

IZOMETRIJSKE MIŠIĆNE KONTRAKCIJE KAO METODA RAZVOJA JAKOSTI I PREVENCIJE OZLJEDA MIŠIĆA POTKOLJENICE

Furdin, Ivan

Master's thesis / Diplomski rad

2024

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

Permanent link / Trajna poveznica: <https://um.nsk.hr/um:nbn:hr:117:097894>

Rights / Prava: [In copyright](#) / [Zaštićeno autorskim pravom.](#)

Download date / Datum preuzimanja: **2024-07-17**



Repository / Repozitorij:

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



SVEUČILIŠTE U ZAGREBU
KINEZIOLOŠKI FAKULTET
magistar kineziologije

Ivan Furdin

**IZOMETRIJSKE MIŠIĆNE KONTRAKCIJE KAO
METODA RAZVOJA JAKOSTI I PREVENCIJE
OZLJEDA MIŠIĆA POTKOLJENICE**

diplomski rad

Mentor:
Marin Dadić

Zagreb, veljača, 2024.

Ovim potpisima se potvrđuje da je ovo završena verzija diplomskog rada koja je obranjena pred Povjerenstvom, s unesenim korekcijama koje je Povjerenstvo zahtijevalo na obrani te da je ova tiskana verzija istovjetna elektroničkoj verziji predanoj u Knjižnici.

Mentor:

dr. sc. Marin Dadić, pred.

Student:

Ivan Furdin

IZOMETRIJSKE MIŠIĆNE KONTRAKCIJE KAO METODA RAZVOJA JAKOSTI I PREVENCIJE OZLJEDA MIŠIĆA POTKOLJENICE

Sažetak

Izometrijske mišićne kontrakcije predstavljaju važnu komponentu u razvoju mišićne jakosti i snage i efikasnu strategiju za prevenciju ozljeda. Ovaj diplomski rad temelji se na detaljnoj analizi anatomije potkoljenice, uključujući pregled kostiju, mišića, i njihovih funkcija te istražuje ulogu izometrijskih vježbi u kondicijskoj pripremi. U radu su proučeni pristupi izometrijskom treningu, njegovoj primjenjivosti u sportskoj praksi te važnosti za prevenciju ozljeda. Poseban naglasak stavljen je na pregled postojećih istraživanja koja potvrđuju pozitivne učinke izometrijskog treninga na povećanje jakosti, snage i elastičnosti tetiva te otpornosti mišićno-tetivnog sustava na ozljede. Osim toga, rad obuhvaća i praktične smjernice za implementaciju izometrijskih vježbi u trenažne procese s ciljem maksimiziranja njihove efektivnosti i sigurnosti za sportaše i osobe uključene u redovite fitness programe. Kroz multidisciplinarni pristup, diplomski rad ističe značaj izometrijskih kontrakcija u modernom treningu jakosti i snage, naglašavajući potrebu za daljnjim istraživanjima i razvojem specijaliziranih programa treninga koji bi koristili ovu metodu za unapređenje fizičkih performansi i prevenciju ozljeda. Nadalje, ovim radom istraživani su i složeni biomehanički procesi koji su uključeni u izometrijske kontrakcije i način na koji doprinose strukturalnom i funkcionalnom integritetu mišićno-koštanog sustava. Konačno, ovim radom pokušalo se i odgovoriti na pitanje kako pravilna primjena izometrijskih vježbi može pomoći u prevenciji nastanka ozljeda potkoljenice, ističući pritom važnost individualiziranog pristupa i prilagodbe treninga specifičnim potrebama i ograničenjima sportaša. Kroz kombinaciju teorijskog uvida i praktičnih primjera ovo istraživanje pruža uvid u razumijevanje prednosti izometrijskog treninga, pružajući temelj za razvoj efektivnijih i sigurnijih programa treninga.

Ključne riječi: elastičnost tetive, izometrijske mišićne kontrakcije, jakost, potkoljenica, snaga

ISOMETRICAL MUSCLE CONTRACTIONS AS A METHOD OF STRENGTH DEVELOPMENT AND PREVENTION OF LOWER MUSCLE INJURIES

Abstract

Isometric muscle contractions represent an important component in the development of muscle strength and power and an effective strategy for injury prevention. This thesis is based on a detailed analysis of the anatomy of the lower leg, including an overview of the bones, muscles, and their functions, and explores the role of isometric exercises in conditioning. The paper examines approaches to isometric training, its applicability in sports practice, and its importance for injury prevention. Special emphasis is placed on the review of existing research that confirms the positive effects of isometric training on increasing the strength, power and elasticity of tendons and the resistance of the muscle-tendon system to injuries. In addition, the work includes practical guidelines for the implementation of isometric exercises in training processes with the aim of maximizing their effectiveness and safety for athletes and people involved in regular fitness programs. Through a multidisciplinary approach, the thesis highlights the importance of isometric contractions in modern strength and power training, emphasizing the need for further research and development of specialized training programs that would use this method to improve physical performance and prevent injuries. Furthermore, this work investigated the complex biomechanical processes involved in isometric contractions and how they contribute to the structural and functional integrity of the musculoskeletal system. Finally, this paper tried to answer the question of how the correct application of isometric exercises can help in the prevention of lower leg injuries, emphasizing the importance of an individualized approach and adaptation of training to the specific needs and limitations of athletes. Through a combination of theoretical insight and practical examples, this research provides insight into understanding the benefits of isometric training, providing a foundation for developing more effective and safer training programs.

Key words: isometric muscle contractions, lower leg, power, strength, tendons elasticity

Sadržaj

1. UVOD.....	1
2. ANATOMSKA ANALIZA POTKOLJENICE	6
2.1. Kostí potkoljenice	6
2.1.1. Goljenična kost.....	7
2.1.2. Lisna kost	8
2.2. Mišići potkoljenice.....	9
2.2.1. Prednja skupina golijenskih mišića	9
2.2.2. Lateralna skupina golijenskih mišića.....	10
2.2.3. Stražnja skupina golijenskih mišića.....	12
3. IZOMETRIJSKA MIŠIĆNA AKTIVACIJA	16
4. IZOMETRIJSKI TRENING	18
4.1. Trening izometrijske akcije kao važan potencijator mišićne aktivacije.....	18
4.2. Izometrijski trening kao stimulus za povećanje snage	19
4.3. Izometrijski trening kao stimulus za mišićni rast	20
4.4. Zaključci o izometrijskom treningu	20
4.5. Primjena izometrijskog treninga.....	20
4.6. Funkcionalna izometrija	21
4.7. Stato-dinamička izometrija.....	21
4.8. Izometrijske metode treninga	22
4.8.1. Izometrija maksimalnog trajanja (ponavljajući napor).....	23
4.8.2. Izometrija maksimalnog intenziteta (maksimalni napor).....	23
4.8.3. Balistička izometrija (metoda dinamičkog napora).....	24
5. IZOMETRIJSKI TRENING ZA MIŠIĆE POTKOLJENICE	24
6. ZAKLJUČAK	33
7. LITERATURA.....	34

1. UVOD

Nezamjenjivu ulogu prilikom trčanja imaju plantarni fleksori gležnja, koje prvenstveno čine mišić *soleus* (SO), medijalni *gastrocnemius* (MG) te lateralni *gastrocnemius* (LG). Studije mišićno-koštanog modeliranja navode kako plantarni pregibači gležnja daju najveći doprinos, od svih mišića donjih ekstremiteta, prilikom akceleracija centra težišta tijela (Lai, Schache, Brown i Pandy, 2016).

Plantarni pregibači sastoje se kratkih, perastih mišićnih vlakana koji su povezani s dugom, elastičnom Ahilovom tetivom, koja zbog svoje elastičnosti značajno utječe na ponašanje mišićnih vlakana (duljine i brzine) i energije (Friederich i Brand, 1990). Kako bi trčali brže, ljudi za postizanje većih brzina koriste kombinaciju produljenja koraka i frekvencije koraka. Kontinuiranim trčanjem duljina koraka povećava se djelovanjem većih sila reakcija podloge, dok kod brzog trčanja i sprinta frekvencija koraka povećava se bržim zamazima nogu kroz zrak. Za brzine do 7 m/s plantarni fleksori gležnja, *m. soleus* i *m. gastrocnemius*, najviše pridonose u stvaranju vertikalnih sila, odnosno u povećanju duljine koraka. Nasuprot tomu, pri brzinama većim od 7 m/s ti se mišići skraćuju te nemaju dovoljno vremena za generiranje sila potrebnih za oslonac. Dakle, strategija koja se koristi za povećanje brzine trčanja iznad 7 m/s je povećanje frekvencije koraka (Dorn, Schache i Pandy, 2012). Istraživanje Hamnera i Delpa (2013) govori kako je trčanje poskakujući hod u kojem se središte tjelesne mase usporava i spušta tijekom prve polovice faze stava. Središte mase se tada ubrzava naprijed i gore u let tijekom druge polovice faze stava. Istraživali su kako mišićne sile moduliraju ubrzanja centra mase pri različitim brzinama trčanja. Kako bi ispitali kako mišići generiraju ubrzanja centra tjelesne mase, stvorili su trodimenzionalne simulacije pokretane mišićima deset subjekata koji trče brzinom od 2,0, 3,0, 4,0 i 5,0 m/s. Analiza simulacija otkrila je da *m. soleus* osigurava najveće ubrzanje središta mase prema gore pri svim brzinama trčanja. Debaere, Delecluse, Aerenhouts, Hagman i Jonkers (2015) istraživali su doprinos momenata zglobova donjih udova i pojedinačnih mišićnih sila s vertikalnim i horizontalnim ubrzanjem centra mase tijela tijekom prva dva koraka sprinterskog trčanja. Startna izvedba sedam dobro uvježbanih sprintera zabilježena je pomoću optoelektroničkog sustava za analizu gibanja i dviju ploča za bilježenje sila. Gležanj je najviše pridonio objema radnjama tijekom prva dva stava, s još većim doprinosom u drugom u usporedbi s prvim stavom. Mišić *gastrocnemius* bio je glavni mišić koji doprinosio propulziji u drugom stavu. Zaključno, mali porast u generiranju sile gležnja utječe na ubrzanje centra mase tijela, dok porast u generiranju sile u kukovima i koljenima manje utječe na ubrzanje.

Tijekom trčanja, mišići i tetive moraju apsorbirati i otpustiti mehanički rad kako bi održali cikličke pokrete tijela i udova, a istovremeno osigurati dovoljno sile da podrže težinu tijela. Izravna mjerenja sile i duljine vlakana u lateralnom *gastrocnemius* mišiću purana koji trče, otkrila su da istežanje i trzaj tetiva i mišićnih opruga osigurava mehanički rad dok aktivna mišićna vlakna proizvode velike sile. Tijekom trčanja, aktivni se mišić malo skraćuje i malo radi, ali osigurava silu potrebnu za ekonomično podupiranje tjelesne težine. Ekonomičnost trčanja poboljšavaju mišići koji djeluju kao aktivni podupirači, a ne kao radni strojevi (Roberts, Marsh, Weyand i Taylor, 1997).

Promjene duljine mišićno-tetivnog kompleksa (MTC) tijekom aktivnosti dijelom su rezultat promjena duljine aktivnih mišićnih vlakana, kontraktilne komponente (CC), a dijelom i rezultat istežanja elastičnih struktura (serija-elastična komponenta (SEC)). U istraživanju je korištena platforma sile i kinematičke mjere za određivanje sile i duljine mišića potkoljenice tijekom hodanja, trčanja i skakanja iz čučnja. U hodanju ili trčanju negativni rad izveden u ekscentričnoj fazi bio je u potpunosti pohranjen kao elastična energija. Ta se elastična energija oslobađala u koncentričnoj fazi, pri brzinama koje su znatno premašivale maksimalnu brzinu skraćivanja predviđenu Hillovim odnosom sile i brzine (Hof, Van Zandwijk i Bobbert, 2002). Plantarni fleksori ljudskog gležnja, *m. soleus* i *m. gastrocnemius*, koriste energiju elastičnog naprezanja tetive kako bi smanjili rad mišićnih vlakana i optimizirali kontraktilne uvjete tijekom trčanja. Međutim, dosadašnje studije razmatrale su samo spore do umjerene brzine trčanja do 5 m/s. Ovaj rad je istražio kako plantarni fleksori ljudskog gležnja iskorištavaju energiju elastičnog naprezanja tetive dok se brzina trčanja povećava prema maksimalnom sprintu. Za istraživanje su korišteni podaci dobivene iz eksperimenata hodanja u kombinaciji s mišićno-koštanim modeliranjem i tehnikama optimizacije za izračunavanje rada mišićno-tetivne jedinice, energije elastičnog naprezanja tetive i rada mišićnih vlakana za plantarne fleksore gležnja dok su sudionici trčali pri pet određenih brzina od jogginga (~2 m/s) do sprinta (≥ 8 m/s). Kako je brzina trčanja rasla od jogginga do sprinta, doprinos energije elastičnog naprezanja tetive pozitivnom radu koji stvara mišićno-tetivna jedinica porastao je s 53% na 74% za *m. soleus* i sa 62% na 75% za *m. gastrocnemius*. Ovo povećanje je olakšano većom aktivacijom mišića i relativno izometričnim ponašanjem mišićnih vlakana mišića *soleusa* i *gastrocnemiusa*. Obje ove karakteristike pojačale su rastežanje i trzaj tetive, što je pridonijelo velikoj promjeni duljine mišićno-tetivne jedinice. Rezultati istraživanja sugeriraju da kako brzina trčanja napreduje od jogginga prema maksimalnom sprintu, plantarni fleksori ljudskog gležnja nastavljaju davati prioritet pohranjivanju i oporavku energije elastičnog naprezanja tetive u odnosu na rad mišićnih vlakana (Lai, Schache, Lin i Pandy, 2014).

Interakcija između mišićnog fascikla i komponenti tetive ljudskog mišića *soleusa* utječe na sposobnost mišića da generira silu i mehanički rad tijekom hodanja i trčanja. U ovoj studiji, ultrazvučna mjerenja *in vivo* mišićnog fascikla *soleusa* kombinirana su s analizom inverzne dinamike kako bi se istražila interakcija između mišićnog fascikla i komponenti tetive u širokom rasponu brzina hodanja i kontinuiranog trčanja: sporim tempom hodanje (0,7 m/s) do trčanja umjerenim tempom (5,0 m/s). Bez obzira na promjenu načina lokomocije (tj. hodanje u odnosu na trčanje) ili povećanje brzine kontinuiranog trčanja, utvrđeno je da mišićni fascikli *soleusa* pokazuju minimalno skraćivanje u usporedbi s mišićno-tetivnom jedinicom tijekom cijelog stava. Tijekom hodanja i trčanja, mišićni fascikli su doprinijeli samo 35, odnosno 20% ukupne promjene duljine mišićno-tetivne jedinice i brzine skraćivanja. Veće razine mišićne aktivnosti dovele su do sve kraćih mišićnih fascikli *soleusa* kako se povećavala brzina lokomocije, što je omogućilo veće istezanje i trzaj tetive. Stoga je elastična tetiva doprinijela većini promjene duljine mišićno-tetivne jedinice tijekom hodanja i trčanja. Pri prijelazu s hodanja na trčanje blizu željene prijelazne brzine (2,0 m/s), veći, ekonomičniji razvoj okretnog momenta gležnja objašnjava se sporijim skraćivanjem mišićnih fascikli *soleusa* i djelovanjem na povoljnijem dijelu (tj. bliže platou) krivulje sila-duljina (Lai i sur., 2015).

U istraživanju Lichtwarka, Bougouliasa i Wilsona (2007) korišten je ultrazvuk za ispitivanje duljine mišićnih fascikli i promjena kuta pera na proksimalnom, distalnom i srednjem dijelu trbuha ljudskog mišića *gastrocnemius medialis* tijekom hodanja (4,5 km/h) i trčanja (7,5 km/h) na traci za trčanje. Rezultati ove studije pokazali su da mišićni fascikli izvode iste radnje duž duljine mišića *gastrocnemius medialis* tijekom lokomocije. Međutim, distalne fascikule teže se više skraćivati i djelovati pod većim kutovima pera nego proksimalne fascikule. Mišićni su fascikli djelovali relativno izometrično tijekom faze stava prilikom hodanja, međutim prilikom trčanja fascikli su se skraćivali tijekom cijele faze stava, što je odgovaralo povećanju naprezanja serije elastičnih elemenata (SEE) (koji se sastoje od Ahilove tetive i aponeuroze). Mjerenje promjena duljine fascikula na razini srednjeg trbuha dalo je dobru aproksimaciju prosječnih promjena duljine fascikula duž duljine mišića. Usklađenost SEE-a omogućuje mišićnim fascikulama da se skraćuju puno sporijom brzinom, što je više usklađeno s njihovom optimalnom brzinom za maksimalnu izlaznu snagu i učinkovitost, uz visoko brzinsko skraćivanje tijekom odraza u hodanju i trčanju koje se postiže trzajem SEE-a. Funkcija mišića koji rade *in situ* može se proučavati mjerenjem obavljenog mehaničkog rada i energije utrošene za njegovo obavljanje. Potrošnja energije tijekom vježbanja opsežno je proučavana, ali mehanički rad koji se obično mjeri samo je višak koji mišići moraju izvršiti kada je opterećenje nametnuto neopterećenom pokretu (npr. hodanje i trčanje protiv vodoravne

sile koja ometa ili uzbrdo, vožnja bicikla, veslanje). Pozitivan rad koji obavljaju mišići proizlazi iz kemijske energije transformirane njihovim kontraktilnim svojstvima i mehaničke energije pohranjene u njihovim elastičnim elementima tijekom prethodne faze negativnog rada kada se mehanička energija preuzima iz okoline. Maksimalna učinkovitost transformacije kemijske energije u pozitivan mehanički rad mišića je oko 0-25 i za mišiće žabe i za sva ljudska bića. Sveukupna učinkovitost pozitivnog rada obavljenog tijekom zadatka, izražena je omjerom: pozitivan rad mišića/kemijska energija potrošena od strane mišića, daje relativnu važnost kontraktilnog naspram elastičnog ponašanja mišića. Zapravo vrijednost veća od 0-25 mora označavati da je dio pozitivnog rada isporučen, besplatno, elastičnim elementima rastegnutim nekom vanjskom silom tijekom prethodne faze negativnog rada. Ova je učinkovitost mjerena tijekom hodanja po ravnom terenu i trčanja različitim brzinama. Pokazalo se da je doprinos elastične energije veći u trčanju nego u hodanju: to se dobro slaže s krutim nasuprot popustljivom tipu mehanizma ovih dviju aktivnosti (Cavagna i Kaneko, 1977).

Kinetička i potencijalna energija tijela koja se gubi tijekom prve polovice stava uglavnom se pohranjuje kao energija elastičnog naprezanja u popustljivim tkivima poput Ahilove tetive (Ker, Bennett, Bibby, Kester i Alexander, 1987). Pohranjena energija elastičnog naprezanja zatim se obnavlja tijekom druge polovice stava pridonoseći energiji propulzije koju generira mišićno tetivna jedinica. Ovo korištenje energije elastičnog naprezanja smanjuje pozitivan rad mišićnih fascikli i omogućuje im da se ponašaju poput gotovo izometrijskih podupirača koji razvijaju silu u povoljnim područjima F-V i F-L odnosa (Biewener i Roberts, 2000). U nastojanju da se istraže karakteristike sila-vrijeme tijekom faze ubrzanja sprinterskog starta, osam muških sprintera činili su ispitanike. Trčanja do 3 metara analizirana su iz filma, a parametri sila-vrijeme mjereni su na platformi za silu. U početnom stavu vrijeme reakcije grupe bilo je $0,118 \pm 0,016$ s, a proizvodnja sile trajala je $0,342 \pm 0,022$ s. Maksimalna rezultanta sile u trenutku najveće horizontalne sile bila je $19,3 \pm 2,2$ N/kg, a smjer sile 32 ± 7 . U zadnjem trenutku prije napuštanja blokova brzina težišta bila je $3,46 \pm 0,32$ N/kg. m/s. U prvom kontaktu nakon napuštanja blokova došlo je do faze kočenja ($0,022 \pm ,005$ s u trajanju) tijekom koje je prosječna horizontalna sila bila -153 ± 67 N. Faza kočenja je promatrana unatoč tome što je težište tijela bilo horizontalno ispred za $0,13 \pm 0,05$ m u odnosu na prvu kontaktnu točku. Postotak usporavanja brzine trčanja tijekom te faze bio je $4,8 \pm 2,9\%$. U fazi propulzije prosječna horizontalna sila bila je velika (526 ± 75 N), a proizvodila se relativno dugo ($0,171 \pm ,035$ s). Uočeni su značajni koeficijenti korelacije između proizvodnje sile i brzine trčanja. Ovi rezultati sugeriraju da se faze kočenja/pogona javljaju odmah nakon faze bloka i da snaga mišića snažno utječe na brzinu trčanja u sprinterskom startu (Roberts i Azizi, 2011).

Cavagna, Komarek i Mazzoleni (1971) u svom su radu proučavali učinak brzine skraćivanja na snagu koju razvijaju mišići u sprinterskom trčanju mjerenjem mehaničkog rada učinjenog da ubrza tijelo prema naprijed od starta do oko 34 km/h. Rad je mjeren na svakom koraku iz podataka dobivenih pomoću platforme osjetljive na silu kojom djeluje stopalo. Gotovo cjelokupni pozitivni rad obavljen tijekom prve sekunde od početka nalazi se kao povećanje kinetičke energije tijela. Međutim, kako brzina trčanja raste, otpor zraka i posebno usporavanje tijela prema naprijed, koje se događa pri svakom koraku, brzo se povećavaju, ograničavajući brzinu trčanja. Prosječna snaga koju razvijaju mišići tijekom potiska pri svakom koraku raste s brzinom trčanja koja doseže 3-4 h.p. pri maksimalnoj postignutoj brzini. Čini se da je pri maloj brzini kontraktilna komponenta mišića uglavnom odgovorna za izlaznu snagu, dok pri velikoj brzini (25-34 km/h) čini se da značajan dio snage održava mehanička energija pohranjena u „serijama elastičnih elemenata“ tijekom istežanja kontrahiranih mišića (negativan rad) i otpuštenih odmah nakon toga u fazi pozitivnog rada. Neto pozitivna mehanička energija može se postići minimiziranjem negativnog rada tijekom ranog položaja ili povećanjem pozitivnog rada tijekom kasnog položaja. Budući da tetive ne mogu izvršiti neto pozitivan rad, zaključuje se da će rad koji obavljaju mišićni fascikli biti veći tijekom maksimalnog sprinta u usporedbi s kontinuiranim trčanjem (Roberts i Scales, (2002).

Mehaničke uloge kontraktilnih elemenata tetiva i mišića tijekom lokomocije često se razmatraju neovisno, ali funkcionalno su usko povezane. Tetive mogu poboljšati izvedbu mišića u velikom rasponu lokomotornih aktivnosti jer se mišićno-tetivne jedinice skraćuju i produžuju brzinama koje bi bile mehanički nepovoljne za mišićna vlakna koja funkcioniraju sama. Tijekom aktivnosti koje zahtijevaju malu neto mehaničku izlaznu snagu, kao što je kontinuirano trčanje, tetive smanjuju mišićni rad pohranjivanjem i obnavljanjem cikličkih promjena u mehaničkoj energiji tijela. Istežanje i trzaj tetive ne samo da smanjuju mišićni rad, već također omogućuju mišićnim vlaknima da rade gotovo izometrično, gdje, zbog odnosa sila-brzina, skeletna mišićna vlakna razvijaju velike sile. Elastična pohrana energije i oporavak u tetivama također mogu pružiti ključni mehanizam koji omogućava pojedinačnim mišićima da mijenjaju svoju mehaničku funkciju, od izometrijskih proizvođača sile tijekom kontinuiranog trčanja do aktivnog skraćivanja proizvođača snage tijekom snažnih aktivnosti poput ubrzanja ili trčanja uzbrdo. Dokazi iz studija mišićne kontrakcije i dinamike udova purana sugeriraju da se tijekom ubrzanja rad prenosi izravno s mišića na tetivu jer se istežanje tetive rano u koraku pokreće skraćivanjem mišića. Energija pohranjena u tetivi kasnije se oslobađa kako bi pomogla u povećanju energije tijela. Ove promjene duljine tetive redistribuiraju snagu mišića, omogućujući kontraktilnim elementima da se skraćuju pri relativno konstantnim brzinama i

izlaznoj snazi, neovisno o obrascu fleksije-ekstenzije zgloba. Pohranjivanje i oporavak elastične energije tetive proširuje funkcionalni raspon mišića odvajanjem obrasca skraćivanja mišićnih vlakana od obrasca kretanja tijela (Roberts, 2002).

Prethodne studije koje su istraživale balističke pokrete kao što je skakanje sugerirale su da se fascikli distalnih mišića udova skraćuju tijekom faze opterećenja, dok se mišićno-tetivna jedinica produljuje, što na taj način omogućuje pohranu energije elastičnog naprezanja tetive čak i za pokrete povezane s minimalnim gubitkom mehaničke energije tijela (Anderson i Pandy, 1993). Energija elastičnog naprezanja tetive dominantno pridonosi radu tetive mišića tijekom trčanja u stabilnom stanju. Događa li se ovo ponašanje i za ubrzanja sprinta? Za istraživanje korišteni su eksperimentalni podaci i računalno modeliranje kako bi se mogao kvantificirati rad mišićnih fascikli i energija elastičnog naprezanja tetiva za plantarne fleksore (posebno *soleus* i medijalni *gastrocnemius*) za višestruke kontakte stopala pri maksimalnom sprintu kao i za kontinuirano trčanje. Pozitivan rad fascikula mišića *soleusa* i medijalnog *gastrocnemiusa* postupno se smanjivao tijekom maksimalnog sprinta i oba su mišića obavila više rada za prvi kontakt stopala pri maksimalnom sprintu (FC1) u usporedbi s kontinuiranim trčanjem pri 5 m/s (SS5). Međutim, razlike u energiji istežanja tetive za oba mišića bile su zanemarive tijekom maksimalnog sprinta i kada se uspoređuju FC1 sa SS5. Posljedično, doprinos rada mišićnog fascikla pohranjenoj energiji elastičnog naprezanja tetive bio je veći za FC1 u usporedbi s naknadnim kontaktima stopala pri maksimalnom sprintu u usporedbi sa SS5. Zaključeno je da je energija elastičnog naprezanja tetiva u plantarnim fleksorima gležnja jednako bitna na početku maksimalnog sprinta kao i na kraju, kao i za kontinuirano trčanje (Lai i sur., 2016).

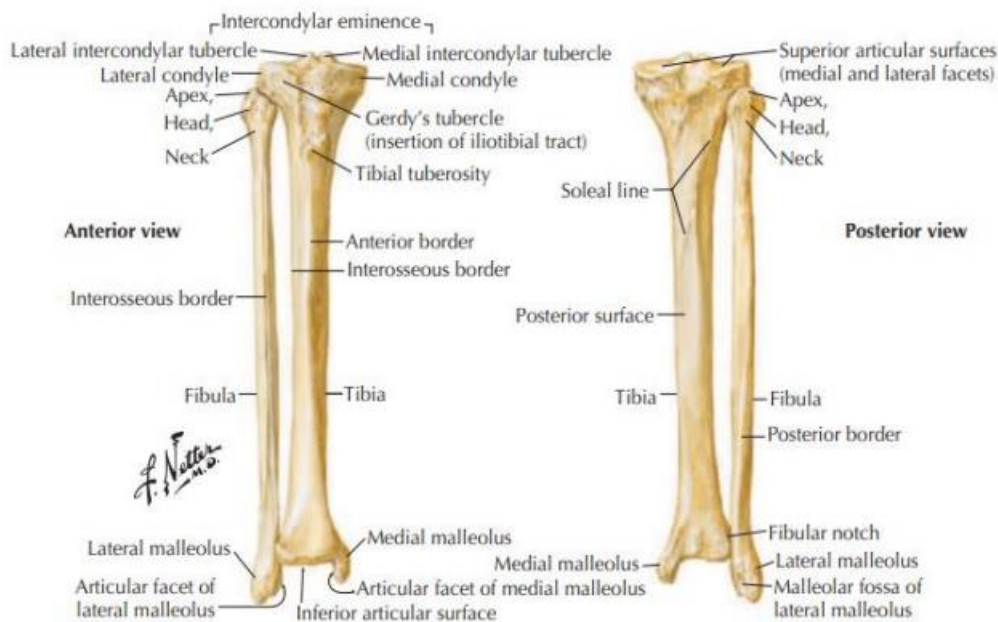
2. ANATOMSKA ANALIZA POTKOLJENICE

Goljenična kost i lisna kost čine skupinu kostiju koje tvore potkoljenicu, zajedno s mišićima potkoljenice. Ovi mišići, u kombinaciji s mišićima stopala, uspostavljaju povezanost između kostiju stopala i potkoljenice. Mišići potkoljenice se mogu klasificirati u tri skupine: prednju, lateralnu i stražnju. Stražnja skupina dodatno obuhvaća površinski i dubinski sloj (Keros i Pećina, 2006).

2.1. Kostii potkoljenice

Potkoljenični kostur čine dvije kosti, goljenična i lisna kost (Slika 1). Ove kosti dijele zajedničku karakteristiku zadebljanja na svojim krajevima, dok međusobno ograničavaju

prostor između njih poznat kao međukoštani prostor (*spatium interosseum cruris*). Osim toga, obje kosti su gotovo jednake duljine, s tim da je lisna kost smještena nešto niže, ne dosežući gornji rub goljenične kosti (Keros i Pećina, 2006).



Slika 1. Koštana anatomija potkoljenice

2.1.1. Goljenična kost

Goljenična kost, najveća kost potkoljenice, ima ključnu ulogu u formiranju zglobova koljena i gornjeg nožnog zgloba. Ova kost nalazi se medijalno u odnosu na lisnu kost i znatno je snažnija od nje. Dužina goljenične kosti premašuje samo bedrenu kost. Proksimalni kraj goljenične kosti je deblji od donjeg dijela te sadrži dva zglobna kondila: medijalni (*condylus medialis*) i lateralni (*condylus lateralis*). Svaki kondil ima zglobnu plohu, *facies articularis superior*, za odgovarajući kondil bedrene kosti. Medijalna zglobna ploha je veća, bubrežastog oblika i blago konkavna, dok je lateralna trokutasta i ravna, s blagom konveksnosti u stražnjem dijelu. Između kondila goljenične kosti postoji izbočenje, *eminentia intercondylaris*, koje uključuje medijalni *tuberculum intercondylare mediale* i lateralni *tuberculum intercondylare laterale*. Ova struktura ima prednju i stražnju udubinu, *area intercondylaris anterior et posterior*. Stražnja udubina služi kao hvatište za stražnji kraj medijalnog meniska i stražnji križni ligament, dok je prednja udubina hvatište za prednji kraj medijalnog meniska i prednji križni ligament. *Gerdyjev* tuberkul se nalazi na anterolateralnom dijelu proksimalnog kraja

goljениčne kosti, gdje se pričvršćuje iliotibijalna tetiva. Na donjoj strani lateralnog kondila goljениčne kosti nalazi se zglobna ploha, *facies articularis fibularis*, koja se povezuje s gornjim dijelom lisne kosti. Trup goljениčne kosti ima trokutasti oblik s tri strane i tri ruba, pri čemu su lateralna i stražnja strana pokrivene mišićima, a medijalna strana samo kožom. Na gornjem dijelu stražnje strane nalazi se kosa linija, *linea musculi solei*, koja služi kao hvatište za mišić soleus. Ispod nje se nalazi otvor za hranidbenu arteriju goljениčne kosti. Prednji rub goljениčne kosti ima oštar oblik poput izduženog slova S, s gornjim konkavitom okrenutim prema vani, a donjim prema unutra. Proksimalno, prednji rub kosti proširuje se u izbočenu hrapavost, *tuberositas tibiae*, gdje se pričvršćuje patelarni ligament. Medijalni rub je dobro izražen i tup, dok je lateralni oštar i služi kao mjesto za pričvršćivanje međukoštane opne. Distalni kraj goljениčne kosti ima oblik četverostrane piramide. Medijalna strana sadrži medijalni gležanj, *malleolus medialis*, dok lateralna strana ima zglobnu plohu, *facies articularis malleoli medialis*, za gležanjsku kost, talus. Na lateralnoj strani distalnog kraja goljениčne kosti nalazi se udubina, *incisura fibularis*, koja se povezuje s lisnom kosti. Na distalnom kraju goljениčne kosti, nalazi se četverokutasta zglobna ploha za gležanjsku kost, *facies articularis inferior*, koja zajedno s gležanjskom kosti čini gornji nožni zglob (Krpmotić-Nemanić i Marušić, 2007).

2.1.2. Lisna kost

Lisna kost, poznata i kao fibula, predstavlja tanku i dugu kost koja se s proksimalnim krajem povezuje s goljениčnom kosti. Njezin donji kraj oslanja se na goljениčnu kost i uzgobljuje se s lateralnom stranom gležanjske kosti. Gornji kraj lisne kosti nalazi se ispod koljenskog zgloba, ali nije sastavni dio samog zgloba. Donjim dio lisne kosti zajedno s lateralnim gležnjem čini vanjski dio gornjeg nožnog zgloba. Lisna kost smještena je posterolateralno u odnosu na goljениčnu kost i sastoji se od glave, vrata, trupa i distalnog gležnja. Glava lisne kosti, *caput fibulae*, na proksimalnom kraju sadrži zglobnu plohu za goljениčnu kost i završava vrškom, *apex capitis fibulae*. Lateralna strana glave je hrapava i može se palpirati ispod kože. Vrat lisne kosti smješten je neposredno ispod glave, a *n. fibularis communis* prolazi posterolateralno od vrata, što može rezultirati neurološkim deficitom u tom području kod prijeloma. Trup lisne kosti, *corpus fibulae*, tanak je i trokutastog oblika, s prednjim, stražnjim i medijalnim rubovima. Na distalnom kraju lisne kosti nalazi se lateralni gležanj, *malleolus lateralis*, s trokutastom zglobnom plohom koja se uzgobljuje s lateralnom zglobnom plohom gležanjske kosti. Na medijalnoj strani lateralnog gležnja nalazi se hrapavost koja se naslanja na urez goljениčne kosti. Hranidbeni otvor lisne kosti obično se nalazi u srednjoj trećini kosti. Goljениčna i lisna kost su povezane pravim zglobom, *articulatio tibiofibularis*, na

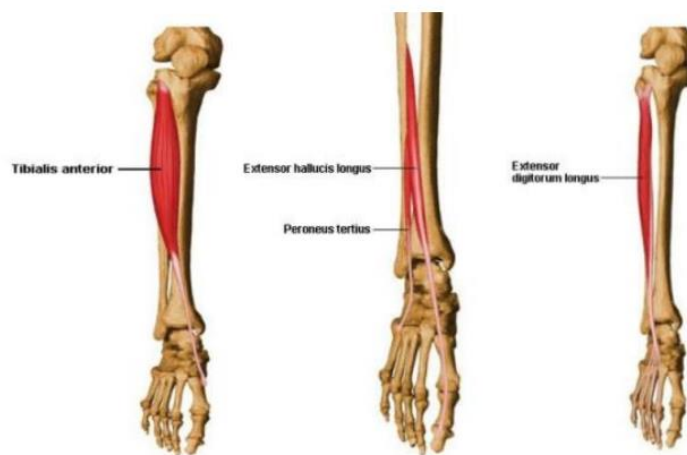
gornjem kraju, dok su njihovi donji krajevi povezani vezivnim spojem, *syndesmosis tibiofibularis*. Međukoštana opna, membrane *interossea cruris*, također povezuje goljeničnu i lisnu kost (Keros i Pećina, 2006).

2.2. Mišići potkoljenice

Mišići potkoljenice i mišići stopala povezuju kosti potkoljenice s kostima stopala i tvore mišićni sustav donjih udova. Aktivacijom ovih mišića pokreće se stopalo čime se omogućuje njegova funkcionalnost. Mišići potkoljenice dijele se na prednju, srednju i lateralnu skupinu. Smještene su u posebne koštano-fibrozne odjeljke odijeljene međumišićnim pregradama, kostima golijeni, međukoštanom opnom, a sve ih obavija golijenska fascija (Keros i Pećina, 2006).

2.2.1. Prednja skupina golijenskih mišića

Mišići potkoljenice, smješteni u određene koštano-fibrozne odjeljke, povezuju kosti potkoljenice s kostima stopala. Prednja skupina golijenskih mišića uključuje *m. tibialis anterior*, *m. extensor digitorum longus*, *m. peroneus tertius* i *m. extensor hallucis longus* (Slika 2). Svi ovi elementi zajedno čine funkcionalni mišićni sustav donjih udova (Keros i Pećina, 2006).



Slika 2. Prednja skupina golijenskih mišića

Prednji goljenični mišić, poznat i kao *m. tibialis anterior*, ima oblik prizme i smješten je uz lateralnu stranu i prednji rub tibije. Polazište mu je s lateralnog kondila tibije, lateralnog dijela tuberositas tibije i gornje lateralne površine tibije, te s medijalne polovice gornjeg dijela međukoštane opne. Mišićna vlakna prelaze u dugu i snažnu završnu tetivu koja se veže za unutarnju stranu stopala na medijalnu klinastu kost i na bazu prve metatarzalne kosti. Ovaj

mišić igra ključnu ulogu u dorzalnoj fleksiji i adukciji stopala, te rotaciji stopala prema unutra (Keros i Pećina, 2006).

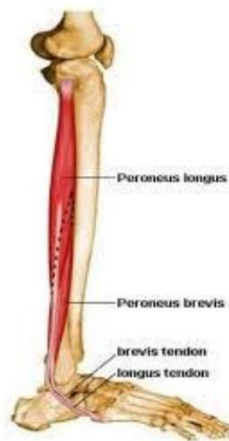
Dugi mišić ispružatelj prstiju, *m. extensor digitorum longus*, smješten je u vanjskom dijelu prednjeg mišićnog odjeljka. Polazište mu je s lateralnog kondila tibije, gornje strane fibule, lateralne polovice interosealne opne i intermuskularne pregrade (Keros i Pećina, 2006). Tetiva se sastoji od četiri tetive koje se završavaju u prstima stopala. Ovaj mišić odgovoran je za ekstenziju proksimalnih članaka drugog do petog prsta, kao i ekstenziju srednjih i distalnih članaka prstiju. Ima važnu ulogu u dorzalnoj fleksiji stopala, abdukciji, kružnom gibanju stopala prema van i podizanju lateralnog ruba stopala.

Treći lisni mišić, *m. fibularis (peroneus) tertius*, je izduljen i tanak mišić smješten u donjem i lateralnom dijelu prednjeg mišićnog odjeljka. Polazište mu je s donje medijalne strane fibule i donjeg dijela interosealne opne. Mišićna vlakna prelaze u tetivu koja zajedno s tetivom *m. extensor digitorum longus* hvata na gornjoj strani baze pete metatarzalne kosti. Ovaj mišić sudjeluje u dorzalnoj fleksiji, abdukciji i rotaciji stopala prema van, te podržava djelovanje *m. extensor digitorum longus* (Keros i Pećina, 2006).

Dugi mišić ispružatelj palca, *m. extensor hallucis longus*, je dug i tanak mišić u prednjem mišićnom odjeljku između *m. tibialis anteriora* i *m. extensor digitorum longus*. Polazište mu je na srednjoj i medijalnoj strani fibule te interosealne opne. Mišićna vlakna prelaze u dugu i čvrstu završnu tetivu koja hvata na proksimalnom dijelu članka i bazi distalnog članka palca. Ovaj mišić obavlja funkcije ekstenzije palca prema stopalu, dorzalne fleksije stopala, adukcije i sudjeluje u vanjskoj rotaciji stopala (Keros i Pećina, 2006).

2.2.2. Lateralna skupina golijenskih mišića

Lateralna skupina golijenskih mišića smještena je u lateralnom koštano-fibroznom odjeljku, omeđena golijenskom fascijom i prednjom te stražnjom intermuskularnom pregradom golijeni. Sastoji se od *m. fibularis (peroneus) longus* i *m. fibularis (peroneus) brevis* (Keros i Pećina, 2006) (Slika 3).



Slika 3. Lateralna skupina mišića potkoljenice

Dugi lisni mišić, poznat i kao *m. fibularis (peroneus) longus*, čini površinski dio lateralnog mišićnog odjeljka. Njegovo polazište obuhvaća prednji i lateralni dio glave gornje lateralne strane fibule, lateralnog kondila tibije, intermuskularnih pregrada i kruralne fascije (Keros i Pećina, 2006). Postoji prazan prostor između mišićnih vlakana koja potječu s glave fibule i lateralnog kondila tibije, te mišićnih vlakana koja počinju s lateralne strane fibule. Taj prostor stvara koštano-mišićni kanal (*canalis fibularis*). Kroz ovaj kanal prolazi *n. fibularis communis*, a pritisak na njega može izazvati sindrom fibularnog kanala s senzibilnim i motoričkim ispadima u inervacijskom području živca. Mišićna vlakna dugog lisnog mišića spuštaju se i prelaze u dugu i oblu završnu tetivu koja se pričvršćuje na lateralnu stranu baze prve metatarzalne kosti, dijelom i na medijalnu klinastu kost, te na bazu druge metatarzalne kosti (Keros i Pećina, 2006).

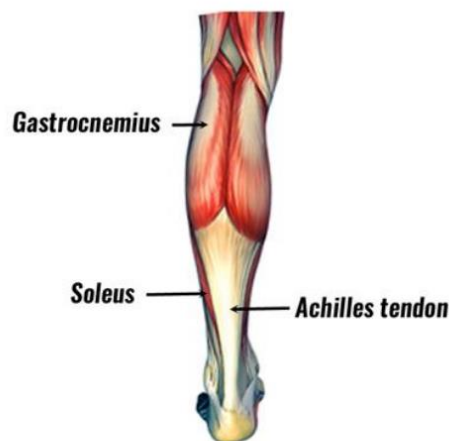
Dugi lisni mišić izvodi ekstenziju, abdukciju i vanjsku rotaciju stopala, te djeluje kao antagonist *m. tibialis anterior* (Keros i Pećina, 2006). Ovaj mišić igra važnu ulogu u održavanju poprečnog luka stopala, te njegova slabost može uzrokovati spuštanje poprečnog stopalnog luka i razvoj spljoštenog stopala (*pes transversoplanus*) (Keros i Pećina, 2006).

Kratki lisni mišić, poznat i kao *m. fibularis (peroneus) brevis*, nalazi se u donjem dijelu lateralnog mišićnog odjeljka, ispod dugog lisnog mišića. Polazište mišića je sa srednjeg dijela lateralne površine i prednjeg ruba fibule, te s intermuskularnih pregrada. Mišićna vlakna prelaze u tetivu koja se veže na hrapavost pete metatarzalne kosti. Ovaj mišić izvodi plantarnu ekstenziju, abdukciju i rotaciju stopala prema van. Fibularni mišići, poput ovog, igraju ključnu

ulogu u pokretima pronacije stopala, sprječavajući padanje tijela i omogućavajući stabilnost pri hodu (Keros i Pećina, 2006).

2.2.3. Stražnja skupina golijenskih mišića

Stražnja skupina golijenskih mišića ispunjava stražnji koštano-fascijalni odjeljak (ložu) golijeni (Slika 4). Troglavi lisni mišić, poznat i kao *m. triceps surae*, čini glavni dio ove skupine i oblikuje stražnji dio potkoljenice. *M. gastrocnemius* i *m. soleus* zajedničkom tetivom (*tendo calcaneus s. Achillis*) završavaju na petnoj kosti (Keros i Pećina, 2006). *M. gastrocnemius* ima dvije glave: medijalnu i lateralnu, koje polaze s bedrene kosti, dok *m. soleus* ima polazište s glave fibule, međumišićne pregrade i tibije.



Slika 4. Površinski sloj stražnje strane goljeničnih mišića

Troglavi lisni mišić ili *m. triceps surae* oblikuje stražnji dio potkoljenice, poznat i kao list *m. gastrocnemius* i *m. soleus* dijele zajedničku tetivu (*tendo calcaneus s. Achillis*), koja se povezuje s petnom kosti (Keros i Pećina, 2006).

Trbušasti mišić lista, *m. gastrocnemius*, sastoji se od dvije krupne široke glave: medijalne, koja je razvijenija, i lateralne (Keros i Pećina, 2006). Medijalna glava mišića započinje na zglobnoj čahuri, s medijalnog kondila i stražnje strane bedrene kosti, dok lateralna glava započinje mišićno-tetivnim vlaknima s lateralnog kondila i epikondila bedrene kosti, te sa zglobne čahure. Oko 10-18% ljudi ima sezamsku kost, poznatu kao fabella, vidljivu sa stražnje strane lateralnog kondila femura (Keros i Pećina, 2006). Mišićna vlakna ove dvije glave oblikuju dva mišićna trbuha koji se sužavaju u gornjem dijelu i šire u donjem dijelu, spajajući se u središnjoj crti golijeni. Ta mišićna vlakna završavaju na stražnjoj strani fibrozne ploče,

koja prolazi kroz cijeli mišić i služi kao osnova završne mišićne tetive. Ova tetiva povezuje se s tetivom listolikog mišića, stvarajući Ahilovu petnu tetivu (*tendo calcaneus*) (Keros i Pećina, 2006).

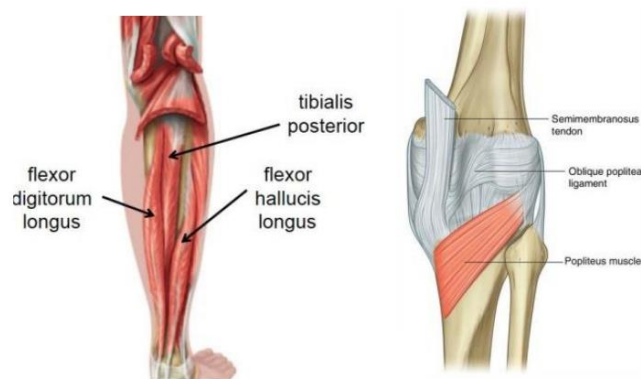
Listoliki mišić, *m. soleus*, je plosnat i širok mišić koji se sužava prema dolje. Polazište mu je sa stražnje strane glave, stražnje lateralne strane ruba fibule i stražnje strane međumišićne pregrade. Na tibiji počinje s medijalnog ruba i linea *m. solei*. Početna aponeuroza ovog mišića postavljena je poprečno kroz gornji dio mišića, tvoreći intramuskularnu aponeurozu. Mišićna vlakna se odvajaju prema naprijed i prema dolje od gornjeg ruba aponeuroze. Gornji rub aponeuroze stvara tetivni luk, *arcus tendineus m. solei*, koji se proteže od fibule do tibije. Mišićna vlakna započinju s konveksnog ruba tetivnog luka, dok je konkavan rub slobodan i omeđen fascijom poplitealnog mišića, čime se definira poplitealni kanal. Mišićna vlakna završavaju dugom pločastom tetivom koja se združuje s završnom tetivom *m. gastrocnemiusa*, zajedno tvoreći petnu tetivu (Keros i Pećina, 2006). Ahilova petna tetiva spušta se prema stopalu i vezuje za donju polovicu stražnje strane tuber kalkanei, čineći je najjačom tetivom u ljudskom tijelu (Keros i Pećina, 2006). S prednje strane, odvojena je slojem masnog tkiva od dubokog mišićnog sloja, olakšavajući pokretljivost tetive. Sluzna vreća odvaja je od gornjeg dijela stražnje strane tuber kalkanei, dok se između petne tetive i kože nalazi još jedna sluzna vreća (Keros i Pećina, 2006).

Troglavi lisni mišić glavni je izvođač plantarne ekstenzije stopala, sudjeluje u podizanju stopala na prste te izvodi adukciju i rotaciju stopala prema unutra. Također igra ključnu ulogu u podizanju pete od podloge i guranju prema naprijed, što je bitno pri hodanju, trčanju i skakanju (Keros i Pećina, 2006). U suradnji s mišićima *gluteus maximus* i *kvadriceps femoris*, troglavi lisni mišić participira u ekstenzornom kinetičkom nizu, koji snažno opruža nogu i podiže tijelo iz čučnja, dok pri skakanju snažno gura tijelo naprijed (Keros i Pećina, 2006). Trbušasti lisni mišić izvodi fleksiju golijeni u koljenom zglobu. Kada je koljeno opruženo, mišić je napet i snažnije djeluje na zglobu gležnja. Tonus mišića sprječava prekomjernu dorzalnu fleksiju stopala i padanje tijela prema naprijed (Keros i Pećina, 2006). Listoliki mišić, kada je stopalo čvrsto na podlozi, povlači gornji dio golijeni prema natrag, posredno opružajući koljeno i sprječavajući pomak golijeni prema naprijed i padanje tijela (Keros i Pećina, 2006).

Tabanski mišić, poznat i kao *m. plantaris*, smješten je između mišića *gastrocnemiusa* i *soleusa*. Njegovo polazište je na lateralnom kondilu bedrene kosti, iznad lateralne glave *m. gastrocnemiusa*. Tanak mišićni trbuh nastavlja se u dugu tetivu koja se priključuje na medijalni rub petne tetive, pridonoseći funkcijama troglavog lisnog mišića (Keros i Pećina, 2006). Ova struktura golijenskih mišića ima ključnu ulogu u održavanju ravnoteže, stabilnosti i

pokretljivosti donjih ekstremiteta. Njihova koordinirana aktivnost omogućava kompleksne pokrete tijekom hodanja, trčanja i drugih aktivnosti.

Mišići površinskog sloja stražnje skupine golijenskih mišića igraju ključnu ulogu u omeđivanju topografski važne zakoljene jame, poznate kao fossa poplitea (Keros i Pećina, 2006). Ova anatomski važna jama smještena je stražnje i distalno od koljena, a okružena je mišićima i drugim anatomske strukturama. Duboki sloj stražnje skupine golijenskih mišića uključuje zakoljeni mišić, stražnji goljenični mišić, dugi mišić pregibač prstiju i dugi mišić pregibač palca (Keros i Pećina, 2006). Ovi mišići zajedno doprinose stabilnosti, pokretljivosti i funkcionalnosti donje noge. Ovaj sloj mišića odražava kompleksnu strukturu *fossa poplitea*, pridonoseći njezinoj anatomiji i funkciji. Grafički prikaz ovih mišića može se vidjeti na Slici 5.



Slika 5. Dubinski sloj stražnje strane goljeničnih mišića

Mišić *popliteus*, poznat i kao zakoljeni mišić, ima oblik trokuta, s bazom na tibiji i vrhom na lateralnom kondilu femura. Tetive mišića polaze iz udubine na lateralnoj strani bedrene kosti i dijela koljenog zgloba, te prolaze između femura i lateralne kolateralne sveze, vezujući se iznad linea m. solei i na medijalni rub tibije. Prednja strana mišića pokriva zglobnu čahuru. Ovaj mišić ima ulogu fleksije golijeni prema bedru i rotacije prema unutra (Keros i Pećina, 2006).

Stražnji goljenični mišić, *m. tibialis posterior*, smješten je u srednjem dijelu dubokog sloja stražnje mišićne skupine, s medijalnom pozicijom u odnosu na *m. flexor digitorum longus*. Polazište mišića je s gornje stražnje strane tibije, gornjeg dijela međukoštane opne, gornje medijalne strane fibule i međumišićnih pregrada (Keros i Pećina, 2006). Mišićna vlakna prikupljaju se i povezuju s tetivom koja prolazi kroz mišić, a zatim se veže na *tuberositas ossis navicularis*. Njegove funkcije uključuju plantarnu ekstenziju, adukciju stopala i rotaciju prema

unutra. Također, ima važnu ulogu u održavanju statičnosti stopala te podržava poprečne i uzdužne lukove stopala. Slabost ovih mišića često dovodi do spuštanja svoda stopala, što može rezultirati *pes valgusom*, izvrtanjem stopala prema vani (Keros i Pećina, 2006).

Dugi mišić pregibač prstiju, *m. flexor digitorum longus*, smješten je u medijalnom dijelu dubokog mišićnog sloja. Polazište mu je na stražnjoj strani tibije, gdje mišićna vlakna prelaze u tetivnu ploču. Kroz četiri snopa, tetive se spajaju u snažnu tetivu koja se proteže do prstiju, gdje započinju lumbrikalni mišići. Ovaj mišić izvodi fleksiju distalnih članaka od drugog do petog prsta, sudjeluje u plantarnoj ekstenziji stopala i unutarnjoj rotaciji stopala. Tijekom hodanja, mišić pritišće prste na podlogu, djelujući kao elastična opruga i pomažući stopalu pri podizanju (Keros i Pećina, 2006).

Dugi mišić pregibač palca, *m. flexor hallucis longus*, smješten je najlateralnije u dubokom mišićnom sloju. Polazište mu je na donjem lateralnom rubu fibule, međukoštane opne i međumišićnih pregrada. Mišićna vlakna oblikuju izduženi mišićni trbuh, koji iznad zgloba gležnja prelazi u dugotrajnu i snažnu završnu tetivu. Tetiva dolazi na stopalo, gdje se veže u brazdu palčanog distalnog članka. Ovaj mišić ima funkciju fleksije distalnog članka palca, plantarne ekstenzije, adukcije i rotacije stopala prema unutra. Važan je i za održavanje stabilnosti uzdužnog luka stopala i sprječavanje izvrtanja petne kosti. Tijekom hoda omogućuje podizanje palca od podloge, djelujući kao elastična opruga (Keros i Pećina, 2006).

Golijenska fascija obavlja golijenske mišiće, počevši s prednjeg ruba tibije, okružuje golijen i veže se na medijalni rub tibije, ostavljajući medijalnu plohu tibije bez fascije (Keros i Pećina, 2006). Zadržnici mišića ispružaća (*retinacula mm. extensorum*) su fibrozne trake koje tvore koštano-fibrozne kanale, pritežući mišićne tetive uz koštanu podlogu. Zadržnici lisnih mišića (*retinacula mm. fibularium*) su dvije fibrozne trake, gornja i donja, koje se nalaze na lateralnoj strani zgloba, učvršćujući tetive lateralne skupine golijenskih mišića (Keros i Pećina, 2006). Zadržnik mišića pregibača (*retinacula mm. flexorum*) ima dva sloja: površinski i dubinski sloj. Površinski sloj je trokutasto zadebljanje stražnjeg i medijalnog dijela kruralne fascije, vezujući se za unutarnji rub i vrh medijalnog maleola, dok baza trokuta ide prema petnoj tetivi, medijalnom rubu kalkaneusa i plantarnoj aponeurozi. Dubinski sloj počinje s medijalnog maleola zajedno s fibroznim vlaknima površinskog sloja, a njegova fibrozna vlakna vezuju se za stražnji nastavak talusa i ulaze u duboku kruralnu fasciju. Tanke fibrozne trake dubokog sloja dijele tarzalni kanal na dva otvora: *lacuna tendinum* i *lacuna vasonervorum* (Keros i Pećina, 2006).

3. IZOMETRIJSKA MIŠIĆNA AKTIVACIJA

Statički i dinamički oblik rada su dva modela ljudskog tijela pomoću kojih se mišići aktiviraju tijekom aktivnosti. Koncentrične i ekscentrične kontrakcije najčešće se povezuju s dinamičkim načinom rada, dok se s druge strane izometrijske mišićne kontrakcije povezuju sa statičkim načinom rada. Sinonim za koncentričnu mišićnu kontrakciju je pozitivna faza pokreta i to je faza u kojoj se mišićna vlakna skraćuju te time svladavaju određeno vanjsko opterećenje. Ekscentričnom kontrakcijom tijelu omogućujemo popuštanje nekog vanjskog opterećenja, a kod izometričkih mišićnih kontrakcija nema promjena u duljini mišićnih vlakana ili zgloba, te je mišićna napetost kontinuirana određeni period vremena (Garner, Blackburn, Weimar i Campbell, 2008). Ove tri kontrakcije pojavljuju se gotovo u svakom pokretu. Iz tog razloga važno ih je zasebno razmatrati i trenirati, te u nekim segmentima kondicijske pripreme pozornost i važnost usmjeriti svakoj od njih. Ovaj rad će biti posvećen izometrijskom treningu kao neizostavnom dijelu kondicijske pripreme sportaša te primjeni ovakvog tipa treniranja za postizanje povećanja jakosti i snage. Izometrijske kontrakcije nam mogu uvelike pomoći poboljšati kvalitetu koncentrične kao i ekscentrične kontrakcije (Dadić, Vajdić, Plevnik i Serdarušić, 2020). Garner i sur. (2008) u svome radu iznose kako se u jednom dijelu ekscentričnih i koncentričnih mišićnih kontrakcija javljaju dvije vrste izometrijskih kontrakcija. Na kraju ekscentrične kontrakcije, prilikom izvođenja određenog pokreta, javlja se zadržavajuća izometrička aktivnost (*eng. holding isometric muscle action*), dok se na početku koncentričnog tipa pokreta javlja savladavajuća izometrijska aktivnost (*engl. pushing isometric action*). Semmler, Kornatz, Dinunno, Zhou i Enoke, (2002) također istražuju pojavnost dva navedena tipa izometrijske mišićne aktivnosti. U radu Enoke (2002) se može vidjeti kako oni za opisivanje kretnje zadržavajuće izometrijske aktivnosti koriste termin „force task“ koju definiraju kao zadržavanje konstantne pozicije tijela. Savladavajuću izometrijsku aktivnost navedeni autori definiraju kao konstantno zadržavanje određene pozicije tijela, uz pokušavanje svladavanje opterećenja. Zadržavajuća aktivacija mišića se odnosi tip kontrakcije u kojoj se sportaš odupire vanjskom opterećenju, odnosno proizvodi onoliko sile koliko je potrebno da bi ostao u kvalitetnoj poziciji. Tako se može zaključiti da se ova vrsta kontrakcije može upotrebljavati samo u onom slučaju kada je vanjsko opterećenje ujedno blizu maksimalnih vrijednosti koje sportaš može generirati. Savladavajuća izometrijska aktivacija mišića je ona koja opisuje metode u kojima sportaš potiskuje ili povlači vanjsko opterećenje, međutim sila koju sportaš proizvodi je jednaka vanjskom opterećenju. Napetost i duljina mišića jednaka je i konstantna u obje vrste izometrijske mišićne kontrakcije. Međutim, ako usporedimo navedene

izometrijske kontrakcije s aspekta metaboličkog i neuralnog stresa, možemo zaključiti da zadržavajuća izometrijska kontrakcija ima puno veću kompleksnost i „stresnija“ je na komponentu metaboličkog zamora mišićnih vlakana i na neuralnu kontrolu (Schaefer i Bittmann, 2017).

Izometrijski trening ključan je za pobuđivanje tri ključna fiziološka procesa: količina angažiranosti motoričkih jedinica tijekom pokreta (*engl. motor unit recruitment*), njihovoj brzini aktiviranja (*engl. rate coding*) te mišićnoj iradijaciji. Navedeni procesi sinergijski i komplementarno utječu na sportsku izvedbu, ali su i podloga za različite aspekte kondicijske pripreme (Dietz i Peterson, 2012). Istraživanja pokazuju da se izometrijskim kontrakcijama angažira veća količina motoričkih jedinica nego u koncentričnim i ekscentričnim mišićnim kontrakcijama (Babault, Pousson, Ballay i Van Hoecke, 2001). Kao podloga tome leži u činjenicama da se tijekom izometrijske kontrakcije aktiviraju veći neuroni koji su zadušeni za aktivaciju brzih mišićnih vlakana, a brzina aktiviranja je primarni mehanizam za unutar mišićnu tenziju pomoću koje svladavamo opterećenje ili se krećemo (Dietz i Peterson, 2012). U vrijeme kada živčani sustav treba povećati jačinu kontrakcije, on povećava frekventnost signala koji uzrokuje više manjih kontrakcije koje vode do stanja tenzije. Zbog toga je cilj izometrijskog treniranja pobuđivanje živčanog sustava kako bi se moglo aktivirati više neurona koji inerviraju jedan mišić. Pojam mišićne iradijacije se odnosi na povezanost i izometrijsku aktiviranost različitih mišića pomoću kojih sportaši uče integrirati različite dijelove tijela unutar izvođenja određenih vježbi jakosti i snage (za primjer možemo uzeti rotiranje stopala u pod prilikom izvedbe čučnja zbog aktivacije gluteusa). Mišićnom se iradijacijom može razvijati i visoka razina tenzije mišića u određenom kutu u pojedinom zglobu ili usavršavanje kompaktnosti tijela prilikom izvedbe različitih pokreta. Također, pozitivno utječe na kvalitetu i čvrstoću tetivnog sustava koji zasigurno uvjetuju bolju aktivaciju mišićnog sustava (Rio i sur., 2017). Iz prethodnih navoda tako možemo zaključiti da se treningom izometrije može pozitivno utjecati na unapređenje kvalitete živčanog sustava, ali i mehanizama refleksa istezanja i skraćivanja (*engl. stretch and shortening cycle*). Dakle, efekti razvoja snage izometrijskim načinom rada primarno dolaze zbog poboljšane aktivacije živčanog sustava te poboljšanja tenzije tetivno-mišićnog aparata. Osim toga, primjenom ovakve vrste kontrakcije omogućava se mišićima prelazak iz ekscentričnog rada u koncentrični sa smanjenom disperzijom sile i gubljenjem energije (Dietz i Peterson, 2012). S obzirom da je poznato da kod izometrijskog načina treniranja nema promjene u duljini mišićnih vlakana kao u ostalim mišićnim kontrakcijama, definitivno je da je najmanje mišićno oštećenje i potrošnja energije tijekom izvedbi ovakvih

kontrakcija u treningu. Zbog toga je ovakav način kontrakcija poželjan tijekom natjecateljskog perioda, u rehabilitaciji, pa čak i u treningu oporavka (Dadić i sur., 2020).

4. IZOMETRIJSKI TRENING

Izometrijska mišića akcija odnosi se na naprezanje mišićne snage/mišićne napetosti bez stvaranja stvarnog pokreta ili promjene u duljini mišića. Izometrijsko djelovanje mišića također se može nazvati statičkim treningom. Primjeri treninga izometrijske akcije mogu uključivati:

1. zadržavanje težine u određenom položaju tijela
2. guranje nepomičnog vanjskog otpora

Povijesno gledano, vjerovalo se da možemo proizvesti više snage u maksimalnoj izometrijskoj akciji nego u koncentričnoj kontrakciji. Dok neke studije pronalaze blagu razliku, sovjetska literatura zaključuje da je potrebno istaknuti da ne postoji statistički značajna razlika između maksimalne snage, mjerene u statičkom režimu, i maksimalne težine koja se može podići u istom pokretu. Iako vjerojatno nije tako učinkovit kao popuštajući (*eng. yielding*) ili svladavajući (*eng. overcoming*) trening, izometrijski trening ipak može biti od značajne koristi većini sportaša (Thibaudeau, 2006).

4.1. Trening izometrijske akcije kao važan potencijator mišićne aktivacije

Jedna od najvažnijih prednosti izometrijskog akcijskog treninga je da je režim kontrakcije taj koji dovodi do najveće razine aktivacije. Aktivacija se odnosi na korištenje motornih jedinica mišića. Nedavna studija koja je uspoređivala razinu mišićne aktivacije tijekom izometrijskih, koncentričnih i ekscentričnih mišićnih radnji otkrila je da se tijekom maksimalne izometrijske mišićne akcije može angažirati preko 5% više motornih jedinica/mišićnih vlakana nego tijekom maksimalne ekscentrične ili maksimalne koncentrične akcije; 95,2% za izometriju u usporedbi s 88,3% za ekscentričnu i 89,7% za koncentričnu (Babault i sur., 2001). Ovi nalazi u skladu su s literaturom koja nam otkriva da se mogu angažirati gotovo sve motoričke jedinice tijekom maksimalne izometrijske radnje (Gandevia i McKenzie, 1988). Dakle, Ono što možemo zaključiti je da izometrijski akcijski trening može poboljšati našu sposobnost regrutiranja motornih jedinica tijekom maksimalne kontrakcije. Stoga bi uključivanje ove vrste treninga u naš režim moglo poboljšati našu sposobnost aktiviranja motoričkih jedinica, čak i u dinamičnim radnjama. Dugoročno, ovaj poboljšani neuronski pogon mogao bi uvelike povećati nečiji potencijal proizvodnje snage (Thibaudeau, 2006).

U prošlosti su izometrijske vježbe opisivane kao tehnika koju bi trebali koristiti samo napredni dizači. Jedan od najvećih nedostataka dizača niže klase je nemogućnost stvaranja maksimalne intramuskularne napetosti tijekom koncentrične kontrakcije. Izometrijske vježbe stoga se mogu koristiti za učenje kako proizvesti ovu visoku razinu napetosti, budući da zahtijevaju manje motoričkih vještina od odgovarajuće dinamičke radnje. Iz tog razloga izometrijske vježbe mogu poslužiti kao vrlo korisne za sve kategorije sportaša (Thibaudeau, 2006).

4.2. Izometrijski trening kao stimulus za povećanje snage

Dugo je poznato da izometrijski akcijski trening (IAT) može dovesti do značajnog povećanja snage. U nedavnom eksperimentu, utvrđeno je povećanje snage od 14-40% u razdoblju od 10 tjedana korištenjem izometrijskog akcijskog treninga (Kanehisa i sur., 2002). Međutim, važno je razumjeti da se dobitak snage izometrijskim načinom rada uglavnom događa u zglobnim kutovima u kojima se trening izvodio, iako postoji pozitivan prijenos od 20 do 50% snage dobivene u rasponu od 20 stupnjeva (radni kut +/- 20 stupnjeva) (Thibaudeau, 2006). Neki bi ljudi ovo ograničenje mogli vidjeti kao negativan aspekt izometrijskog treninga. Međutim, neki autori isto navode kao dobrobit jer vam omogućuje da ispoljite veću razinu snage u određenoj točki pokreta, dopuštajući sportašu da stimulira više povećanja snage u točki gdje mu je najpotrebnija (točka zapinjanja). Mogu se zabilježiti sljedeće tri prednosti izometrijskog treninga:

1. maksimalna intramuskularna napetost se kod dinamičkih vježbi postiže samo kratko (najviše zbog činjenice da otpor ima komponente brzine i ubrzanja), dok kod izometrijskih vježbi tu maksimalnu napetost možete održati dulje vrijeme. Na primjer, umjesto održavanja maksimalne intramuskularne napetosti od 0,25 do 0,5 sekundi u koncentričnom dijelu dinamičkog pokreta, možete je održati oko 3-6 sekundi tijekom izometrijske vježbe. Na snagu uvelike utječe ukupno vrijeme provedeno pod maksimalnom napetošću. Ako možete dodati 10-20 sekundi maksimalne intramuskularne napetosti po sesiji, tada povećavate svoj potencijal za povećanje snage.
2. izometrijske vježbe mogu vam pomoći da poboljšate snagu u točno određenom dijelu pokreta vježbe. To se može pokazati vrlo vrijednim za prevladavanje platoa kritične točke pokreta.
3. izometrijske vježbe nisu "energetski skupe", što znači da ne trošite puno energije radeći izometrijske vježbe. Tako možete iskoristiti prednosti IAT-a bez ometanja ostatka planiranog treninga.

4.3. Izometrijski trening kao stimulus za mišićni rast

Dok su prva izvješća o izometrijskom akcijskom treningu hipotezirala da ova vrsta treninga neće dovesti do značajnih povećanja mišićne mase zbog odsutnosti rada, nedavna otkrića doista zaključuju da izometrijski režim treninga može dovesti do povećanja mišićne veličine. Studija koju su proveli Kanehisa i sur. (2002) pronašli su prosječno poboljšanje površine (veličine) mišićnog presjeka od 12,4% za trening maksimalne izometrijske kontrakcije i od 5,3% za izometrijski trening pri 60% maksimalne kontrakcije nakon perioda treninga od 10 tjedana. Autori su povećanje veličine mišića pripisali metaboličkim zahtjevima i endokrinim aktivnostima, a ne mehaničkom stresu i neuromuskularnoj kontroli (Thibaudeau, 2006).

4.4. Zaključci o izometrijskom treningu

Važno je napomenuti da izometrijski akcijski trening još uvijek ima ograničenu primjenu za sportaše ili bodybuildere. Da, može pomoći u povećanju snage i veličine. Ali bez istovremenog dinamičkog programa (popuštanje i savladavanje) rezultati će biti spori. Zapravo, neki su treneri primijetili da rezultati izometrijskih vježbi prestaju nakon 6-8 tjedana korištenja. Iako izometrijski akcijski trening može biti vrlo koristan za rad na slabim točkama ili poboljšanje sposobnosti sportaša da aktivira motoričke jedinice, trebao bi se koristiti samo u kratkim vremenskim razdobljima kada je napredak usporen ili kada je potrebno brzo poboljšanje snage. Izometrijski akcijski trening također može biti koristan tijekom razdoblja smanjenog volumena treninga, tj. kada netko mora smanjiti opterećenje treninga bilo zbog simptoma umora ili vremenskih ograničenja, izometrijski rad može spriječiti gubitak mišića i snage (Thibaudeau, 2006).

4.5. Primjena izometrijskog treninga

U nastavku su opisane preporuke primjene izometrijskog treninga:

1. kontrahirati mišiće što jače možete; da biste bili učinkoviti, morate postići i održavati razinu maksimalne intramuskularne napetosti.
2. trajanje akcije (ili "seta") treba biti 1-10 sekundi, 3-6 je najbolje u većini slučajeva.
3. koristiti najmanje 3 položaja po pokretu, ali čak 6 položaja možete koristiti za maksimalne rezultate (ako vrijeme i oprema dopuštaju), odabrati ključne položaje ekvivalentne dinamičke vježbe ako želite pozitivan prijenos rezultata u snazi.
4. dovoljno odmora između serija kako bi se omogućilo stvaranje maksimalne napetosti svaki put.

5. izometrijske vježbe koristiti istovremeno (u istom treningu) sa sličnom dinamičkom vježbom, preporuka one eksplozivne.
6. za optimalne rezultate, izometrijski trening trebao bi biti oko 10% ukupnog volumena treninga snage (izračunato kao broj sekundi pod napetošću).
7. izometrijske vježbe je optimalnije koristiti na kraju treninga (Brunner i Tabachnik, 1990.) S druge strane, izometrijski akcijski trening može koristiti prvi u vježbi kako bi se olakšale naknadne izvedbe vježbi jakosti i snage (Thibaudeau, 2006).

4.6. Funkcionalna izometrija

Izometrijski trening odnosi se na naprezanje snage bez pokreta. Najklasičniji oblik izometrijskog treninga je guranje ili povlačenje nepomičnog tereta. Budući da tijekom izometrijske radnje angažirate više motoričkih jedinica nego tijekom koncentrične radnje, može se raspravljati o tome da izometrijske vježbe mogu dovesti do veće stimulacije snage. Postoji nekoliko poteškoća u odrađivanju potpuno izometrijskog treninga kao što su nemogućnost kvantificiranja napretka i kutna specifičnost.

Funkcionalna izometrija drugačija je od prethodnog treninga, jer iako se i dalje djeluje silom bez pokreta istovremeno se i podiže teret. Trening započinje šipkom na određenoj visini koja se podiže 5-10 cm te se taj položaj zadržava do 10 sekundi. Težina se nastavlja dodavati do mogućnosti korisnika te se taj položaj zadržava najmanje šest sekundi. Na ovaj način se podižu utege, čime je moguće kvantificirati napredak. Kao i s izometrijskim treningom, problem specifičnosti zglobnog kuta i dalje je prisutan. Preporuča se korištenje sljedećih tri položaja radeći na cijelom rasponu pokreta odabranog pokreta;

1. nekoliko centimetara nakon početne pozicije
2. kritična točka
3. nekoliko centimetara od konačne pozicije

Ova vrsta izometrije može se koristiti za nekoliko vježbi dizanja utega. Posebno je učinkovita za poboljšanje potiska s ravne klupe, mrtvog dizanja i potiska iznad glave (Thibaudeau, 2006).

4.7. Stato-dinamička izometrija

Vježba ne mora biti čista izometrija kako bi se dobile njene prednosti. Dobra varijanta je korištenje statične radnje kao dijela dinamičkog pokreta. Dizajući će uključivati vježbe u kojima se koristi pauza u određenim položajima tijekom izvođenja pokreta. Na primjer, sportaš će čučnuti do pola, zastati 3-15 sekundi kada su koljena savijena pod 90 stupnjeva, zatim

završiti spuštanje i podići uteg. Ovo se čini kao vrlo dobar način rada, pogotovo ako se pauza izvodi na najslabijem dijelu dizanja (kritična točka). Na taj način, ne samo da se jača najslabija kariku u lancu, već se i razvija sposobnost borbe protiv inercije i ubrzavanja vanjskog opterećenja s te slabije pozicije. Ova metoda može se koristiti za sve vježbe, ali je najkorisnija za vježbe u kojima postoji značajnija kritična točka i veliki opseg pokreta.

Primjeri treninga stato-dinamičke metode; izometrijska i izobalistička metoda. Ova vrsta treninga odnosi se na prethodnu radnju savladavanja (koncentrična/miometrijska kontrakcija) s izometrijskom akcijom. Izometrijska radnja trebala bi se odvijati na kritičnoj točki vježbe i trebala bi se zadržati od 2 do 15 sekundi, ovisno o prirodi vježbe. Razlika između izometrije i izobalizma leži u prirodi savladajuće akcije. U izometrijskoj vježbi teret se podiže što je brže moguće, ali teret je relativno težak pa se ne kreće uvijek jako brzo. U izobalističkoj vježbi morate projicirati otpor u zrak (tako da otpor treba biti lagan). Prednosti ove vrste vježbanja su:

- a) jačanje kritične točke u vježbi (slično kao kod izometrijskih vježbi) uz integriranje ovog poboljšanja u dinamički pokret
- b) jačanje početnog dijela podizanja tereta
- c) poboljšanje sposobnosti za proizvodnju maksimalne snage od nulte brzine (Thibaudeau, 2006).

4.8. Izometrijske metode treninga

Izometrijske metode odnose se na stvaranje mišićne napetosti bez pokreta. S ovom metodom se u osnovi borite protiv otpora bez mijenjanja njegovog položaja. Primjena izometrijske metode treninga;

- 1) izometrija maksimalnog trajanja (ekvivalentna metodi ponavljajućeg napora)
- 2) izometrija maksimalnog intenziteta (ekvivalentna metodi maksimalnog napora)
- 3) balistička izometrija (ekvivalentna metodi dinamičkog napora)

Postoji i mješovita izometrija (poznata i kao funkcionalna izometrija), koja je već ranije spomenuta u tekstu.

Postoje dvije vrste izometrijskih vježbi: izometrija svladavanja otpora (*eng. overcoming-isometric*) i izometrija popuštanja (*eng. yielding-isometric*). Stvarni vanjski ishod vježbe je isti, odnosno nema nikakvih pokreta. Međutim, namjera se tijekom vježbe mijenja. U izometriji svladavanja otpora izvode se vježbe guranja ili povlačenja protiv nepomičnog otpora. S druge strane izometrija popuštanja odnosi se na vježbe zadržavanja otpora. Važno je napomenu kako obje vrste izometrije neće imati isti učinak. Štoviše, neuralni obrasci korišteni

u oba slučaja bit će različiti. Izometrija svladavanja može imati veći utjecaj na koncentričnu jakost nego izometrija popuštanja (Thibaudeau, 2006).

4.8.1. Izometrija maksimalnog trajanja (ponavljajući napor)

Izometrijskim vježbama maksimalnog trajanja izvode se vježbe guranja ili držanja submaksimalnog opterećenja što je duže moguće, što dovodi do otkazivanja mišića. Za maksimalan učinak koriste se setovi u rasponu od 20 do 60 sekundi. Učinak ove vrste treninga na mišićnu masu može biti velik jer postoji vrlo značajan stimulans rasta na svim mišićnim vlaknima. Iako, mnoge studije ne izvješćuju o velikom rastu mišića od izometrijskog treninga. Ovo trajanje napora, iako dovoljno za povećanje snage, nije dovoljno da izazove hipertrofične promjene u mišićima. Međutim, kada se koriste setovi u trajanju od 20-60 sekundi, poticaj rasta je značajan. Ovom metodom može se koristiti i izometrija svladavanja (*overcoming-isometric*) i izometrija popuštanja (*yielding-isometric*). Kao što je spomenuto ranije u tekstu u izometrijskom treningu koriste se najmanje tri položaja po vježbi kako bi se postignuo napredak u cijelom rasponu pokreta. U nastavku su opisani parametri i karakteristike ove metode:

- a) subjektivni osjećaj opterećenja: vrlo visok
- b) učinak na strukturne elemente (hipertrofija): visok do vrlo visok
- c) utjecaj na funkcionalne elemente (jakost, snaga): nizak
- d) opterećenje: 50-80% koncentričnog maksimuma ako se koristi izometrija popuštanja (*yielding-isometric*)
- e) broj ponavljanja po seriji: 20-60 sekundi po seriji
- f) broj serija po vježbi: 2-4 po poziciji / 3 pozicije po vježbi
- g) broj vježbi: 1
- h) odmor između serija: 60-90 sekundi između serija (Thibaudeau, 2006).

4.8.2. Izometrija maksimalnog intenziteta (maksimalni napor)

Izometrijska metoda maksimalnog intenziteta povezana je s metodom koncentričnog maksimalnog napora. U ovom slučaju pokušava se održati maksimalna izometrijska akcija u trajanju od tri do šest sekundi. Ova vrsta izometrijskog treninga nema značajan utjecaj na mišićnu masu, no može povećati gustoću mišića i miogeni tonus (također nazvan "tonus" ili čvrstoća/tvrdoća mišića). Glavni učinak ove vrste treninga je maksimalni razvoj snage, koji se događa posebno u kutu zgloba koji se trenira. Iako je izometrija svladavanja najbolja za ovu metodu i dalje se može koristiti metoda popuštanja. U ovom slučaju biste koristili opterećenje od 100 do 110% svog maksimuma. Navedeni su parametri i karakteristike ove metode;

- a) subjektivni osjećaj opterećenja: umjeren
- b) utjecaj na strukturne elemente (hipertrofija): nizak
- c) utjecaj na funkcionalne elemente (jakost, snaga): visoko
- d) opterećenje: 100-110% koncentričnog maksimuma ako se koristi izometrija popuštanja (yielding-isometric)
- e) broj ponavljanja po seriji: 3-6 sekundi po seriji
- f) broj serija po vježbi: 3-6 po poziciji / 3+ pozicije po vježbi
- g) broj vježbi: 1
- h) odmor između serija: 30-90 sekundi između serija (Thibaudeau, 2006).

4.8.3. Balistička izometrija (metoda dinamičkog napora)

Veoma je važno razlikovati izobalistički (ili statobalistički) trening s balističkom izometrijskom metodom. Izobalistička je metoda mješovitog režima u kojoj eksplozivnoj dinamičkoj akciji prethodi izometrijska pauza. Balistička izometrijska metoda odnosi se na guranje protiv nepomičnog otpora u vrlo kratkom vremenskom razdoblju (1-2 sekunde) dok se pokušava postići maksimalna izlazna sila što je brže moguće (u osnovi pokušavajući prijeći s 0% sile na 100% sile u 1 ili 2 sekunde). U ovom slučaju se ne može koristiti metoda izometrije popuštanja jer ne odgovara prirodi vježbe. Priroda je proizvesti maksimalnu izometrijsku napetost u što je moguće kraćem vremenu. Ova vrsta vježbe posebno je dobra za razvoj početne snage i vrlo je korisna za svakog sportaša koji se bavi sportom u kojem su uključeni eksplozivni startovi iz statične pozicije. U nastavku su navedene karakteristike i parametri ove metode;

- a) subjektivni osjećaj opterećenja: nizak
- b) utjecaj na strukturne elemente (hipertrofija): vrlo nizak
- c) utjecaj na funkcionalne elemente (jakost, snaga): visoko
- d) opterećenje: nije poznato
- e) broj ponavljanja po seriji: 1-2 sekunde po seriji
- f) broj serija po vježbi: 5-10 po poziciji / 3+ pozicije po vježbi
- g) broj vježbi: 1
- h) odmor između serija: 10-30 sekundi između serija (Thibaudeau, 2006).

5. IZOMETRIJSKI TRENING ZA MIŠIĆE POTKOLJENICE

U nastavku će biti prikazane vrste izometrijskih vježbi za mišiće potkoljenice, njihov opis te slikovni prikaz.

1. Vrsta izometrije: *Yielding*

Opis vježbe: iz raskoračnog stava podići se u uspon, trup uspravan, kralježnica u neutralnoj poziciji, zadržati poziciju 10 sekundi (Slika 6).



Slika 6. Izdržaj u usponu za m.gastricnemius

2. Vrsta izometrije: *Yielding*

Opis vježbe: iz raskoračnog stava podići se u pogrčeni uspon, trup u blagom pretklonu, kralježnica u neutralnoj poziciji, zadržati poziciju 10 sekundi (Slika 7).



Slika 7. Izdržaj u pogrčenom usponu za m.soleus

3. Vrsta izometrije: *Yielding*

Opis vježbe: iz raskoračnog stava iskoračiti jednom nogom prema naprijed, prenijeti težinu tijela na prednji dio stopala, trup u blagom pretklonu, kralježnica u neutralnoj poziciji, zadržati poziciju 10 sekundi (Slika 8).



Slika 8. Izdržaj u poziciji visokog starta

4. Vrsta izometrije: *Yielding*

Opis vježbe: iz sunožnog stava na malom povišenju podići se na pola uspona, prenijeti težinu tijela na prednji dio stopala, trup uspravan, kralježnica u neutralnoj poziciji, zadržati poziciju 10 sekundi (Slika 9).



Slika 6. Izdržaj na malom povišenju za m.gastrocnemius

5. Vrsta izometrije: *Yielding*

Opis vježbe: iz sunožnog stava na malom povišenju spustiti se u polučučanj, stopala podići na pola uspona, prenijeti težinu tijela na prednji dio stopala, trup u blagom pretklonu, kralježnica u neutralnoj poziciji, zadržati poziciju 10 sekundi (Slika 10).



Slika 10. Izdržaj na malom povišenju za m.soleus

6. Vrsta izometrije: *Overcoming*

Opis vježbe: iz pozicije sjeda gotovo opružene noge stabilizirati za nepomični objekt i iz pozicije dorzalne fleksije povlačiti stopalima nepomični objekt prema sebi, povlačiti 5 sekundi (Slika 11).



Slika 7. Povlačenje nepomičnog objekta u poziciji dorzalne fleksije za m. tibialis anterior

7. Vrsta izometrije: *Yielding*

Opis vježbe: iz sunožnog stava nasloniti se na zid, trup uspravan, kralježnica u neutralnoj poziciji, pružene noge postaviti ispred tijela sa stopalima u dorzalnoj fleksiji i zadržati poziciju 10 sekundi (Slika 12).



Slika 8. Izdržaj u poziciji dorzalne fleksije za *m.tibialis anterior*

8. Vrsta izometrije: *Overcoming*

Opis vježbe: iz stojeće pozicije odmaknuti od zida za 4 stope, stražnju nogu pružimo i postavimo na prste, prednja noga je podignuta malo iznad tla, trup je uspravan u produžetku stražnje noge, kralježnica u neutralnoj poziciji, pruženim rukama gurati zid, gurati 5 sekundi (Slika 13).



Slika 9. Guranje nepomičnog objekta pruženom nogom za *m.gastrocnemius*

9. Vrsta izometrije: *Overcoming*

Opis vježbe: iz stojeće pozicije odmaknuti od zida za 4 stope, stražnju nogu pogrčimo i postavimo na prste, prednja noga je podignuta malo iznad tla, trup je uspravan u produžetku stražnje noge, kralježnica u neutralnoj poziciji, pruženim rukama gurati zid, gurati 5 sekundi (Slika 14).



Slika 10. Guranje nepomičnog objekta pogrčenom nogom za m. soleus

10. Vrsta izometrije: *Yielding*

Opis vježbe: iz sjeda provući elastičnu gumu ispod prednjeg dijela stopala jedne noge, istu nogu opružiti, stopalo postaviti u poziciju plantarne fleksije, zadržati poziciju 10 sekundi (Slika 15).



Slika 11. Izdržaj u plantarnoj fleksiji pomoću elastične gume za m. gastrocnemius

11. Vrsta izometrije: *Yielding*

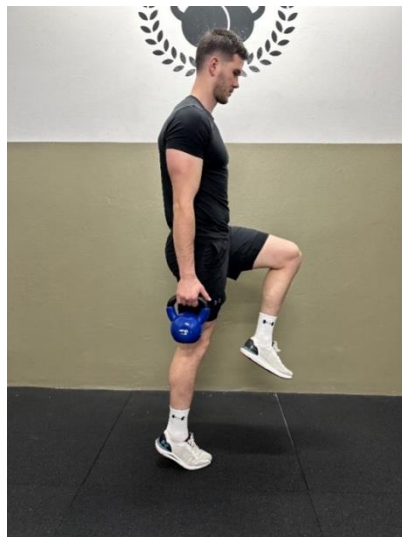
Opis vježbe: elastičnu gumu zavezati oko nepomičnog objekta, iz pozicije sjeda postaviti elastičnu gumu na prednji dio stopala jedne noge, istu nogu opružiti, stopalo postaviti u poziciju dorzalne fleksije, zadržati poziciju 10 sekundi (Slika 16).



Slika 12. Izdržaj u dorzalnoj fleksiji pomoću elastične gume za m.tibialis anterior

12. Vrsta izometrije: Yielding

Opis vježbe: iz stojećeg stava podići se u uspon jednom nogom, druga noga je podignuta iznad tla, girju držati u ruci noge u usponu, trup uspravan, kralježnica u neutralnoj poziciji, zadržati poziciju 10 sekundi (Slika 17).



Slika 13. Izdržaj jednom nogom u usponu s girjom u ruci za m.gastrocnemius

13. Vrsta izometrije: Yielding

Opis vježbe: iz stojećeg stava podići se u uspon pogrčenom jednom nogom, druga noga je podignuta iznad tla, girju držati u ruci noge u usponu, trup u blagom pretklonu, kralježnica u neutralnoj poziciji, zadržati poziciju 10 sekundi (Slika 18).



Slika 14. Izdržaj jednom nogom u pogrčenom usponu s girjom u ruci za m.soleus

14. Vrsta izometrije: *Overcoming*

Opis vježbe: Iz stojeće pozicije sa šipkom na leđima šipku postaviti ispod nepomičnog objekta (klinovi na postolju za čučanj), trup u blagom pretklonu, kralježnica u neutralnoj poziciji, sa stopalima u usponu i gotovo pruženim nogama gurati nepomični objekt, gurati 5 sekundi (Slika 19).



Slika 15. Guranje nepomičnog objekta šipkom pruženim nogama za m.gastrocnemius

15. Vrsta izometrije: *Overcoming*

Opis vježbe: Iz stojeće pozicije sa šipkom na leđima šipku postaviti ispod nepomičnog objekta (klinovi na postolju za čučanj), trup u blagom pretklonu, kralježnica u neutralnoj poziciji, sa stopalima u usponu i pogrčenim nogama gurati nepomični objekt, gurati 5 sekundi (Slika 20).



Slika 16. Guranje nepomičnog objekta šipkom pogrčenim nogama za m.soleus

16. Vrsta izometrije: *Overcoming*

Opis vježbe: iz stojeće pozicije sa šipkom na leđima šipku postaviti ispod nepomičnog objekta (klinovi na postolju za čučanj), iskoračiti jednom nogom prema naprijed, prenijeti težinu tijela na prednji dio stopala, trup u blagom pretklonu, kralježnica u neutralnoj poziciji gurati nepomični objekt, gurati 5 sekundi (Slika 21).



Slika 17. Guranje nepomičnog objekta šipkom iz pozicije visokog starta

17. Vrsta izometrije: *Overcoming*

Opis vježbe: Na trap šipku postaviti teret koji je nemoguće podići iz pozicije visokog starta, iz stojeće pozicije spustiti se u poziciju visokog starta (iskoračiti jednom nogom prema naprijed, prenijeti težinu tijela na prednji dio stopala), trup u pretklonu, kralježnica u neutralnoj poziciji, rukama čvrsto primiti šipku i vući nepomični objekt, vući 5 sekundi (Slika 22).



Slika 18. Povlačenje nepomičnog objekta (trap šipka) iz pozicije visokog starta

6. ZAKLJUČAK

Ovim istraživanjem proučavana je učinkovitost izometrijskih mišićnih kontrakcija u kontekstu razvoja jakosti i snage i prevencije ozljeda mišića potkoljenice. Kroz teorijsku elaboraciju i pregled relevantnih studija, rad uspješno potvrđuje hipotezu o značajnoj ulozi izometrijskog treninga u kondicijskoj pripremi. Dosadašnja istraživanja jasno ukazuju na pozitivne učinke izometrijskih vježbi na povećanje mišićne jakosti i snage, smanjenje rizika od ozljeda i poboljšanje ukupne fizičke spremnosti pojedinca. Osim toga, rad naglašava važnost pravilne implementacije i prilagodbe izometrijskih vježbi individualnim potrebama sportaša, ističući potrebu za detaljnom analizom biomehaničkih karakteristika i fizioloških odgovora na trening. Takav pristup omogućava maksimiziranje koristi od treninga uz minimiziranje rizika od ozljeda, što je od ključne važnosti za dugoročni uspjeh u sportu. Budućim istraživanjima trebalo bi se dodatno istražiti specifične aspekte izometrijskog treninga, uključujući optimalno

trajanje kontrakcija, frekvenciju treninga i integraciju s drugim vrstama treninga za razvoj jakosti i snage. S obzirom na potencijalne koristi izometrijskog treninga, ne samo u sportu, nego i u općoj populaciji za prevenciju ozljeda i poboljšanje zdravlja, rad postavlja temelje za širu primjenu ovih metoda u praksi. Nadalje, ovo istraživanje ističe i potencijal izometrijskih vježbi kao važan alat u promociji općeg zdravlja i opće dobrobiti. Kroz prilagodbu intenziteta i trajanja izometrijskih vježbi, moguće je osmisliti programe treninga koji su pristupačni i primjenjivi na široku populaciju, od sportaša do rekreativaca i osoba koje se oporavljaju od ozljeda. Zaključno, rad potvrđuje važnost izometrijskog treninga kao ključnog elementa u razvoju jakosti i prevenciji ozljeda mišića potkoljenice, istovremeno ukazujući na potrebu za njegovom daljnjom analizom i integracijom u različite trening programske strukture. Ovi nalazi imaju značajne implikacije za trenere, sportaše, fizioterapeute i stručnjake za kondicijsku pripremu, nudeći im vrijedne uvide kako efektivno koristiti izometrijske vježbe za unapređenje performansi i zdravlja.

7. LITERATURA

- Anderson, F. C. i Pandy, M. G. (1993). Storage and utilization of elastic strain energy during jumping. *Journal of biomechanics*, 26(12), 1413–1427. [https://doi.org/10.1016/0021-9290\(93\)90092-s](https://doi.org/10.1016/0021-9290(93)90092-s)
- Babault, N., Pousson, M., Ballay, Y. i Van Hoecke, J. (2001). Activation of human quadriceps femoris during isometric, concentric, and eccentric contractions. *Journal of applied physiology* (Bethesda, Md. : 1985), 91(6), 2628–2634. <https://doi.org/10.1152/jappl.2001.91.6.2628>
- Biewener, A. A. i Roberts, T. J. (2000). Muscle and tendon contributions to force, work, and elastic energy savings: a comparative perspective. *Exercise and sport sciences reviews*, 28(3), 99–107.

- Brunner, R. i Tabachnik, B. (1990). Soviet training and recovery methods. (*No Title*).
- Cavagna, G. A. i Kaneko, M. (1977). Mechanical work and efficiency in level walking and running. *The Journal of physiology*, 268(2), 467–481. <https://doi.org/10.1113/jphysiol.1977.sp011866>
- Cavagna, G. A., Komarek, L. i Mazzoleni, S. (1971). The mechanics of sprint running. *The Journal of physiology*, 217(3), 709–721. <https://doi.org/10.1113/jphysiol.1971.sp009595>
- Dadić, M., Vajdić, D., Plevnik, A. i Serdarušić, I. (2020). Izometrijske mišićne kontrakcije neizostavni dio treninga jakosti i snage // 18. godišnja međunarodna konferencija "Kondicijska priprema sportaša 2020." Zagreb, Hrvatska, 21.02.2020-21.02.2020.
- Debaere, S., Delecluse, C., Aerenhouts, D., Hagman, F. i Jonkers, I. (2015). Control of propulsion and body lift during the first two stances of sprint running: a simulation study. *Journal of sports sciences*, 33(19), 2016–2024. <https://doi.org/10.1080/02640414.2015.1026375>
- Dietz, C., Peterson, B. (2012). *Triphasic training: A Szstematic Approach of Elite Speed and Explosive Strenght Performance*. Bye Dietz Sport Enterprise.
- Dorn, T. W., Schache, A. G. i Pandy, M. G. (2012). Muscular strategy shift in human running: dependence of running speed on hip and ankle muscle performance. *The Journal of experimental biology*, 215(Pt 11), 1944–1956. <https://doi.org/10.1242/jeb.064527>
- Enoka R. M. (1996). Eccentric contractions require unique activation strategies by the nervous system. *Journal of applied physiology (Bethesda, Md. : 1985)*, 81(6), 2339–2346. <https://doi.org/10.1152/jappl.1996.81.6.2339>
- Friederich J.A. i Brand R.A. (1990). Muscle fiber architecture in the human lower limb. *J. Biomech.* **23**, 91–95. (doi:10.1016/0021-9290(90)90373-B)
- Gandevia, S. C. i McKenzie, D. K. (1988). Activation of human muscles at short muscle lengths during maximal static efforts. *The Journal of physiology*, 407(1), 599-613.
- Garner, J. C., Blackburn, T., Weimar, W. i Campbell, B. (2008). Comparison of electromyographic activity during eccentrically versus concentrically loaded isometric contractions. *Journal of electromyography and kinesiology : official journal of the*

- International Society of Electrophysiological Kinesiology*, 18(3), 466–471.
<https://doi.org/10.1016/j.jelekin.2006.11.006>
- Hamner, S. R. i Delp, S. L. (2013). Muscle contributions to fore-aft and vertical body mass center accelerations over a range of running speeds. *Journal of biomechanics*, 46(4), 780–787. <https://doi.org/10.1016/j.jbiomech.2012.11.024>
- Hof, A. L., Van Zandwijk, J. P. i Bobbert, M. F. (2002). Mechanics of human triceps surae muscle in walking, running and jumping. *Acta physiologica Scandinavica*, 174(1), 17–30. <https://doi.org/10.1046/j.1365-201x.2002.00917.x>
- Lai, A., Lichtwark, G. A., Schache, A. G., Lin, Y. C., Brown, N. A. i Pandy, M. G. (2015). In vivo behavior of the human soleus muscle with increasing walking and running speeds. *Journal of applied physiology (Bethesda, Md. : 1985)*, 118(10), 1266–1275. <https://doi.org/10.1152/jappphysiol.00128.2015>
- Kanehisa, H., Nagareda, H., Kawakami, Y., Akima, H., Masani, K., Kouzaki, M. i Fukunaga, T. (2002). Effects of equivolume isometric training programs comprising medium or high resistance on muscle size and strength. *European journal of applied physiology*, 87, 112–119.
- Ker, R. F., Bennett, M. B., Bibby, S. R., Kester, R. C. i Alexander, R. M. (1987). The spring in the arch of the human foot. *Nature*, 325(7000), 147–149. <https://doi.org/10.1038/325147a0>
- Keros, P. i Pećina, M. (2006). Funkcijska anatomija lokomotornog sustava, Zagreb: Naknada Ljevak d.o.o. 2006.
- Krmpotić-Nemanić, J. i Marušić, A. (2007). Anatomija čovjeka, 2. izd. Zagreb: Medicinska naklada, 342–348.
- Lai, A., Schache, A. G., Brown, N. A. i Pandy, M. G. (2016). Human ankle plantar flexor muscle-tendon mechanics and energetics during maximum acceleration sprinting. *Journal of the Royal Society, Interface*, 13(121), 20160391. <https://doi.org/10.1098/rsif.2016.0391>
- Lai, A., Schache, A. G., Lin, Y. C. i Pandy, M. G. (2014). Tendon elastic strain energy in the human ankle plantar-flexors and its role with increased running speed. *The Journal of experimental biology*, 217(Pt 17), 3159–3168. <https://doi.org/10.1242/jeb.100826>

- Lichtwark, G. A., Bougoulias, K. i Wilson, A. M. (2007). Muscle fascicle and series elastic element length changes along the length of the human gastrocnemius during walking and running. *Journal of biomechanics*, 40(1), 157–164. <https://doi.org/10.1016/j.jbiomech.2005.10.035>
- Rio, E., van Ark, M., Docking, S., Moseley, G. L., Kidgell, D., Gaida, J. E., van den Akker-Scheek, I., Zwerver, J. i Cook, J. (2017). Isometric Contractions Are More Analgesic Than Isotonic Contractions for Patellar Tendon Pain: An In-Season Randomized Clinical Trial. *Clinical journal of sport medicine : official journal of the Canadian Academy of Sport Medicine*, 27(3), 253–259. <https://doi.org/10.1097/JSM.0000000000000364>
- Roberts T. J. (2002). The integrated function of muscles and tendons during locomotion. *Comparative biochemistry and physiology. Part A, Molecular & integrative physiology*, 133(4), 1087–1099. [https://doi.org/10.1016/s1095-6433\(02\)00244-1](https://doi.org/10.1016/s1095-6433(02)00244-1)
- Roberts, T. J. i Azizi, E. (2011). Flexible mechanisms: the diverse roles of biological springs in vertebrate movement. *The Journal of experimental biology*, 214(Pt 3), 353–361. <https://doi.org/10.1242/jeb.038588>
- Roberts, T. J., Marsh, R. L., Weyand, P. G. i Taylor, C. R. (1997). Muscular force in running turkeys: the economy of minimizing work. *Science (New York, N.Y.)*, 275(5303), 1113–1115. <https://doi.org/10.1126/science.275.5303.1113>
- Roberts, T. J. i Scales, J. A. (2002). Mechanical power output during running accelerations in wild turkeys. *The Journal of experimental biology*, 205(Pt 10), 1485–1494. <https://doi.org/10.1242/jeb.205.10.1485>
- Semmler, J. G., Kornatz, K. W., Dinunno, D. V., Zhou, S. i Enoka, R. M. (2002). Motor unit synchronisation is enhanced during slow lengthening contractions of a hand muscle. *The Journal of physiology*, 545(2), 681–695. <https://doi.org/10.1113/jphysiol.2002.026948>
- Schaefer, L. V. i Bittmann, F. N. (2017). Are there two forms of isometric muscle action? Results of the experimental study support a distinction between a holding and a pushing isometric muscle function. *BMC sports science, medicine & rehabilitation*, 9, 11. <https://doi.org/10.1186/s13102-017-0075-z>

Thibaudeau, C. i Schwartz, T. (2007). *Theory and application of modern strength and power methods*. F Lepine Pub..