of Applied Physiology, 27*(1), 42-55.
142. Madeleine, P., Ge, H.-y., Jaskólska, A., Farina, D., Jaskólski, A., & Arendt-Nielsen, L. (2006). Spectral moments of mechanomyographic signals recorded with accelerometer and microphone during sustained fatiguing contractions. *Medical and Biological Engineering and Computing, 44*(4), 290.
143. Mademli, L., Arampatzis, A., & Walsh, M. (2006). Effect of muscle fatigue on the compliance of the gastrocnemius medialis tendon and aponeurosis. *Journal of Biomechanics, 39*(3), 426-434.
144. Maffiuletti, N. A., & Lepers, R. (2003). Quadriceps femoris torque and EMG activity in seated versus supine position. *Medicine and Science in Sports and Exercise, 35*(9), 1511-1516.
145. Maloney, S. J., Turner, A. N., & Fletcher, I. M. (2014). Ballistic exercise as a pre-activation stimulus: a review of the literature and practical applications. *Sports Medicine, 44*(10), 1347-1359.
146. Martyn, D. A., & Gordon, A. M. (1988). Length and myofilament spacing-dependent changes in calcium sensitivity of skeletal fibres: effects of pH and ionic strength. *The Journal of Muscle Research and Cell Motility, 9*(5), 428-445.
147. Masamoto, N., Larson, R., Gates, T., & Faigenbaum, A. (2003). Acute effects of plyometric exercise on maximum squat performance in male athletes. *The Journal of Strength & Conditioning Research, 17*(1), 68-71.
148. Maton, B., Petitjean, M., & Cnockaert, J. (1990). Phonomyogram and electromyogram relationships with isometric force reinvestigated in man. *European Journal of Applied Physiology and Occupational Physiology, 60*(3), 194-201.
149. McMahon, J., & Pearson, S. (2012). *Changes in medial gastrocnemius fascicle-tendon behaviour during single-leg hopping with increased ankle joint stiffness.* Paper presented at the Proceedings of The Physiological Society.
150. McMillan, A., Sasaki, K., & Hannam, A. (1990). The estimation of motor unit twitch tensions in the human masseter muscle by spike-triggered averaging. *Muscle & Nerve, 13*(8), 697-703.

151. Metzger, J. M., Greaser, M. L., & Moss, R. L. (1989). Variations in cross-bridge attachment rate and tension with phosphorylation of myosin in mammalian skinned skeletal muscle fibers. Implications for twitch potentiation in intact muscle. *The Journal of General Physiology, 93*(5), 855-883.
152. Mihelin, M., Trontelj, J. V., & Stålberg, E. (1991). Muscle fiber recovery functions studied with double pulse stimulation. *Muscle & Nerve, 14*(8), 739-747.
153. Misiaszek, J. E. (2003). The H-reflex as a tool in neurophysiology: Its limitations and uses in understanding nervous system function. *Muscle & Nerve, 28*(2), 144-160.
154. Mitchell, C. J., & Sale, D. G. (2011). Enhancement of jump performance after a 5-RM squat is associated with postactivation potentiation. *European Journal of Applied Physiology, 111*(8), 1957-1963.
155. Miyamoto, N., Fukunaga, T., & Kawakami, Y. (2009). Evidence for intermuscle difference in postactivation potentiation in the human triceps surae: a mechanomyographic study. *Muscle & Nerve, 39*(5), 703-706.
156. Miyamoto, N., Kanehisa, H., Fukunaga, T., & Kawakami, Y. (2011). Effect of postactivation potentiation on the maximal voluntary isokinetic concentric torque in humans. *The Journal of Strength & Conditioning Research, 25*(1), 186-192.
157. Miyamoto, N., Mitsukawa, N., Sugisaki, N., Fukunaga, T., & Kawakami, Y. (2010). Joint angle dependence of intermuscle difference in postactivation potentiation. *Muscle & Nerve, 41*(4), 519-523.
158. Miyamoto, N., Wakahara, T., Ema, R., & Kawakami, Y. (2013). Further potentiation of dynamic muscle strength after resistance training. *Medicine and Science in Sports and Exercise, 45*(7), 1323-1330.
159. Moir, G. L., Mergy, D., Witmer, C., & Davis, S. E. (2011). The acute effects of manipulating volume and load of back squats on countermovement vertical jump performance. *The Journal of Strength & Conditioning Research, 25*(6), 1486-1491.
160. Mola, J. N., Bruce-Low, S. S., & Burnet, S. J. (2014). Optimal recovery time for postactivation potentiation in professional soccer players. *The Journal of Strength & Conditioning Research, 28*(6), 1529-1537.
161. Monazzami, A. H., Varmazyar, N., & Hassani, M. (2015). Comparing effects of intensity and type of static and dynamic voluntary contractions on displacement speed in young volleyball male players. *International Journal of Sport Studies, 5*(2), 235-239

162. Moore, R. L., & Stull, J. T. (1984). Myosin light chain phosphorylation in fast and slow skeletal muscles in situ. *American Journal of Physiology-Cell Physiology, 247*(5), C462-C471.

163. Muramatsu, T., Muraoka, T., Takeshita, D., Kawakami, Y., Hirano, Y., & Fukunaga, T. (2001). Mechanical properties of tendon and aponeurosis of human gastrocnemius muscle in vivo. *Journal of Applied Physiology, 90*(5), 1671-1678.

164. Naclerio, F., Chapman, M., Larumbe-Zabala, E., Massey, B., Neil, A., & Triplett, T. N. (2015). Effects of three different conditioning activity volumes on the optimal recovery time for potentiation in college athletes. *The Journal of Strength & Conditioning Research, 29*(9), 2579-2585.

165. Naclerio, F., Faigenbaum, A. D., Larumbe-Zabala, E., Ratamess, N. A., Kang, J., Friedman, P., & Ross, R. E. (2014). Effectiveness of different postactivation potentiation protocols with and without whole body vibration on jumping performance in college athletes. *The Journal of Strength & Conditioning Research, 28*(1), 232-239.

166. O'Leary, D. D., Hope, K., & Sale, D. G. (1997). Posttetanic potentiation of human dorsiflexors. *Journal of Applied Physiology, 83*(6), 2131-2138.

167. Obst, S. J., Barrett, R. S., & Newsham-West, R. (2013). Immediate effect of exercise on achilles tendon properties: systematic review. *Medicine and Science in Sports and Exercise, 45*(8), 1534-1544.

168. Oda, T., Kanehisa, H., Chino, K., Kurihara, T., Nagayoshi, T., Fukunaga, T., & Kawakami, Y. (2007). In vivo behavior of muscle fascicles and tendinous tissues of human gastrocnemius and soleus muscles during twitch contraction. *Journal of Electromyography and Kinesiology, 17*(5), 587-595.

169. Okuno, N. M., Tricoli, V., Silva, S. B., Bertuzzi, R., Moreira, A., & Kiss, M. A. (2013). Postactivation potentiation on repeated-sprint ability in elite handball players. *The Journal of Strength & Conditioning Research, 27*(3), 662-668.

170. O'Leary, D. D., Hope, K., & Sale, D. G. (1998). Influence of gender on post-tetanic potentiation in human dorsiflexors. *Canadian Journal of Physiology and Pharmacology, 76*(7-8), 772-779.

171. Onambélé, G. N., Burgess, K., & Pearson, S. J. (2007). Gender-specific in vivo measurement of the structural and mechanical properties of the human patellar tendon. *Journal of Orthopaedic Research, 25*(12), 1635-1642.

172. Orizio, C., Baratta, R. V., Zhou, B. H., Solomonow, M., & Veicsteinas, A. (1999). Force and surface mechanomyogram relationship in cat gastrocnemius. *Journal of Electromyography and Kinesiology, 9*(2), 131-140.
173. Orizio, C., Baratta, R. V., Zhou, B. H., Solomonow, M., & Veicsteinas, A. (2000). Force and surface mechanomyogram frequency responses in cat gastrocnemius. *Journal of Biomechanics, 33*(4), 427-433.
174. Orizio, C., Perini, R., & Veicsteinas, A. (1989). Muscular sound and force relationship during isometric contraction in man. *European Journal of Applied Physiology and Occupational Physiology, 58*(5), 528-533.
175. Pääsuke, M., Ereline, J., & Gapeyeva, H. (1998). Twitch potentiation capacity of plantarflexor muscles in endurance and power athletes. *Biology of Sport, 15*, 171-178.
176. Pääsuke, M., Ereline, J., & Gapeyeva, H. (2000). Twitch contraction properties of plantar flexor muscles in pre-and post-pubertal boys and men. *European Journal of Applied Physiology, 82*(5), 459-464.
177. Pääsuke, M., Saapar, L., Ereline, J., Gapeyeva, H., Requena, B., & Ööpik, V. (2007). Postactivation potentiation of knee extensor muscles in power-and endurance-trained, and untrained women. *European Journal of Applied Physiology, 101*(5), 577-585.
178. Palmer, B. M., & Moore, R. L. (1989). Myosin light chain phosphorylation and tension potentiation in mouse skeletal muscle. *American Journal of Physiology-Cell Physiology, 257*(5), C1012-C1019.
179. Parry, S., Hancock, S., Shiells, M., Passfield, L., Davies, B., & Baker, J. S. (2008). Physiological effects of two different postactivation potentiation training loads on power profiles generated during high intensity cycle ergometer exercise. *Research in Sports Medicine, 16*(1), 56-67.
180. Pearson, S. J., & Onambele, G. N. (2006). Influence of time of day on tendon compliance and estimations of voluntary activation levels. *Muscle & Nerve, 33*(6), 792-800.
181. Peeler, J., Cooper, J., Porter, M., Thliveris, J., & Anderson, J. (2005). Structural parameters of the vastus medialis muscle. *Clinical Anatomy, 18*(4), 281-289.
182. Perotto, A. O. (2011). *Anatomical guide for the electromyographer: the limbs and trunk.* Charles C Thomas Publisher.
183. Persechini, A., Stull, J., & Cooke, R. (1985). The effect of myosin phosphorylation on the contractile properties of skinned rabbit skeletal muscle fibers. Journal of Biological Chemistry, 260(13), 7951-7954.

184. Person, R., & Kudina, L. (1972). Discharge frequency and discharge pattern of human motor units during voluntary contraction of muscle. *Electroencephalography and Clinical Neurophysiology, 32*(5), 471-483.

185. Petrella, R., Cunningham, D., Vandervoort, A., & Paterson, D. (1989). Comparison of twitch potentiation in the gastrocnemius of young and elderly men. *European Journal of Applied Physiology and Occupational Physiology, 58*(4), 395-399.

186. Petrofsky, J. (1979). Sequential motor unit stimulation through peripheral motor nerves in the cat. *Medical and Biological Engineering and Computing, 17*(1), 87-93.

187. Pišot, R. (2003). *Movement/sports activity and changes of the muscle erector spinae in the third-class-primary-school pupils* (Vol. 39). Prag.

188. Pišot, R., Narici, M. V., Šimunič, B., De Boer, M., Seynnes, O., Jurdana, M., . . . Mekjavić, I. B. (2008). Whole muscle contractile parameters and thickness loss during 35-day bed rest. *European Journal of Applied Physiology, 104*(2), 409-414.

189. Place, N., Casartelli, N., Glatthorn, J. F., & Maffiuletti, N. A. (2010). Comparison of quadriceps inactivation between nerve and muscle stimulation. *Muscle & Nerve, 42*(6), 894-900.

190. Prasartwuth, O., Allen, T., Butler, J., Gandevia, S., & Taylor, J. (2006). Length-dependent changes in voluntary activation, maximum voluntary torque and twitch responses after eccentric damage in humans. *The Journal of Physiology, 571*(1), 243-252.

191. Proske, U., & Morgan, D. L. (1999). Do cross-bridges contribute to the tension during stretch of passive muscle? *The Journal of Muscle Research and Cell Motility, 20*(5-6), 433-442.

192. Rassier, D., & Macintosh, B. (2000). Coexistence of potentiation and fatigue in skeletal muscle. *Brazilian Journal of Medical and Biological Research, 33*(5), 499-508.

193. Rassier, D. E. (2000). The effects of length on fatigue and twitch potentiation in human skeletal muscle. *Clinical Physiology, 20*(6), 474-482.

194. Requena, B., Ereline, J., Gapeyeva, H., & Pääsuke, M. (2005). Posttetanic potentiation in knee extensors after high-frequency submaximal percutaneous electrical stimulation. *Journal of Sport Rehabilitation, 14*(3), 249-257.

195. Requena, B., Gapeyeva, H., García, I., Ereline, J., & Pääsuke, M. (2008). Twitch potentiation after voluntary versus electrically induced isometric contractions in human knee extensor muscles. *European Journal of Applied Physiology, 104*(3), 463.

196. Rey, E., Lago-Peñas, C., Lago-Ballesteros, J., & Casáis, L. (2012). The effect of recovery strategies on contractile properties using tensiomyography and perceived muscle soreness

in professional soccer players. *The Journal of Strength & Conditioning Research, 26*(11), 3081-3088.

197. Ritz-Gold, C. J., Cooke, R., Blumenthal, D. K., & Stull, J. T. (1980). Light chain phosphorylation alters the conformation of skeletal muscle myosin. *Biochemical and Biophysical Research Communications, 93*(1), 209-214.
198. Rixon, K. P., Lamont, H. S., & Bemben, M. G. (2007). Influence of type of muscle contraction, gender, and lifting experience on postactivation potentiation performance. *The Journal of Strength & Conditioning Research, 21*(2), 500-505.
199. Robbins, D. W. (2005). Postactivation potentiation and its practical applicability. *The Journal of Strength & Conditioning Research, 19*(2), 453-458.
200. Robbins, D. W., & Docherty, D. (2005). Effect of loading on enhancement of power performance over three consecutive trials. *The Journal of Strength & Conditioning Research, 19*(4), 898-902.
201. Ruben, R. M., Molinari, M. A., Bibbee, C. A., Childress, M. A., Harman, M. S., Reed, K. P., & Haff, G. G. (2010). The acute effects of an ascending squat protocol on performance during horizontal plyometric jumps. *The Journal of Strength & Conditioning Research, 24*(2), 358-369.
202. Rusu, L. D., Cernaianu, S.M., Vasilescu, M., Baltac, G., Ciocănescu, D.P., & Fortan C. (2009). *Assessment of knee stability using neuromuscular measurement in soccer players*. XVIII International Congress on Sports Rehabilitation And Traumatology.
203. Rusu, L. D., Cosma, G. G., Cernaianu, S. M., Marin, M. N., Rusu, P. A., Ciocănescu, D. P., & Neferu, F. N. (2013). Tensiomyography method used for neuromuscular assessment of muscle training. *Journal of Neuroengineering and Rehabilitation, 10*(1), 67.
204. Sale, D. G. (2002). Postactivation potentiation: role in human performance. *Exercise and Sport Sciences Reviews, 30*(3), 138-143.
205. Savelberg, H. (2000). *Rise and relaxation times of twitches and tetani in submaximally recruited, mixed muscle: a computer model. Skeletal Muscle Mechanisms to Function.* Wiley & Sons, Chichester, 225-240.
206. Scott, S. L., & Docherty, D. (2004). Acute effects of heavy preloading on vertical and horizontal jump performance. *The Journal of Strength & Conditioning Research, 18*(2), 201-205.
207. Seitz, L. B., de Villarreal, E. S., & Haff, G. G. (2014). The temporal profile of postactivation potentiation is related to strength level. *The Journal of Strength & Conditioning Research, 28*(3), 706-715.

208. Shima, N., Rice, C. L., Ota, Y., & Yabe, K. (2006). The effect of postactivation potentiation on the mechanomyogram. *European Journal of Applied Physiology, 96*(1), 17-23.
209. Skurvydas, A., & Mamkus, G. (2000). Muscle fatigue and post-tetanic potentiation in boys and adult men when performing jumping exercises of maximal intensity. *Acta Kinesiologiae Universitatis Tartuensis, 5*, 162.
210. Smilios, I., Pilianidis, T., Sotiropoulos, K., Antonakis, M., & Tokmakidis, S. P. (2005). Short-term effects of selected exercise and load in contrast training on vertical jump performance. *The Journal of Strength & Conditioning Research, 19*(1), 135-139.
211. Smith, J. C., & Fry, A. C. (2007). Effects of a ten-second maximum voluntary contraction on regulatory myosin light-chain phosphorylation and dynamic performance measures. *The Journal of Strength & Conditioning Research, 21*(1), 73-76.
212. Smith, J. C., Fry, A. C., Weiss, L. W., Li, Y., & Kinzey, S. J. (2001). The effects of high-intensity exercise on a 10-second sprint cycle test. *The Journal of Strength & Conditioning Research, 15*(3), 344-348.
213. Stalberg, E. (1966). Propagation velocity in human muscle fibers in situ. *Acta Physiologica Scandinavica. Supplementum 287*, 1-112.
214. Stein, R., & Parmiggiani, F. (1981). Nonlinear summation of contractions in cat muscles. I. Early depression. *The Journal of General Physiology, 78*(3), 277-293.
215. Stephenson, D., & Williams, D. (1982). Effects of sarcomere length on the force—pCa relation in fast-and slow-twitch skinned muscle fibres from the rat. *The Journal of Physiology, 333*, 637.
216. Stevens, J., Dickinson, V., & Jones, N. (1980). Mechanical properties of human skeletal muscle from in vitro studies of biopsies. *Medical and Biological Engineering and Computing, 18*(1), 1-9.
217. Stuart, D., Lingley, M., Grange, R., & Houston, M. (1988). Myosin light chain phosphorylation and contractile performance of human skeletal muscle. *Canadian Journal of Physiology and Pharmacology, 66*(1), 49-54.
218. Suzuki, S., Kaiya, K., Watanabe, S., & Hutton, R. S. (1988). Contraction-induced potentiation of human motor unit discharge and surface EMG activity. *Medicine and Science in Sports and Exercise, 20*(4), 391-395.
219. Sweeney, H., Bowman, B. F., & Stull, J. T. (1993). Myosin light chain phosphorylation in vertebrate striated muscle: regulation and function. *American Journal of Physiology-Cell Physiology, 264*(5), C1085-C1095.

220. Sweeney, H., & Stull, J. T. (1986). Phosphorylation of myosin in permeabilized mammalian cardiac and skeletal muscle cells. *American Journal of Physiology-Cell Physiology, 250*(4), C657-C660.

221. Szczesna, D., Zhao, J., Jones, M., Zhi, G., Stull, J., & Potter, J. D. (2002). Phosphorylation of the regulatory light chains of myosin affects Ca^{2+} sensitivity of skeletal muscle contraction. *Journal of Applied Physiology, 92*(4), 1661-1670.

222. Šimunič, B. (2001). *Analiza variabilnosti odzivov skeletnih mišic na električno stimulacijo*. Magistrski rad, Elektrotehnički fakultet, Sveučilište u Ljubljani, Ljubljana.

223. Šimunič, B. (2003). *Modelling longitudinal and transversal deformations of skeletal muscle twitch contractions*. Disertacija, Sveučilište u Ljubljani, Ljubljana.

224. Šimunič, B. (2012). Between-day reliability of a method for non-invasive estimation of muscle composition. *Journal of Electromyography and Kinesiology, 22*(4), 527-530.

225. Šimunič, B., Degens, H., Rittweger, J., Narici, M., Mekjavic, I., & Pisot, R. (2011). Noninvasive estimation of myosin heavy chain composition in human skeletal muscle. *Medicine and Science in Sports and Exercise, 43*(9), 1619-1625.

226. Šimunič, B., Križaj, D., Narici, M., & Pišot, R. (2010). Twitch parameters in transversal and longitudinal biceps brachii response. *Annales Kinesiologiae, 1*(1).

227. Talpey, S. W., Young, W. B., & Saunders, N. (2014). The Acute Effects of Conventional, Complex, and Contrast Protocols on Lower-Body Power. *The Journal of Strength & Conditioning Research, 28*(2), 361-366.

228. Tardioli, A., Malliaras, P., & Maffulli, N. (2012). Immediate and short-term effects of exercise on tendon structure: biochemical, biomechanical and imaging responses. *British Medical Bulletin, 103*(1), 169-202.

229. Terzis, G., Spengos, K., Karampatsos, G., Manta, P., & Georgiadis, G. (2009). Acute effect of drop jumping on throwing performance. *The Journal of Strength & Conditioning Research, 23*(9), 2592-2597.

230. Thiranagama, R. (1990). Nerve supply of the human vastus medialis muscle. *Journal of Anatomy, 170*, 193-198.

231. Thomas, C. K., Johansson, R. S., & Bigland-Ritchie, B. (1999). Pattern of pulses that maximize force output from single human thenar motor units. *Journal of Neurophysiology, 82*(6), 3188-3195.

232. Till, K. A., & Cooke, C. (2009). The effects of postactivation potentiation on sprint and jump performance of male academy soccer players. *The Journal of Strength & Conditioning Research, 23*(7), 1960-1967.

233. Tillin, N. A., & Bishop, D. (2009). Factors modulating post-activation potentiation and its effect on performance of subsequent explosive activities. *Sports Medicine, 39*(2), 147-166.
234. Tous-Fajardo, J., Moras, G., Rodríguez-Jiménez, S., Usach, R., Doutres, D. M., & Maffiuletti, N. A. (2010). Inter-rater reliability of muscle contractile property measurements using non-invasive tensiomyography. *Journal of Electromyography and Kinesiology, 20*(4), 761-766.
235. Tsolakis, C., Bogdanis, G. C., Nikolaou, A., & Zacharogiannis, E. (2011). Influence of type of muscle contraction and gender on postactivation potentiation of upper and lower limb explosive performance in elite fencers. *Journal of Sports Science and Medicine, 10*(3), 577-583.
236. Valenčič V. (1990). Direct measurement of the skeletal muscle tonus. In Popović D., editor. Advances in external control of human extremities. *Beograd: Nauka,* 102–8.
237. Valenčič, V., & Knez, N. (1997). Measuring of skeletal muscles' dynamic properties. *Artificial Organs, 21*(3), 240-242.
238. Vandervoort, A., & McComas, A. (1983). A comparison of the contractile properties of the human gastrocnemius and soleus muscles. *European Journal of Applied Physiology and Occupational Physiology, 51*(3), 435-440.
239. Vandervoort, A., Quinlan, J., & McComas, A. (1983). Twitch potentiation after voluntary contraction. *Experimental Neurology, 81*(1), 141-152.
240. Veligekas, P., Bogdanis, G. C., Tsoukos, A., Tsolakis, C., & Terzis, G. (2013). *Effect of maximum isometric contractions with different knee angles on postactivation potentiation in power athletes.* Paper presented at the Medicine and science in sports and exercise.
241. Verkhoshansky, Y., & Tatyan, V. (1973). Speed-strength preparation of future champions. *Legkaya Atleika, 2*, 12-13.
242. Weinstabl, R., Scharf, W., & Firbas, W. (1989). The extensor apparatus of the knee joint and its peripheral vasti: anatomic investigation and clinical relevance. *Surgical and Radiologic Anatomy, 11*(1), 17-22.
243. Weir, J. P., Housh, D. J., Housh, T. J., & Weir, L. L. (1997). The effect of unilateral concentric weight training and detraining on joint angle specificity, cross-training, and the bilateral deficit. *Journal of Orthopaedic & Sports Physical Therapy, 25*(4), 264-270.
244. Westerblad, H., & Allen, D. (1991). Changes of myoplasmic calcium concentration during fatigue in single mouse muscle fibers. *The Journal of General Physiology, 98*(3), 615-635.

245. Westerblad, H., & Allen, D. G. (1996). The effects of intracellular injections of phosphate on intracellular calcium and force in single fibres of mouse skeletal muscle. *Pflügers Archiv, 431*(6), 964-970.
246. Westerblad, H., Duty, S., & Allen, D. (1993). Intracellular calcium concentration during low-frequency fatigue in isolated single fibers of mouse skeletal muscle. *Journal of Applied Physiology, 75*(1), 382-388.
247. Wetzel, P., & Gros, G. (1998). Decay of Ca^{2+} and force transients in fast- and slow-twitch skeletal muscles from the rat, mouse and Etruscan shrew. *The Journal of Experimental Biology, 201*(Pt 3), 375-384.
248. Wilson, J. M., Duncan, N. M., Marin, P. J., Brown, L. E., Loenneke, J. P., Wilson, S. M., . . . Ugrinowitsch, C. (2013). Meta-analysis of postactivation potentiation and power: effects of conditioning activity, volume, gender, rest periods, and training status. *The Journal of Strength & Conditioning Research, 27*(3), 854-859.
249. Wilson, J. M., & Flanagan, E. P. (2008). The role of elastic energy in activities with high force and power requirements: a brief review. *The Journal of Strength & Conditioning Research, 22*(5), 1705-1715.
250. Yang, Z., Stull, J. T., Levine, R. J., & Sweeney, H. L. (1998). Changes in interfilament spacing mimic the effects of myosin regulatory light chain phosphorylation in rabbit psoas fibers. *Journal of Structural Biology, 122*(1-2), 139-148.
251. Ye, X., Beck, T. W., & Wages, N. P. (2015). Acute effects of concentric vs. eccentric exercise on force steadiness and electromyographic responses of the forearm flexors. *The Journal of Strength & Conditioning Research, 29*(3), 604-611.
252. Yoshitake, Y., & Moritani, T. (1999). The muscle sound properties of different muscle fiber types during voluntary and electrically induced contractions. *Journal of Electromyography and Kinesiology, 9*(3), 209-217.
253. Young, W. B., Jenner, A., & Griffiths, K. (1998). Acute enhancement of power performance from heavy load squats. *The Journal of Strength & Conditioning Research, 12*(2), 82-84.
254. Z'graggen, W. J., & Bostock, H. (2009). Velocity recovery cycles of human muscle action potentials and their sensitivity to ischemia. *Muscle & Nerve, 39*(5), 616-626.
255. Zhi, G., Ryder, J. W., Huang, J., Ding, P., Chen, Y., Zhao, Y., . . . Stull, J. T. (2005). Myosin light chain kinase and myosin phosphorylation effect frequency-dependent potentiation of skeletal muscle contraction. *Proceedings of the National Academy of Sciences of the United States of America, 102*(48), 17519-17524.

256. Zubac, D., & ŠimuniC, B. (2017). Skeletal muscle contraction time and tone decrease after 8 weeks of plyometric training. *The Journal of Strength & Conditioning Research. 31*(6), 1610-1619.
257. Zucker, R. S., & Regehr, W. G. (2002). Short-term synaptic plasticity. *Annual Review of Physiology, 64*(1), 355-405.
258. Zytnicki, D., Lafleur, J., Horcholle-Bossavit, G., Lamy, F., & Jami, L. (1990). Reduction of Ib autogenetic inhibition in motoneurons during contractions of an ankle extensor muscle in the cat. *Journal of Neurophysiology, 64*(5), 1380-1389.
259. Žagar, T., & Križaj, D. (2005). Validation of an accelerometer for determination of muscle belly radial displacement. *Medical and Biological Engineering and Computing, 43*(1), 78-84.

10. POPIS SLIKA

Slika 1. Hipotetski model veze između PAP-a i zamora nakon aktivacijskog protokola (preuzeto iz: Tillin i Bishop, 2009) 8
Slika 2. Sprega potraživanja i kontrakcije mišića. Vidi se (1) akcijski potencijal koji uzrokuje oslobađanje kalcijevih iona iz sarkoplazmatske mrežice i (2) njihovo vraćanje kalcijskom crpkom (preuzeto iz: Hall, 2015) . 9
Slika 3. Pricip TMG metoda: linearni senzor pomaka (a) se podesi na opušten mišić (b) čiji se trbuh zadeblja tijekom elektrostimulacije te vertikalno potisne senzor pomaka (c) i izmjeri mehanički odgovor na električnu stimulaciju (d). (Preuzeto iz Šimunič i sur., 2010) 11
Slika 4. Vizualna reprezentacija tri dijela mišića vastus medialis (preuzeto iz: Peeler i sur., 2005) 29
Slika 5. Tijek protokola 29
Slika 6. Shematski prikaz bočnog odgovora mišića na električni impuls sa svim pripadajućim parametrima – Dm, Td, Tc, Ts i Tr 31
Slika 7. Prikaz dekompozicije TMG signala za jednog ispitanika 40
Slika 8. Vremenski tijek PAP učinaka na longitudinalni Dm primijećen u studiji Hamade i suradnika (2000) ... 45
Slika 9. Shematski prikaz razloga niže pouzdanosti Tr-a po prijedlogu Šimuniča (2012) 54
Slika 10. Hipotetski odnos Ca^{2+} sila koji prikazuje dulje vrijeme kontrakcije tijekom istovremeno povećane razine potencijacije i zamora (modificirano iz: Rassier i MacIntosh, 2000) 58
Slika 11. Promjene u obrtnom momentu elektrostimulirane kontrakcije tijekom protokola (16 5-sekundnih maksimalnih voljnih izometrijskih kontrakcija sa stankama od 3 sekunde između ponavljanja) primijećene od strane Hamade i suradnika (2003) 59
Slika 12. Grafički prikaz longitudinalnog i transverzalnog Dm-a kod mišića vastus lateralis 65
Slika 13. Grafički prikaz longitudinalnog i transverzalnog Dm-a kod mišića vastus medialis 66
Slika 14. Grafički prikaz longitudinalnog i transverzalnog Tc-a kod mišića vastus lateralis 67
Slika 15. Grafički prikaz longitudinalnog i transverzalnog Tc-a kod mišića vastus medialis 68
Slika 16. Prikaz krivulje TMG (A) i dinamometrijskog mišićnog odgovora (B) na jedan električni impuls kod mišića vastus lateralis (preuzeto iz: Koren i sur., 2015) 72
Slika 17. Shematski prikaz dekompozicije TMG signala i pripadajućih parametara 80
Slika 18. Prikaz dekompozicije signala 81

ŽIVOTOPIS AUTORA

Ensar Abazović rođen je 19. 8. 1988. godine u Zagrebu. Nakon toga seli u Sarajevo gdje je završio osnovnu i srednju školu. 2007. godine je upisao Fakultet sporta i tjelesnog odgoja, Univerziteta u Sarajevu. Tokom studija je radio kao demonstrator na predmetu Sportska medicina. 2012. godine je završio drugi ciklus studija na Fakultetu sporta i tjelesnog odgoja, nakon čega 2013. godine upisuje doktorski studij Kineziologije na Kineziološkom fakultetu Sveučilišta u Splitu.

Od 2011. do 2014. je radio kao volonter u Institutu za Sport pri Fakultetu sporta i tjelesnog odgoja Univerziteta u Sarajevu, nakon čega je 2014. godine izabran u nastavno zvanje predavača za znanstveno područje društvenih znanosti, znanstveno polje Kineziologija, grana Kineziterapija i prilagođena tjelesna aktivnost na Kineziološkom fakultetu Sveučilišta u Splitu. Trenutno obnaša funkciju Predsjednika Udruge „Sport i zdravlje” u Sarajevu.

Autor i/ili koautor je dvaju fakultetskih udžbenika, dvaju znanstvenih izvješća, 13 znanstvenih radova, 15 stručnih radova te 4 sažetka.