

Učinek visokointenzivnega utrujanja na raven hotene aktivacije ekstenzorih mišic kolena pri dvigalcih uteži in netreniranih osebah

The effects of high-intensity fatigue on the level of voluntary activation of knee extensors muscles in strength athletes and untrained individuals

Matej Ipavec¹, Maarten de Wolff¹, Alan Kacin¹

IZVLEČEK

Uvod: Olimpijsko dviganje uteži in troboj moči sta športa, ki zahtevata hitro in silovito aktivacijo mišic celega telesa, zlasti štiriglave stegenske mišice. Namen raziskave je bil ovrednotiti učinek utrujanja na raven hotene aktivacije štiriglave stegenske mišice pri športnikih moči in netreniranih osebah. **Metode:** V raziskavo je bilo vključenih 17 športnikov moči ($25,6 \pm 4,9$ leta) in 16 netreniranih posameznikov ($23,9 \pm 4,3$ leta) moškega spola. Preiskovancem smo izmerili raven hotene aktivacije (RA) mišice s tehniko interpoliranega električnega skrčka med testom največje hotene izometrične kontrakcije (MVIC), ki smo jo izvedli pred in po protokolu utrujanja mišice z maksimalnimi koncentrično-ekscentričnimi kontrakcijami. **Rezultati:** Športniki moči so pred utrujanjem in po njem dosegli večji navor MVIC kot netrenirani posamezniki ($p < 0,001$). Največji padec navora MVIC je nastopil takoj po protokolu utrujanja in je bil pri športnikih moči večji kot pri netreniranih ($38 \pm 7\%$ proti $32 \pm 8\%$; $p = 0,013$). Med skupinama pred utrujanjem ni bilo statistično značilne razlike v RA ($96,5 \pm 3,2\%$ proti $96,9 \pm 3,0\%$; $p = 0,743$). Mešani model ANOVA je za RA pokazal statistično značilen učinek časa ($p = 0,034$) in skupine ($p = 0,046$), ne pa tudi njune interakcije ($p = 0,209$). **Zaključki:** Visokointenzivno utrujanje je pri obeh skupinah povzročilo izrazit upad navora MVIC ekstenzorjev kolena in manjšo spremembo RA, brez razlik v časovni dinamiki sprememb RA med športniki moči in netreniranimi posamezniki. Tudi večjega navora MVIC pri športnikih moči ni mogoče pojasniti z višjo izhodiščno ravnjo hotene aktivacije mišic.

Ključne besede: učinek visokointenzivnega utrujanja, raven aktivacije, maksimalna hotena izometrična kontrakcija, športniki moči, ekstenzorji kolena.

ABSTRACT

Introduction: Olympic weightlifting and powerlifting are sports that require rapid and forceful activation of the whole-body musculature, particularly the quadriceps femoris. The aim of the study was to evaluate the effect of fatigue on the level of voluntary activation of the quadriceps femoris in strength athletes and untrained individuals. **Methods:** Seventeen male strength athletes (25.6 ± 4.9 years) and 16 untrained men (23.9 ± 4.3 years) participated in the study. Quadriceps voluntary activation level (AL) was assessed using the interpolated twitch technique during maximal voluntary isometric contraction (MVIC), which was performed before and after a fatiguing protocol with maximal concentric-eccentric contractions. **Results:** At baseline and after the fatigue protocol the strength athletes generated significantly greater MVIC torque than untrained individuals ($p < 0.001$). The greatest relative decline in MVIC torque occurred immediately after the fatigue protocol and was greater in strength athletes than untrained individuals ($38 \pm 7\%$ vs. $32 \pm 8\%$; $p = 0.013$). No significant between-group difference in AL was observed before fatigue ($96.5 \pm 3.2\%$ vs. $96.9 \pm 3.0\%$; $p = 0.743$). Mixed-model ANOVA for AL showed a significant effect of time ($p = 0.034$) and group ($p = 0.046$), but no significant time $\times$ group interaction ($p = 0.209$). **Conclusion:** Fatigue induced marked decline in MVIC torque of knee extensors and minor changes in AL, without any difference in time course of AL changes between strength athletes and untrained individuals. The greater MVIC torque in strength athletes also cannot be explained by a higher level of voluntary muscle activation.

Key words: high-intensity fatigue, voluntary activation level, maximal voluntary isometric contraction, strength athletes, knee extensors.

¹ Univerza v Ljubljani, Zdravstvena fakulteta, Ljubljana

Korespondenca/Correspondence: asist. dr. Matej Ipavec; e-pošta: matej.ipavec@zf.uni-lj.si

Prispelo: 28. 01. 2026

Sprejeto: 20. 05. 2026

UVOD

Sposobnost aktivacije skeletnih mišic je bistvena za optimalno gibanje tako v športu kot v vsakdanjem življenju. Štiriglava stegenska mišica spada med najpomembnejše mišične skupine spodnjega uda, saj pomembno prispeva k stabilizaciji kolenskega sklepa, absorpciji zunanjih sil in razvoju ekstenzijskega navora pri hoji, teku, skokih in dvigovanju bremen. Zmanjšanje njene zmogljivosti pomembno vpliva na funkcijsko neodvisnost v poznejšem življenju (1). V športih moči, zlasti pri olimpijskem dviganju uteži in troboju moči, pa so ekstenzorji kolena pomembni za izvedbo počepa in drugih tekmovalno pomembnih gibalnih vzorcev, ki zahtevajo visoko sposobnost generiranja sile oziroma moči (2).

Učinkovitost mišične aktivacije je odvisna od številnih dejavnikov, med katerimi imata pomembno vlogo centralna in periferna utrujenost (3). V kliničnem in raziskovalnem okolju ju lahko objektivno ovrednotimo z merjenjem največjega navora med maksimalno hoteno izometrično kontrakcijo (angl. maximal voluntary isometric contraction – MVIC) na izokinetičnem dinamometru. Dodatno se lahko uporabi tehnika interpoliranega (vrinjenega) mišičnega skrčka, pri kateri razmerje vrinjenega in mirovnega skrčka omogoča oceno ravni hotene aktivacije ter posredno razlikovanje med centralnimi in perifernimi omejitvami mišične zmogljivosti (3–5).

Mišično utrujanje je večrazsežen pojav, pri katerem se zmanjšanje zmogljivosti lahko razvije na različnih ravneh živčno-mišičnega sistema. Centralna utrujenost pomeni zmanjšano zmožnost centralnega živčnega sistema, da vzdržuje ali stopnjuje hoteno aktivacijo mišice; povezana je z zmanjšano frekvenco proženja motonevronov, spremenjeno aktivnostjo motorične skorje, modulacijo aferentnega priliva ter nevrottransmiterskimi in kognitivno-motivacijskimi dejavniki (6, 7). Periferna utrujenost pa nastopi na ravni motorične plosčice in distalno od nje, predvsem zaradi presnovnih in biokemičnih sprememb v mišici, porušene homeostaze, ki je posledica kopičenja metabolitov, kot so anorganski fosfati, kalcijevi ioni, laktat, adenzin difosfat in magnezij. To je še posebej izrazito med visokointenzivno vadbo, pri kateri kopičenje metabolitov vpliva na interakcijo aktina in miozina

ter zmanjšuje aktivnost ATPaze in hitrost mišičnega krčenja (3, 7).

Relativni delež centralnega in perifernega utrujanja je odvisen od vrste mišične kontrakcije, intenzivnosti vadbene enote, aktivirane mišične skupine ter stopnje treniranosti (7). Pri športnikih moči je to vprašanje posebej pomembno, saj vadba z visokimi bremenami povzroča specifične živčno-mišične prilagoditve, kot je učinkovitejša rekrutacija motoričnih enot, izboljšana medmišična koordinacija in večja sposobnost generiranja maksimalne sile (8).

Dokazano je, da športniki moči oziroma eksplozivni športniki navadno razvijejo večjo silo MVIC kot netrenirani posamezniki (8), medtem ko razlike v ravni hotene aktivacije med njimi niso jasne. Vadba proti uporju lahko zmanjša živčno inhibicijo ekstenzorjev kolena (9), vendar je možnosti za izboljšave malo, saj je že pri zdravih netreniranih osebah raven aktivacije štiriglave stegenske mišice med MVIC zelo visoka, približno 95-odstotna (10). Po intenzivnem protokolu utrujanja se lahko mišična aktivacija izrazito zmanjša, pri čemer sta delež centralnega in perifernega utrujanja in čas okrevanja odvisna od značilnosti gibalne naloge ter stopnje treniranosti (11–13). Raziskav, ki bi neposredno proučevale razlike v vplivu utrujanja na raven hotene aktivacije štiriglave stegenske mišice med športniki moči in netreniranimi posamezniki, pri pregledu literature nismo zasledili.

Namen raziskave je bil preučiti učinek visokointenzivnega protokola utrujanja na navor MVIC in raven hotene aktivacije štiriglave stegenske mišice pri športnikih moči in netreniranih osebah. Predpostavili smo, da imajo športniki moči večji izhodiščni navor MVIC in višjo raven hotene aktivacije štiriglave stegenske mišice kot netrenirane osebe ter da visokointenzivno utrujanje pri njih povzroči izrazitejši upad mišičnega navora in večji upad ravni hotene aktivacije.

METODE

Raziskovalno delo je potekalo v obliki nerandomiziranega nadzorovanega poskusa, v katerega so bili povabljeni prostovoljci po načelu priložnostnega vzorca. Protokol raziskave je odobrila Komisija Republike Slovenije za medicinsko etiko (št. 0120-23/2025-2711-3). Vse

meritve so potekale v laboratoriju za fizioterapijo na Zdravstveni fakulteti Univerze v Ljubljani med julijem in novembrom 2024. Pred začetkom meritev so bili vsi preiskovanci pisno in ustno seznanjeni s protokolom raziskave. Vsak preiskovanec je pred vključitvijo podpisal izjavo o prostovoljni in zavestni privolitvi k sodelovanju v raziskavi. Merilni protokol sta vedno izvajala vsaj dva preiskovalca – eden je izvajal protokol, usmerjal preiskovanca in ga spodbujal pri dinamometričnih meritvah, drugi pa je nadzoroval izvajanje celotnega merilnega protokola in izvajal stimulacijo femoralnega živca.

Preiskovanci

V vzorec smo vključili zdrave odrasle posameznike moškega spola. V skupino treniranih smo vključili športnike moči, ki so izvajali reden trenažni proces dviganja uteži (poteg, sunek) in/ali troboja moči (počep, mrtvi dvig in potisk s prsi) vsaj trikrat na teden v obdobju najmanj dveh let ter niso imeli predhodne poškodbe ali kirurškega posega na dominantnem kolenskem sklepu. V skupino netreniranih smo vključili posameznike, ki niso izpolnjevali pogojev za uvrstitev v skupino športnikov moči, ki niso imeli preteklih izkušenj z visokointenzivno vadbo proti uporabi ter prav tako niso imeli predhodne poškodbe ali operativnega posega na dominantnem kolenskem sklepu.

Priprava na merilni protokoli

Samolepilno stimulacijsko elektrodo (katoda) (3M, Red Dot Electrodes, tip 2560, Kanada) za stimulacijo femoralnega živca smo postavili v femoralni trikotnik od 3 do 5 cm pod ingvinalnim ligamentom. Veliko (7,5 × 13 cm) samolepilno elektrodo (anoda) (Axelgaard, Fallbrook – Kalifornija, ZDA) smo prilepili čez veliko grčo stegenice (5). Stimulacijo femoralnega živca smo izvedli z električnim stimulatorjem (DS7R, Digitimer Ltd., Velika Britanija) z metodo enojnega interpoliranega (vrinjenega) skrčka, dolžine 1 ms, pravokotne oblike (5, 15). Pred namestitvijo elektrod smo pobrili in očistili predvidena mesta na koži, da smo zmanjšali upor in zagotovili ustrezno prevodnost kože na mestu elektrode.

Pred namestitvijo v dinamometer je preiskovanec izvedel ciljano ogrevanje mišic ekstenzorjev kolena dominantne noge, za kar je izvedel 12 ponovitev izpadnega koraka z dostopom na stopnico, s

postopnim povečevanjem intenzivnosti kontrakcije, in na koncu še pet 10-sekundnih ciklov intermitentnega statičnega raztezanja sprednje stegenske mišice.

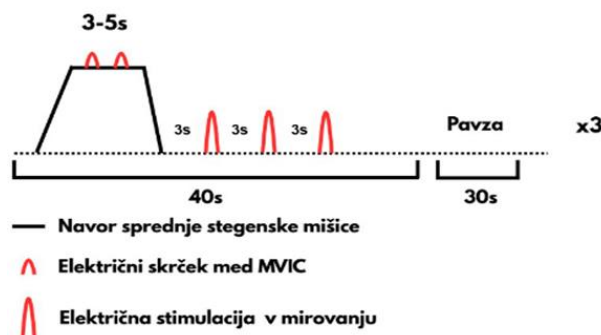
Preiskovanca smo sede namestili na izokinetični dinamometer Humac Norm (CSMI, ZDA), ki smo ga pred začetkom testiranja kalibrirali v skladu s standardnim protokolom proizvajalca. Zagotovili smo pravilno poravnavo kolenskega sklepa z osjo dinamometra in pritrdili ročico dinamometra na distalni anteriorni del goleni, tik nad gležnjem. Nato smo določili obseg giba kolena, v katerem je preiskovanec izvajal merilni protokol. Za preprečitev morebitnih poškodb kolena pri izvajanju protokola utrujanja z maksimalnimi koncentrično-ekscentričnimi kontrakcijami smo obseg giba v smeri ekstenzije zmanjšali za 10° tako, da je preiskovanec izvajal gibanje kolena v obsegu od 10° do 85° fleksije. Za omejevanje neželenih premikov preostalih telesnih segmentov med meritvami smo preiskovanca fiksirali v predelu prsnega koša in medenice s stabilizacijskimi trakovi.

Merilni protokol

Merilni protokol je vključeval meritve navora maksimalne hotene izometrične kontrakcije MVIC ekstenzorjev kolena (slika 1), ki smo jih izvedli pred protokolom koncentrično-ekscentričnega utrujanja iste mišične skupine in po njem. Pred začetkom dinamometričnih meritev smo za vsakega preiskovanca individualno določili jakost električne stimulacije, ki je izzvala največji navor skrčka sproščene mišice. Jakost električnega toka smo postopno povečevali v korakih po 20 mA, dokler ni bil dosežen maksimalni navor mišičnega skrčka. Tako določeno jakost električne stimulacije smo uporabili za vse nadaljnje meritve ravni aktivacije pri danem posamezniku.

Nato je preiskovanec na znak izvedel MVIC ekstenzorjev kolena in ob močnem verbalnem spodbujanju vzdrževal maksimalno aktivnost mišice od 4 do 5 sekund. V območju stabilnega navora med MVIC je preiskovalec dvakrat stimuliral femoralni živec (slika 1). Po sprostitvi mišice je izvedel še tri električne skrčke sproščene mišice, s čimer smo izmerili navor potenciranega mirovnega skrčka mišice. Celoten postopek smo ponovili trikrat, z vmesnim 30-sekundnim

odmorom med vsako ponovitvijo. Za nadaljnjo analizo smo uporabili ponovitev z najvišjo doseženo vrednostjo navora (MVIC 0).



Slika 1: Shematski prikaz meritev navora največje hotene izometrične kontrakcije (MVIC) štiriglave stegenske mišice in določanje ravni živčno-mišične aktivacije s tehniko interpoliranega mišičnega skrčka

Raven aktivacije (RA) štiriglave stegenske mišice je bila izračunana kot razlika med navorom interpoliranega mišičnega skrčka, izzvanega med MVIC, in potenciranim mirovnim skrčkom, izzvanim neposredno po MVIC, izražena v deležu (enačba 1) (15).

$$RA = \left[1 - \left(\frac{\text{interpoliran skrček MVIC}}{\text{potenciran mirovni skrček}} \right) \right] \times 100$$

Enačba 1

Pred protokolom utrivanja sprednje stegenske mišice je preiskovanec izvedel ogrevanje, in sicer najprej 12 izokinetičnih ponovitev fleksije in ekstenzije kolena v danem obsegu giba (10–85° fleksije) brez upora, nato še 10 koncentrično-ekscentričnih mišičnih kontrakcij s postopnim povečevanjem sile do maksimuma. Sledil je protokol mišičnega utrivanja, ki je vključeval 30 zaporednih maksimalnih koncentrično-ekscentričnih kontrakcij ekstenzorjev kolena pri kotni hitrosti 180°/s. V koncentrični fazi je preiskovanec aktivno premagoval upor naprave, medtem ko je v ekscentrični fazi naprava z enako kotno hitrostjo potiskala koleno v fleksijo, preiskovanec pa se je tej sili maksimalno upiral skozi celoten obseg giba. Vsaka ponovitev je morala biti izvedena z maksimalnim naporom, preiskovanci pa so bili ves čas verbalno motivirani, da bi ohranili enakomerno intenzivnost skozi celoten protokol. Takoj po koncu protokola

utrivanja smo ponovili tri meritve navora MVIC s tehniko interpoliranega mišičnega skrčka, po enakem protokolu kot pred utrivanjem. Zaradi hitrega spreminjanja vrednosti MVIC in RA smo njihove vrednosti po protokolu utrivanja analizirali v vsaki posamezni časovni točki posebej (MVIC 1, MVIC 2, MVIC 3 in RA 1, RA 2, RA 3). Za vsako časovno točko po utrivanju smo izračunali tudi absolutne spremembe v ravni aktivacije ($\Delta RA 1 = RA 0 - RA 1$; $\Delta RA 2 = RA 0 - RA 2$; $\Delta RA 3 = RA 0 - RA 3$).

Obdelava podatkov in statistična analiza

Za shranjevanje in obdelavo meritev mišičnega navora je bil uporabljen računalniški program Acqknowledge 4.4 (Biopac Systems, ZDA). Za vnašanje, razvrščanje in urejanje podatkov v preglednicah smo uporabili Microsoft Excel 2019 (Microsoft Corp., ZDA). Podatke smo statistično obdelali s programom SPSS za Windows 29.0 (IBM, ZDA). Normalnost porazdelitve podatkov smo testirali s testom Shapiro-Wilk; vsi podatki so bili normalno porazdeljeni, zato smo uporabili parametrične statistične teste. Povprečja navorov MVIC in RA smo primerjali z dvosmerno faktorsko ANOVA (čas $\times$ skupina) za ponovljene meritve pred utrivanjem in po njem (čas). V primeru pomembne interakcije obeh faktorjev smo izvedli naknadne (*post hoc*) parne primerjave s Tukeyjevim HSD-testom. Demografske značilnosti skupin in spremembo povprečnih vrednosti RA pred utrivanjem in po njem (ΔRA) smo primerjali z dvosmernim t-testom za neodvisne vzorce. Za prag sprejemljive napake prvega reda (α) smo določili $p < 0,05$, napake drugega reda (β) $p < 0,20$ in s tem moč statistične analize $> 80 \%$. Vse vrednosti so poročane kot povprečja (standardni odklon), razen, če je navedeno drugače.

REZULTATI

V raziskavi je sodelovalo 33 moških preiskovancev, starih od 18 do 41 let. Vsem smo testirali dominantni spodnji ud (v trenirani skupini pet levih in 12 desnih, v netrenirani pa štiri leve in 12 desnih). Trenirani posamezniki so imeli statistično značilno večjo telesno maso ($p = 0,002$) in ITM ($p < 0,001$), sicer pa se niso značilno razlikovali od netreniranih oseb. Primerjava osnovnih značilnosti preiskovancev med trenirano in netrenirano skupino je prikazana v preglednici 1.

Preglednica 1: Starost in antropometrične značilnosti preiskovancev obeh skupin

Skupina	Št. oseb	Starost (leta)	Telesna masa (kg)	Telesna višina (cm)	ITM (kg/m ²)
trenirani	17	25,6 (4,9)	96,3 (11,9)	180,3 (5,8)	26,7 (3,0)
netrenirani	16	23,9 (4,3)	80,6 (11,1) **	180,6 (5,0) **	22,3 (2,9)
p		0,32	0,002	0,87	< 0,001

ITM – indeks telesne mase, ** označuje statistično značilno razliko glede na trenirano skupino pri $p < 0,01$.

Primerjava maksimalnih izometričnih navorov štiriglave stegenske mišice

ANOVA povprečij navora MVIC štiriglave stegenske mišice je pokazala statistično značilen učinek časa (delni $\eta^2 = 0,857$; $p < 0,01$), skupine (delni $\eta^2 = 0,546$; $p < 0,01$) in interakcije obeh faktorjev (delni $\eta^2 = 0,339$; $p < 0,01$). Naknadne parne primerjave so pokazale, da je bila razlika v navoru MVIC med skupinama v vsaki časovni točki merjenja statistično značilna ($p < 0,001$) (preglednica 2). Upad MVIC je bil največji takoj po protokolu utrujanja (MVIC 1), in sicer pri trenirani skupini za 38 (7) % in pri netrenirani skupini za 32 (8) %; razlika je bila med skupinami statistično značilna ($p = 0,013$).

Primerjava ravni aktivacije štiriglave stegenske mišice

ANOVA povprečij ravni aktivacije štiriglave stegenske mišice je pokazala statistično značilen učinek časa (delni $\eta^2 = 0,094$; $p = 0,034$), značilen učinek skupine (delni $\eta^2 = 0,088$; $p = 0,046$) in neznačilno interakcijo obeh faktorjev (delni $\eta^2 = 0,054$; $p = 0,209$). Naknadne parne primerjave v posameznih časovnih točkah merjenja so pokazale značilne razlike v vrednosti RA 2 ($p = 0,045$) in RA 3 ($p = 0,005$) med skupinama (preglednica 3).

Preglednica 2: Primerjava povprečnih navorov MVIC štiriglave stegenske mišice med skupinama pred utrujanjem in po njem

	Meritev	Trenirana skupina (Nm)	Netrenirana skupina (Nm)	Razlika med skupinama (p-vrednost)
Pred utrujanjem	MVIC 0	366,26 (77,54)	231,19 (43,84)	< 0,001
	MVIC 1	225,77 (44,32) **	157,17 (30,29) **	< 0,001
Po utrujanju	MVIC 2	258,78 (52,37) **	163,96 (36,05) **	< 0,001
	MVIC 3	277,93 (61,56) **	176,23 (33,22) **	< 0,001

MVIC – največja hotena izometrična kontrakcija, ** označuje statistično značilno razliko glede na MVIC 0 pri $p < 0,001$.

Preglednica 3: Primerjava ravni aktivacije štiriglave stegenske mišice med MVIC pred utrujanjem in po njem

	Raven aktivacije	Trenirana skupina (%)	Netrenirana skupina (%)	Razlika med skupinama (p-vrednost)
Pred utrujanjem	RA 0	96,5 (3,2)	96,9 (3,0)	0,743
	RA 1	92,6 (8,9) *	94,3 (3,2)	0,507
	RA 2	96,1 (2,5)	93,1 (5,1) **	0,045
	RA 3	96,4 (2,9)	92,6 (3,9) **	0,005
Po utrujanju	Δ RA 1	3,8 (10,0)	2,6 (4,7)	0,686
	Δ RA 2	0,2 (3,0)	3,9 (4,0)	0,004
	Δ RA 3	0,4 (3,6)	4,3 (4,0)	0,002

RA – raven aktivacije, Δ RA – razlika v ravni aktivacije med RA 0 in RA 1–3, ** označuje statistično značilno razliko glede na RA 0 pri $p < 0,01$, * označuje statistično značilno razliko glede na MVIC 0 pri $p < 0,05$.

RAZPRAVA

Rezultati naše raziskave so pokazali, da so imeli športniki moči statistično značilno večji navor maksimalne izometrične kontrakcije v primerjavi z netreniranimi posamezniki, tako v spočitem kot utrujenem stanju. To potrjuje ugotovitve Tillina in sodelavcev (8) ter Mehmeta in sodelavcev (14), da športniki moči razvijejo od 18 do 28 % večjo silo MVIC kot netrenirani posamezniki. Tudi v teh raziskavah so sodelovali posamezniki z vsaj dvema letoma izkušenj z vadbo proti uporin in z vsaj 8,5 ure vadbe na teden, sicer ne izključno z dvigovanjem uteži ali trobojem moči. Poleg tega smo tudi predpostavili, da bo relativni upad navora MVIC po utrujanju večji pri trenirani skupini kot pri netrenirani, saj imajo športniki moči več izkušenj in motivacije pri doseganju maksimalnih kontrakcij. Predpostavka se je pokazala kot pravilna, a le pri prvi meritvi (MVIC 1), takoj po protokolu utrujanja. Primerljivo raziskavo naši sta opravila Ahtiainen in Hakkinen (12). V njej sta primerjala navor MVIC športnikov moči (dvigalci uteži in atleti troboja moči) in netreniranih posameznikov pred protokolom utrujanja in po njem. V raziskavi sta uporabila dva različna protokola utrujanja. Prvi protokol utrujanja je bil sestavljen iz štirih nizov po 12 ponovitev z maksimalno obremenitvijo. V drugem pa sta uporabila nadmaksimalno obremenitev, tako da je preiskovanec sam izvedel približno osem ponovitev, zadnje štiri ponovitve pa s pomočjo preiskovalca. Absolutne maksimalne izometrične sile pred utrujanjem so bile pri treniranih za 29 % večje kot pri netreniranih. Po obeh protokolih utrujanja je navor MVIC statistično značilno upadel v obeh skupinah, vendar niso zaznali razlike v relativnem padcu navora MVIC med trenirano in netrenirano skupino (12). Pomembna metodološka razlika, ki bi lahko vplivala na drugačne rezultate, je bila, da so testirali bilateralno izometrično kontrakcijo ekstenzorjev kolena, mi pa smo testirali unilateralno. Poleg tega so testirali le štiri preiskovance v vsaki skupini, kar je lahko pomembno vplivalo na izide.

Dodatna pomembna ugotovitev naše raziskave je bila, da večjega izhodiščnega navora MVIC pri športnikih moči ni spremljala višja izhodiščna raven hotene aktivacije štiriglave stegenske mišice. Ker med skupinama pred utrujanjem nismo ugotovili statistično značilnih razlik v ravni aktivacije, se zdi, da se dolgotrajna vadba s težkimi bremenami v našem

vzorcu ni odrazila v višji hoteni aktivaciji ekstenzorjev kolena med MVIC. Verjetneje je, da so bile izhodiščne razlike v navoru MVIC povezane predvsem z večjim fiziološkim presekom in večjim penacijskim kotom mišičnih vlaken (16). Čeprav v raziskavi nismo neposredno merili fiziološkega preseka štiriglave stegenske mišice, lahko iz razlik v telesni masi in ITM posredno sklepamo, da so imeli športniki moči statistično pomembno večjo mišično maso v primerjavi z netreniranimi preiskovanci.

Tudi Newham in sodelavci (13) poročajo, da je pri zdravih posameznikih raven aktivacije štiriglave stegenske mišice v spočitem stanju skoraj popolna. Po protokolu utrujanja so izmerili 36-odstotni upad ravni aktivacije mišice, kar je precej več kot 3- do 4-odstotni upad, ki smo ga izmerili v naši raziskavi. To razliko je mogoče vsaj deloma pojasniti z razlikami v zasnovi protokolov, saj so Newham in sodelavci (13) štiriglavo stegensko mišico utrujali štiri minute z maksimalnimi iztegi kolena pri kotni hitrosti 85°/s, raven hotene aktivacije pa nato ovrednotili s superponiranim tetaničnim vlakom električnih impulzov. V naši raziskavi smo uporabili 30 maksimalnih koncentrično-ekscentričnih kontrakcij pri kotni hitrosti 180°/s, raven hotene aktivacije pa smo ocenjevali med MVIC s tehniko interpoliranega mišičnega skrčka. Predvidevamo, da je daljši protokol utrujanja povzročil izrazitejšo centralno komponento utrujenosti kot naš.

Zdi se, da je izhodiščna raven hotene aktivacije štiriglave stegenske mišice vsaj med MVIC neodvisna od rednega izvajanja vadbe proti uporin, saj med športniki moči in netreniranimi posamezniki pred utrujanjem nismo ugotovili statistično značilnih razlik v ravni aktivacije. Primerjava z raziskavo Babaulta in sodelavcev (10) hkrati kaže, da je dosežena raven hotene aktivacije odvisna tudi od vrste mišične kontrakcije, saj je ta med MVIC približno 95-odstotna, med počasnimi maksimalnimi koncentričnimi in ekscentričnimi kontrakcijami pri kotni hitrosti 20°/s pa od 88- do 90-odstotna (10). To lahko vsaj deloma pojasni, zakaj v naši raziskavi kljub večjemu navoru MVIC pri športnikih moči med skupinama nismo zaznali razlik v izhodiščni ravni aktivacije; možno je namreč, da bi bile razlike večje v dinamičnih pogojih mišičnega dela.

V naši raziskavi smo izhodiščno tudi predvidevali, da bodo imeli športniki moči višjo raven aktivacije štiriglave stegenske mišice med MVIC v primerjavi z netreniranimi posamezniki, vendar rezultati te domneve niso potrdili. Sicer smo s parnimi primerjavami pri športnikih moči v drugi in tretji časovni točki po utrujanju zaznali statistično značilno višje absolutne vrednosti ravni aktivacije in njihovega upada (Δ RA) kot pri netreniranih posameznikih. To nakazuje hitrejše okrevanje ravni hotene aktivacije mišice po utrujanju pri športnikih moči, vendar zaradi neznačilne interakcije časa in skupine tega opažanja ne moremo z gotovostjo potrditi. V objavljeni literaturi nismo zasledili primerljivih raziskav, zato so potrebne dodatne raziskave tega učinka v prihodnje.

Med omejitvami raziskave je treba najprej izpostaviti razmeroma majhen priložnostni vzorec, ki je vključeval le preiskovance moškega spola, zato je možnost posploševanja ugotovitev omejena. Dodatno skupina športnikov moči ni bila povsem homogena, saj je vključevala tako dvigalce uteži kot atlete troboja moči, pri katerih se lahko zaradi razlik v trenažnem procesu živčno-mišične prilagoditve deloma razlikujejo. Za objektivno ovrednotenje vpliva mišične mase na največji izometrični navor štiriglave stegenske mišice bi bilo treba njen prečni presek izmeriti z magnetno resonanco, analizo sprememb v njeni živčno-mišični aktivaciji po utrujanju pa dopolniti z elektromiografijo. Zato mehanizmov, ki pojasnjujejo razlike v navoru MVIC med skupinama in spremembe ravni hotene aktivacije po utrujanju, nismo mogli natančneje opredeliti. Prihodnje raziskave bi zato morale vključiti večji in bolj homogen vzorec preiskovancev, neposredne mere mišične morfologije ter dodatne mere živčno-mišične aktivacije in utrujanja.

ZAKLJUČKI

Športniki moči so pred visokointenzivnim protokolom utrujanja in po njem dosegali večji navor MVIC kot netrenirani posamezniki, pri čemer je bil največji relativni upad navora pri obeh skupinah prisoten takoj po utrujanju in izrazitejši pri športnikih moči. V nasprotju z našo izhodiščno predpostavko med skupinama pred utrujanjem nismo ugotovili razlik v ravni hotene aktivacije štiriglave stegenske mišice. Večjega navora MVIC pri športnikih moči zato ne moremo pojasniti z višjo

izhodiščno ravno hotene aktivacije, temveč je verjetneje povezan z morfološkimi razlikami mišic med skupinam, ki jih sicer v tej raziskavi nismo neposredno merili. Med omejitvami raziskave je treba izpostaviti razmeroma majhen priložnostni vzorec le moških preiskovancev ter odsotnost neposrednih meritev velikosti in strukture mišic in dodatnih mer živčno-mišične aktivacije. Za potrditev naših ugotovitev bi bilo v prihodnjih raziskavah treba izmeriti prečni presek ekstenzornih mišic z magnetno resonanco in spremembe v njihovi živčno-mišični aktivaciji po utrujanju dodatno analizirati z elektromiografijo.

FINANCIRANJE

Raziskovalno delo je bilo delno sofinancirano iz raziskovalnega programa ARIS P3-005.

ZAHVALA

Za pomoč pri organizaciji in izvedbi raziskave se zahvaljujemo Larisi Grubič, dipl. fiziot.

LITERATURA

1. Bassey EJ, Fiatarone MA, O'Neill EF, Kelly M, Evans WJ, & Lipsitz LA (1992). Leg extensor power and functional performance in very old men and women. *Cin Sci (Lond)*: 82(3): 321–7.
2. Storey A, Smith HK (2012). Unique aspects of competitive weightlifting: performance, training and physiology. *Sports Med* 42(9): 769–90.
3. Gandevia SC (2001). Spinal and supraspinal factors in human muscle fatigue. *Physiol Rev* 81(4): 1725–89.
4. Caruso JF, Brown LE, Tufano JJ (2012). The reproducibility of isokinetic dynamometry data. *Isokinet Exerc Sci* 20(4): 239–53.
5. Rodriguez-Falces J Place N (2013). Recruitment order of quadriceps motor units: femoral nerve vs. direct quadriceps stimulation. *Eur J Appl Physiol* 113(12): 3069–77.
6. Taylor JL, Amann M, Duchateau J, Meeusen R, Rice CL (2016). Neural contributions to muscle fatigue: from the brain to the muscle and back again. *Med Sci Sports Exerc* 48(11): 2294–306.
7. Tornero-Aguilera JF, Jimenez-Morcillo J, Rubio-Zarapuz A, Clemente-Suárez VJ (2022). Central and peripheral fatigue in physical exercise explained: A Narrative Review. *Int J Environ Res Public Health*, 19(7), 3909.
8. Tillin AN, Jimenez-Reyes P, Pain MTG, Folland JP (2010). Neuromuscular performance of explosive power athletes versus untrained individuals. *Med Sci Sports Exerc* 42(4): 781–90.

9. Aagaard P, Simonsen EB, Andersen JL, Magnusson SP, Halkjaer-Kristensen J, Dyhre-Poulsen P (2000). Neural inhibition during maximal eccentric and concentric quadriceps contraction: effects of resistance training. *J Appl Physiol* 89(6): 2249–57.
10. Babault N, Pousson M, Ballay Y, Van Hoecke J (2001). Activation of human quadriceps femoris during isometric, concentric, and eccentric contractions. *J Appl Physiol* 91(6): 2628–34.
11. Carroll TJ, Taylor JL, Gandevia SC (2017). Recovery of central and peripheral neuromuscular fatigue after exercise. *J Appl Physiol* 122(5): 1068–76.
12. Ahtiainen JP, Häkkinen K (2009). Strength athletes are capable to produce greater muscle activation and neural fatigue during high-intensity resistance exercise than nonathletes. *J Strength Cond Res* 23(4): 1129–34.
13. Newham DJ, McCarthy T, Turner J (1991). Voluntary activation of human quadriceps during and after isokinetic exercise. *J Appl Physiol* 71(6): 2122–6.
14. Mehmet K (2021). Comparison of single and multiple joint muscle functions and neural drive of trained athletes and untrained individuals. *Isokinet Exerc Sci* 29(4): 1–11.
15. Folland JP, Williams AG (2007). Methodological issues with the interpolated twitch technique. *J Electromyogr Kinesiol* 17(3): 317–27.
16. Aagaard P, Andersen JL, Dyhre-Poulsen P, Leffers AM, Wagner A, Magnusson SP, Halkjaer-Kristensen J, Simonsen EB (2001). A mechanism for increased contractile strength of human pennate muscle in response to strength training: changes in muscle architecture. *J Physiol* (534): 613–23.