

Vpliv ishemije skeletne mišice na aktivacijo skeletnih mišic med vadbo proti uporu

The effects of ischemia on activation of skeletal muscles during resistance exercise

Maja Vene¹, Matej Ipavec¹, Alan Kacin¹

IZVLEČEK

Uvod: Ishemična vadba proti majhnemu uporu povzroča primerljiv ali celo večji prirast mišične zmogljivosti kot enaka vadba s prostim pretokom krvi, k čemur verjetno prispeva tudi izboljšana živčna aktivacija skeletnih mišic. Namen pregleda literature je bil ugotoviti vpliv ishemične vadbe proti majhnemu uporu na mišično aktivacijo. **Metode:** V podatkovnih zbirkah PubMed, PEDro, Cochrane Library in Science Direct smo iskali radomizirane in nerandomizirane kontrolirane raziskave s področja. **Rezultati:** V pregled je bilo vključenih enajst raziskav, v katerih so primerjali učinke ishemične vadbe proti majhnemu uporu in enake vadbe z normalnim pretokom krvi; v štirih raziskavah so v primerjavo vključili tudi vadbo proti velikemu uporu z normalnim pretokom krvi. Izsledki kažejo, da ob enakem mehanskem uporu in količini vadbe ishemična vadba pomembno bolj poveča aktivacijo skeletnih mišic kot vadba z normalnim pretokom krvi. Tako pa se tudi pospeši centralno in periferno utrujanje, kar je razvidno iz izrazitega upada tako ravni aktivacije centralnega živčevja kot vzdraženosti mišic takoj po ishemični vadbi. Opazen je tudi večji upad ravni aktivacije centralnega živčevja in vzdraženosti mišice med maksimalnim mišičnim naprežanjem takoj po ishemični vadbi, kar kaže na povečano centralno in periferno utrujanje v ishemičnih pogojih dela. **Zaključki:** Izsledki raziskav kažejo, da izvajanje vaj proti majhnemu uporu z oviranim pretokom krvi izboljša aktivacijo skeletnih mišic in pospeši utrujanje, vendar še ni jasno, ali to povzroči tudi dolgotrajne izboljšave.

Ključne besede: vadba z oviranim pretokom krvi, vadba proti majhnemu uporu, hotena mišična aktivacija, centralna motorična aktivacija.

ABSTRACT

Background: Low-load ischemic training is often used as an alternative to standard high-load resistance training. It is thought to elicit similar, or greater, gains in muscle size and strength at lower mechanical loads, which may be also attributed to enhanced neural activation of muscles. The purpose of this review was to determine the effects of low-load ischemic resistance exercise on voluntary muscle activation. **Methods:** We reviewed PubMed, PEDro, Cochrane Library and Science Direct databases for relevant randomized and non-randomized controlled trials. **Results:** Eleven studies that compared the effects of low-load ischemic resistance exercise with the effects of equal low-load resistance exercise with free blood flow have been included and analysed. Four studies also used standard high-load exercise for comparison. The findings show that low-load ischemic resistance exercise can elicit significantly higher levels of skeletal muscle activation than standard exercise performed at the same intensity and volume. It also accelerates central and peripheral fatigue, which is evident from higher reduction of central activation level and muscle excitability immediately after ischemic exercise. **Conclusions:** Low-load ischemic resistance exercise can augment activation of skeletal muscles and accelerate fatigue, but it remains unknown if this elicits long-lasting improvements.

Key words: blood flow restricted exercise, low-load resistance exercise, voluntary muscle activation, central motor activation.

¹ Univerza v Ljubljani, Zdravstvena fakulteta, Ljubljana

Korespondenca/Correspondence: izr. prof. dr. Alan Kacin, dipl. fiziot.; e-pošta: alan.kacin@zf.uni-lj.si

Prispelo: 28.9.2021

Sprejeto: 9.12.2021

UVOD

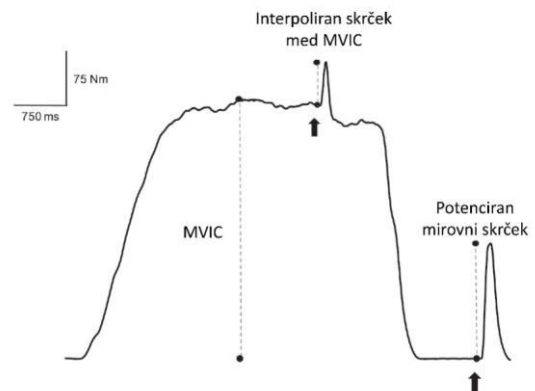
Sposobnost maksimalne aktivacije skeletnih mišic je pomembna funkcija živčno-mišičnega sistema, ki se kaže predvsem pri dejavnostih, ki zahtevajo uporabo velikih mišičnih sil ali izvajanje koordiniranih gibov (1). Hotena mišična aktivacija zahteva usklajeno delovanje centralnega živčnega sistema in perifernih živčno-mišičnih poti. Reverzibilne motnje v delovanju teh poti, ki so posledica utrujanja med telesnim naporom, se pokažejo kot akutna, prehodno zmanjšana sposobnost generiranja mišične sile in jih v grobem delimo na centralno ali periferno utrujanje (2). Periferno utrujanje nastane zaradi različnih sprememb v prevodnosti perifernega motoričnega nevrona, na živčno-mišičnem stiku ali v skeletni mišici (lokalna acidoza, poškodbe posameznih mišičnih vlaken, oslABLJENA sklopitev ekscitacije s kontrakcijo, zmanjšana razpoložljivost ATP in fosfokreatina ipd.) (3, 4), zelo malo pa je znanega o mehanizmih centralne utrujenosti, ki nastaja v različnih delih centralnega živčevja (3).

Tako periferno kot centralno utrujanje lahko bistveno vplivata na mišično zmogljivost, zaradi česar oseba določeno gibalno nalogo izvede bistveno počasneje ali okorno. Utrujanje spremeni živčno-mišično aktivnost, ki je potrebna za izvajanje gibalne naloge (5), kar lahko zaznamo tudi z analizo elektromiograma (EMG). Utrujanje med dlje časa trajajočo aktivnostjo submaksimalne intenzivnosti se kaže kot povečana amplituda in zmanjšana srednja frekvenca EMG signala (6). Predpostavlja se, da to odraža povečevanje aktivacije motoričnih enot tipa II, ki začnejo nadomeščati utrujene enote tipa I (7, 8). Z aktivacijo vseh razpoložljivih motoričnih enot se hitro povečuje tudi centralno (živčno) utrujanje, zato začne EMG amplituda proti koncu maksimalne aktivnosti upadati in posameznik mora mišično silo zmanjšati ali kontrakcijo prekiniti (odpoved mišične kontrakcije).

Čeprav je površinska EMG najbolj razširjena metoda za ocenjevanje mišične aktivacije, ta ravni hotene aktivacije ne meri neposredno (6). Slednje lahko izmerimo le s tehnikami, ki kombinirajo hoteno (zavestno) aktivacijo mišice z metodami zunanje (nehotene) stimulacije mišice. Pri izvedbi maksimalne hotene izometrične kontrakcije mišic (angl. maximal voluntary isometric contraction –

MVIC) se po načelu velikosti prve rekrutirajo majhne in počasne motorične enote, šele nato velike in hitre (9). Če med MVIC dodamo električno stimulacijo, povzročimo obrnjeno rekrutacijo motoričnih enot, s čimer aktiviramo preostale motorične enote, ki jih hoteno nismo bili sposobni aktivirati (10). Iz razlike med navorom MVIC in dodatkom živčno-mišične električne stimulacije nato izračunamo raven vzdraženja centralnega motoričnega živčevja oziroma krajše, centralne aktivacije (CA). Najpogosteje uporabljene in mednarodno sprejete tehnike za merjenje ravni CA so tehnika interpoliranega oziroma vrinjenega skrčka (angl. interpolated twitch technique – ITT), tehnika superponiranega oziroma dodanega vlaka električnih dražljajev (11, 12) in tehnika transkranijske magnetne stimulacije (angl. transcranial magnetic stimulation – TMS) (13). Metodo vrinjenega skrčka je prvi opisal Merton (14), ki je dokazal, da se skrček mišice na supramaksimalni električni dražljaj med stopnjevanjem hotene kontrakcije mišice linearno zmanjšuje. Raven CA je definiral kot razmerje med velikostjo sile vrinjenega skrčka, doseženega med MVIC (interpoliran skrček), in velikostjo sile skrčka v mirovanju, izmerjenega takoj po MVIC (potenciran mirovni skrček) (14) (slika 1).

Druga pogosto uporabljena tehnika je tehnika superponiranega vlaka električnih impulzov (11, 12). S to tehniko izmerimo delež centralne



Slika 1: Merjenje ravni centralne aktivacije z metodo vrinjenega skrčka med maksimalno hoteno izometrično kontrakcijo (MVIC). Puščica prikazuje trenutek aplikacije enojnega električnega impulza (prirejeno po Maffiullettiju in sodelavcih (15)).

aktivacije (angl. percentage of central activation ratio), ki ga izračunamo tako, da navor, izmerjen med MVIC, delimo s skupnim navorom MVIC, ki smo mu dodali vlak električnih impulzov, in razmerje izrazimo v odstotku (13). Če električna stimulacija med maksimalnim krčenjem mišice ne ustvari dodatne sile, je preiskovanec sposoben popolne hotene kontrakcije vseh mišičnih vlaken in je torej delež njegove centralne aktivacije 100 % (16).

Ker lahko že manjši primanjkljaj mišične jakosti bistveno vpliva na telesno funkcijo in uspešnost okrevanja po poškodbi, se veliko raziskav osredotoča na analizo različnih fizioterapevtskih metod in njihovih učinkov na raven mišične aktivacije. Temeljna metoda za izboljšanje mišične aktivacije je vadba proti zmernemu ali velikemu upor (≥ 65 % enega ponovitvenega maksimuma; 1 RM), ki je dokazano učinkovita za povečanje mišične zmogljivosti in preprečevanje mišične atrofije (8). Toda v primerih, ko je mehanska nosilnost sklepa, prek katerega se sile prenašajo, zmanjšana zaradi okvarjenih sklepnih struktur, standardna vadba proti velikemu upor ni izvedljiva.

V zadnjih desetih letih je na področju fizioterapije veliko pozornosti pritegnila ishemična vadba proti upor, ki temelji na omejevanju pretoka krvi skozi delujočo mišico, kar dosežemo s pomočjo elastičnega traku ali napihljive manšete, ki povzroči mehansko kompresijo ožilja v mehkem tkivu (17–19). Velikost tlaka, potrebnega za zaustavitev pretoka krvi, se navadno določi individualno in je odvisna od številnih dejavnikov, vključno s širino in materialom manšete, obsegom uda, debelino podkožnega maščevja in mišice na mestu manšete, z dvigom arterijskega krvnega tlaka med vadbo idr. (18, 20). V primerjavi z vadbo z normalnim pretokom krvi se ishemična vadba navadno izvaja proti majhnemu upor, kar bistveno zmanjšana tveganje za nastanek poškodb sklepov (17, 18). Ugotovitve številnih raziskav kažejo, da vadba proti majhnemu upor (20–30 % (1 RM)) v kombinaciji z omejitvijo krvnega pretoka spodbudi enak ali celo večji prirast mišične mase in jakosti kot vadba z normalnim pretokom krvi proti velikemu upor (≥ 65 % 1 RM) (21). Del vadbene učinka ishemične vadbe gre verjetno pripisati tudi izboljšanju

živčnega nadzora mišice, saj je povečanje mišične jakosti navadno večje kot mišična hipertrofija (4).

Z mehanskim omejevanjem dotoka oksigenirane krvi v aktivno mišico in s preprečevanjem odplavljanja presnovkov iz nje se med ishemično vadbo poveča presnovni stres (tj. izčrpanje fosfokreatina, povečano kopičenje anorganskega fosfata, protonov in laktata) na enoto dela (18). Pospešeno utrujanje oksidativnih mišičnih vlaken tipa I med ishemijo naj bi kompenziralo sorazmerno povečevanje rekrutacije glikolitičnih mišičnih vlaken tipa II, s čimer se ohrani konstantna mišična sila, potrebna za opravljanje zelene gibalne naloge (22). Zaradi hitrega utrujanja vlaken tipa I se mišica v ishemičnih pogojih dela verjetno pospešeno utruja, kar povzroči progresivno večanje mišične aktivacije. Natančni mehanizmi in prilagoditve aktivne mišice med ishemično vadbo še niso podrobno pojasnjeni. Odprto ostaja predvsem vprašanje, kako in koliko ishemična vadba proti majhnemu upor vpliva na hoteno aktivacijo skeletne mišice in ali so te spremembe dovolj velike, da povzročijo trajno izboljšanje mišične zmogljivosti.

Namen pregleda znanstvene literature je bil analizirati učinke žilne okluzije (ishemije) na mišično aktivacijo med izvajanjem vaj proti majhnemu upor.

METODE

Iskanje literature je potekalo po podatkovnih zbirkah PubMed, PEDro in Cochrane Library. Uporabljene so bile naslednje iskalne kombinacije v angleščini: occlusion exercise OR blood flow restricted exercise AND voluntary muscle activation; ischemic exercise OR vascular restriction AND voluntary muscle activation; ischemic exercise OR vascular restriction OR blood flow restricted exercise AND EMG; ischemic exercise OR vascular restriction OR blood flow restricted exercise AND central activation ratio; ischemic exercise OR vascular restriction OR blood flow restricted exercise AND twitch interpolation OR superimposed burst.

Iskali smo randomizirane in nerandomizirane kontrolirane raziskave v angleškem jeziku, ki so bile objavljene do novembra 2020. Najpomembnejši merili za vključitev raziskav v pregled sta bili 1)

preučevan je bil takojšen vpliv ishemične vadbe proti majhnemu uporu na mišično aktivacijo in 2) raven mišične aktivacije so v prvi vrsti merili s tehnikami vrinjenega skrčka, dodanega vlaka električnih dražljajev in površinske EMG. Izključene so bile raziskave, ki niso uporabile standardnih metod za merjenje mišične aktivacije,

in raziskave učinkov ishemične vadbe proti zmernemu ali velikemu uporu ($\geq 65\%$ 1 RM).

REZULTATI

Na podlagi iskalnih nizov iz kombinacij ključnih besed je bilo v treh podatkovnih zbirkah najdenih 81 zadetkov, po odstranjenih duplikatih jih je bilo 47. Po pregledu naslovov, izvlečkov in dostopnosti

Preglednica 1: Pregled v raziskavah uporabljenih eksperimentalnih protokolov vadbe z ishemijo in brez nje

Avtorji	Mišična skupina	Vadbeni protokoli	Vadbena enota
Wernbom in sod. (23)	ekstenzorji kolenskega sklepa	ishemija brez ishemije (MU)	30 % 1 RM, 3 nizi do odpovedi, 45 s premora med nizi
Fatela in sod. (21)	ekstenzorji kolenskega sklepa	40 % ishemija 60 % ishemija 80 % ishemija	20 % 1 RM, 4 nizi, ponovitve: 30 + 15 + 15 + 15, 30 s premora med nizi
Ishizaka in sod. (24)	ekstenzorji kolenskega sklepa	ishemija brez ishemije (MU)	10 % 1 RM, 3 nizi, 30 ponovitev, 30 s premora med nizi
Yasuda in sod. (17)	fleks. in ekst. komolčnega sklepa	ishemija brez ishemije (VU)	20 % 1 RM, 3 nizi, 30 ponovitev, 30 s premora med nizi
Husmann in sod. (25)	ekstenzorji kolenskega sklepa	ishemija brez ishemije (MU)	20 % 1 RM (fleksorji) oz. 15 % 1 RM (ekstenzorji), 4 nizi, ponovitve: 30 + 15 + 15 + 15, 30 s premora med nizi
Kjeldsen in sod. (27)	dorzalni fleks. zgornjega skočnega sklepa	ishemija brez ishemije	30 % 1 RM, 4 nizi, ponovitve: 30 + 15 + 15 + 15, 30 s premora med nizi
Copithorne in Rice (22)	fleksorji komolčnega sklepa	ishemija brez ishemije (VU)	4 nizi, ponovitve: 30 + 15 + 15 + 15, 30 s premora med nizi
Ilett in sod. (7)	ekstenzorji kolenskega sklepa	ishemija brez ishemije (MU)	25 % MVIC, 1 niz do odpovedi
Karabulut in sod. (28)	ekstenzorji kolenskega sklepa	ishemija brez ishemije (MU)	80 % MVIC, 1 niz do odpovedi
Cook in sod. (4)	ekstenzorji kolenskega sklepa	ishemija brez ishemije (MU)	20 % MVIC, 4 nizi, ponovitve: 30 + 15 + 15 + 15, 30 s premora med nizi
Fatela in sod. (26)	ekstenzorji kolenskega sklepa	ishemija brez ishemije (MU)	80 % MVIC, 4 nizi, 8 ponovitev, 2,5 min premora med nizi
		ishemija brez ishemije (VU)	20 % 1 RM, 5 nizev, 20 ponovitev, 30 s premora med nizi
		ishemija brez ishemije (MU)	20 % 1 RM, 3 nizi do odpovedi, 30 s premora med nizi
		ishemija brez ishemije (VU)	70 % 1 RM, 3 nizi do odpovedi, 30 s premora med nizi
		ishemija brez ishemije (MU)	20 % 1 RM, 4 nizi, ponovitve: 30 + 15 + 15 + 15, 30 s premora med nizi
		ishemija brez ishemije (VU)	75 % 1 RM, 4 nizi, 10 ponovitev, 60 s premora med nizi

MU – majhen upor (angl. low-load), VU – velik upor (angl. high-load), RM – ponovitveni maksimum (angl. repetition maximum), MVIC – maksimalna hotena izometrična kontrakcija (angl. maximal voluntary isometric contraction).

v polnem besedilu smo izločili še 26 raziskav. Na koncu izbora je bilo v podrobno analizo vključenih 11 nerandomiziranih kontroliranih raziskav, objavljenih med letoma 2009 (23) in 2020 (22). V vseh raziskavah so se avtorji osredotočali na takojšnje nevrofiziološke učinke ishemične vadbe proti majhnemu uporu. V raziskave je bilo skupno vključenih 126 preiskovancev, od tega 113 moških in 13 žensk. V posamezni raziskavi je sodelovalo od 7 (24) do 18 preiskovancev (25), starih od 18 (26) do 70 let (24). V desetih raziskavah so bili preiskovanci predhodno redno telesno dejavni in zdravi, v eni pa so sodelovali srčno-žilni bolniki, ki so pred vključitvijo v raziskavo že opravili pooperativni program aerobne vadbe (24).

Merilne metode

V vseh raziskavah so preiskovanci že pred začetkom eksperimenta vsaj enkrat obiskali laboratorij, kjer so jim izmerili maksimalno mišično jakost s tehniko enega ponovitvenega maksimuma (1 RM) ali največjega navora hotene izometrične kontrakcije (MVIC), hkrati pa so bili tudi seznanjeni s tehniko omejevanja pretoka krvi med vadbo. Manšete so bile preiskovancem nameščene na proksimalni del zgornjega ali spodnjega uda in so bile v vseh raziskavah napihnjene ves čas izvajanja posamezne vaje, vključno z odmori med nizi. Mišično aktivnost so v večini raziskav ovrednotili z amplitudno in frekvenčno analizo površinske EMG (4, 7, 17, 21–28). V štirih raziskavah so dodatno ocenjevali raven CA s tehniko ITT (4, 22, 25, 28), v eni pa so za oceno vzdraženosti motorične skorje in kortikospinalne proge uporabili tehniko TMS z dvojnimi dražljaji različnih frekvenc (27). Meritve ravni CA so bile opravljene pred vadbeno enoto in neposredno po njej (4, 22, 27, 28), v enem primeru tudi po vsakem nizu vaje (25), površinsko EMG pa so v vseh raziskavah merili tudi med izvajanjem vaj (4, 22, 25, 27, 28). V vseh raziskavah so isti preiskovanci izvedli vadbeno enoto v različnih eksperimentalnih pogojih (metoda ponovljenih meritve), pri čemer je bil razmik med dvema eksperimentalnima pogojema najmanj 5 minut (24) in največ 11 dni (27).

Raziskovalni protokoli

Eksperimentalni vadbeni protokoli raziskav, vključenih v pregled, so predstavljeni v preglednici 1. V vseh vključenih raziskavah so izvedli ponovljene meritve, saj je ista skupina

preiskovancev opravila več različnih vadbenih protokolov oziroma ponovila enak vadbeni protokol z ishemijo mišic ali brez nje. V šestih raziskavah je protokol obsegal štiri nize z vnaprej določenim številom ponovitev, in sicer 30 ponovitev v prvem in 15 ponovitev v preostalih treh nizih (7, 17, 21, 25–27). V eni raziskavi so preiskovanci izvajali tri nize vaje s 30 ponovitvami (24), v eni pa pet nizov vaje z 20 ponovitvami (28). V treh raziskavah so v vseh nizih izvajali ponovitve do odpovedi koncentrične kontrakcije mišic (4, 22, 23). Premori med posameznimi nizi so trajali 30 sekund (7, 17, 21, 22, 24–28), v eni raziskavi pa 45 sekund (23). V sedmih raziskavah so avtorji primerjali dva eksperimentalna pogoja: ishemično vadbo proti majhnemu uporu in vadbo z normalnim pretokom krvi proti majhnemu uporu (17, 21, 23–25, 27, 28). Vadba je v obeh pogojih potekala proti mehanskemu uporu med 10 % 1 RM (24) in 30 % 1 RM (23, 25). Tri raziskave so poleg vadbe proti majhnemu uporu z ishemijo ali brez nje proučile tudi učinke vadbe proti velikemu uporu brez ishemije. Pri tem so uporabili upore 70 % 1 RM (4), 75 % 1 RM (26) ali 80 % MVIC (7). V eni raziskavi (22) so v kontrolnem pogojem izvajali le vadbo proti velikemu uporu (80 % MVIC).

Raven centralne aktivacije

V štirih raziskavah (4, 22, 25, 28) so izmerili raven CA s tehniko ITT. V raziskavi Husmanna in sodelavcev (25) so ugotovili pomembno ($p < 0,05$) večje znižanje sile potenciranega skrčka po vseh nizih ishemične vadbe in ravni CA po zadnjem nizu v primerjavi z enako vadbo z normalnim pretokom krvi. V raziskavi Copithorna in sodelavcev (22) je med vadbo fleksorjev komolca prišlo do znižanja ($p < 0,05$) ravni CA v obeh eksperimentalnih pogojih, in sicer -12 % med ishemično vadbo proti majhnemu uporu (25 % MVIC) in -8 % med vadbo proti velikemu uporu (80 % MVIC) brez ishemije. V raziskavi Karabuluta in sodelavcev (28) se je po izvedbi ishemične vaje iztega kolena navor MVIC m. quadriceps f. zmanjšal ($p = 0,02$) za 18 % več kot po enaki vadbi brez ishemije, pri čemer se je raven CA zmanjšala ($p = 0,04$) za 13 %, maksimalna EMG amplituda za 12 % in sila vrinjenega skrčka za 35 %. V raziskavi Cooka in sodelavcev (4) niso zaznali pomembnega zmanjšanja ravni CA po izvedbi treh nizov ekstenzije kolena do odpovedi v nobenem od eksperimentalnih pogojev. Kjeldsen in sodelavci (27) po štirih nizih dorzalne fleksije skočnega

sklepa, izvedenih z ishemijo ali brez nje, niso zaznali razlik v amplitudah evociranih potencialov, izzvanih z dvojnimi TMS-dražljaji. Vadba pa je v obeh primerih povzročila dolgotrajno zmanjšanje amplitude vala M m. tibialis anterior.

Površinska EMG med vadbo

Ishizaka in sodelavci (24) so poročali o statistično pomembno ($p < 0,05$) večjih EMG amplitudah mišic ekstenzorjev kolenskega sklepa v koncentričnih in ekscentričnih fazah vseh nizov ishemične vadbe proti zelo majhnemu uporu (10–20 % 1 RM). Yasuda in sodelavci (17) so poročali o večjem dvigu EMG amplitude mišic komolčnega sklepa med ishemično vadbo (+69 % v fleksorjih in +46 % v fleksorjih; $p < 0,05$) kot med vadbo z normalnim pretokom krvi (+23 % v fleksorjih in +12 % v fleksorjih; $p < 0,05$). Husmann in sodelavci (25) so med ishemično vajo iztega kolena izmerili pomembno ($p < 0,01$) večje amplitude EMG, in sicer v m. vastus medialis od konca prvega do konca zadnjega niza, v m. vastus lateralis pa od konca drugega do konca zadnjega niza. Kjeldsen in sodelavci (27) so poročali o pomembno ($p = 0,009$) večjem prirastu EMG amplitude m. tibialis anterior med zadnjimi 20 ponovitvami vaje dorzalne fleksije stopala v ishemičnih pogojih dela. Nasprotno, Wernbom in sodelavci (23) poročajo, da se je med izvajanjem iztega kolena proti majhnemu uporu (30 % 1RM) EMG amplituda ekstenzorjev kolena povečala neodvisno od ishemije mišice; v ekscentrični fazi tretjega niza je bila celo pomembno ($p = 0,005$) večja med vadbo brez ishemije. Tudi Cook in sodelavci (4) niso zaznali razlik v EMG amplitudi m. quadriceps femoris med ishemično vadbo proti majhnemu uporu z ishemijo in brez nje, je pa bila ta pomembno večja ($p < 0,05$) med vadbo proti velikemu uporu. Copithorne in Rice (22) sta tudi izmerila večjo amplitudo EMG med vadbo proti velikemu uporu z normalnim pretokom krvi, poleg tega pa se je amplituda progresivno manjšala ($p < 0,003$) le med ishemično vadbo z majhnim bremenom in je na točki odpovedi dosegala le še 50 % izhodiščne vrednosti. Tudi primerjave ishemične vadbe proti majhnemu uporu z vadbo proti velikemu uporu brez ishemije so pokazale, da so EMG amplitude pomembno ($p < 0,05$) večje med vadbo proti velikemu uporu (7, 26).

V dveh raziskavah (7, 21) so primerjali tudi vpliv različne stopnje ishemije na mišično aktivacijo, in

sicer 40-, 60- in 80-odstotno okluzijo dovodne arterije. V raziskavi Iletta in sodelavcev (7) so bile EMG amplitude pri 60- in 80-odstotni okluziji statistično pomembno večje ($p < 0,01$) v primerjavi z vadbo proti enakemu uporu z normalnim pretokom krvi. Poleg tega so Fatela in sodelavci (21) ugotovili, da je bila pri 80-odstotni okluziji EMG amplituda od drugega do zadnjega niza vaje pomembno ($p < 0,05$) večja kot pri 40- in 60-odstotni okluziji, srednja frekvenca EMG pa je bila pomembno ($p < 0,01$) manjša le pri 60- in 80-odstotni okluziji.

RAZPRAVA

Raziskave so bile po številu in značilnostih preiskovancev sicer primerljive, a so se precej razlikovale v merilnih metodah in eksperimentalnih intervencijah, kar nekoliko oteži neposredno primerjavo rezultatov. Od skupno 126 preiskovancev je bilo le 13 žensk, vključene so bile v tri raziskave (23, 24, 27). Več avtorjev (21, 25, 26) izpostavlja ne vključenost žensk v raziskave kot pomembno omejitev za posplošenje ugotovitev raziskav. Fatela in sodelavci (21) sicer kot metodološko omejitev za vključevanje žensk navajajo večjo povprečno debelino podkožnega maščevja na udih pri ženskah, kar poslabša električno prevodnost tkiva in s tem kakovost površinskega EMG signala. Debelina podkožnega maščevja sicer zelo verjetno vpliva tudi na stopnjo okluzije ožilja pri danem tlaku v manšeti (20), saj maščoba absorbira in razprši sile pod manšeto, zato se z debelino maščevja povečuje tlak, potreben za okluzijo globlje ležečih žil med mišicami in v njih. Raziskava Labarbere in sodelavcev (29) je na primer pokazala, da so ženske med ishemično vadbo bolj vzdržljive kot moški, vendar je razlika verjetno le posledica manjše stopnje okluzije pri ženskah zaradi debelejšega podkožnega maščevja na mestu aplikacije manšete, in ne razlike v občutljivosti skeletnih mišic na ishemijo med spoloma. V prihodnjih raziskavah bo treba upoštevati vpliv debeline kožne gube in obsega uda na učinkovitost žilne zapore z napihljivo manšeto med vadbo in vključiti več žensk.

Mišična aktivacija med ishemično vadbo

V raziskavah so proučevali mišično aktivacijo različnih mišičnih skupin, in sicer večinoma aktivacijo mišic spodnjih udov (4, 7, 21, 23–25, 27, 28), manj pogosto pa aktivacijo mišic zgornjih udov

(17, 22). Fatela in sodelavci (21) so v odzivu na enako stopnjo okluzije zaznali razlike med mišicama vastus medialis in rectus femoris, hkrati pa so Yasuda in sodelavci (17) ugotovili, da ishemična vadba vpliva na EMG amplitude mišic fleksorjev komolčnega sklepa že po prvem nizu vaje, pri ekstenzorjih komolčnega sklepa pa so bili vplivi vidni šele v zadnjem nizu. Predpostavljamo, da so opazovane razlike v učinku ishemije med mišičnimi skupinami zlasti posledica različne vsebnosti oksidativnih in glikolitičnih mišičnih vlaken. Rezultatov, pridobljenih na določeni mišici, torej ne moremo neposredno posplošiti na vse mišične skupine.

V devetih raziskavah (4, 17, 21, 23–28) so poročali, da je mišična aktivacija med vadbo najmanjša na začetku niza in se nato postopoma povečuje, neodvisno od prekrvavitve ali faze kontrakcije mišic. To pripisujejo progresivnemu povečevanju rekrutacije motoričnih enot tipa II, ki nadomeščajo utrujene enote tipa I. V šestih od teh raziskav (17, 21, 24–27) so ugotovili, da ishemična vadba izzove večji dvig EMG amplitude kot vadba z normalnim pretokom krvi. Verjetno je v ozadju enak mehanizem, ki odraža pospešeno utrujanje zlasti oksidativnih vlaken v ishemičnih pogojih dela. Razlike med ishemično in običajno vadbo postanejo očitne predvsem v zadnjem nizu vaje, ko je živčno-mišično utrujanje na vrhuncu (27). Nasprotno pa so v treh raziskavah (4, 22, 23) izmerili, da EMG vrednosti med ishemično vadbo ne presežejo tistih med vadbo z normalnim pretokom krvi, temveč v zadnjem nizu vaje celo močno upadejo (22, 23). To je morda posledica naporejše vadbe, saj so v teh raziskavah (4, 22, 23) preiskovanci izvajali vajo do odpovedi hotene koncentrične kontrakcije mišic v vseh eksperimentalnih pogojih, kar je izzvalo primerljiv (maksimalen) napor. Pri taki intenzivnosti mišične aktivacije sprostitve mišičnih vlaken med ponovitvami praktično ni, zato stalno povišan intramuskularni tlak sam po sebi ovira normalen krvni pretok mišice (18). Torej je bila mišica tudi med vadbo brez okluzije podvržena relativni ishemiji.

V dveh raziskavah (7, 21), ki sta se osredotočili na preučevanje vpliva različnih stopenj arterijske okluzije, avtorji ugotavljajo, da večje stopnje okluzije na splošno povečajo odzive na ishemično vadbo. V obeh raziskavah so pri 60- in 80-odstotni

okluziji ugotovili bistveno večje EMG amplitude kot pri 40-odstotni okluziji. To kaže, da obstaja prag ishemije, pri katerem se aktivnost motoričnih enot pomembno poveča, in da je ta prag pri ≥ 60 -odstotni okluziji. Poleg tega je analiza srednje frekvence EMG signala pokazala, da se izrazito večje utrujanje mišice pojavi šele pri 80-odstotni okluziji (21). Toda (pre)visok manšetni tlak ima lahko tudi negativne dolgoročne učinke na mišično aktivacijo. Kacin in Stražar (30) sta namreč pokazala, da se po štirih tednih redne ishemične vadbe z visokim manšetnim tlakom (≥ 230 mm Hg) zmanjša maksimalna EMG amplituda m. vastus medialis in m. rectus femoris, kar avtorja pripisujeta negativnemu vplivu ponavljajočega se pritiska manšete na prevodnost femoralnega živca. To je zlasti pomembno, kadar posamezno ishemično vajo izvajamo brez reperfuzije med nizi in je čas neprekinjene ishemije mišice od 5 do 10 minut (19). Kaže torej, da je za optimizacijo učinkov ishemične vadbe treba individualno določiti manšetni tlak med ~ 60 % in ~ 80 % arterijske okluzije ter hkrati zagotoviti dovolj počitka za regeneracijo mišic in živcev po vadbi.

Raziskave (4, 7, 22, 26), v katerih so učinke ishemične vadbe proti majhnemu uporju primerjali tudi z vadbo proti velikemu uporju brez ishemije, so pokazale, da upor precej bolj poveča mišično aktivacijo kot ishemija mišice. EMG amplitude so tudi po več nizih ishemične vadbe še vedno nižje kot tiste, ki so dosežene že v prvem nizu vadbe proti velikemu uporju z normalnim pretokom krvi (4, 7), v enem primeru so se proti koncu ishemične vadbe celo znižale (22). Kaže torej, da se vzorec rekrutacije in posledično tudi utrujanja motoričnih enot med njima precej razlikuje.

Vpliv ishemične vadbe na raven centralne aktivacije in mehanizme utrujanja

Koliko centralni (živčni) in periferni (mišični) mehanizmi vplivajo na povečano utrujanje med ishemično vadbo, še ni dobro pojasnjeno. Karabulut in sodelavci (28) so ugotovili, da je pospešeno utrujanje med ishemično vadbo posledica kombinacije centralnih in perifernih mehanizmov. Nasprotno pa Cook in sodelavci (4) niso ugotovili, da bi se raven CA med vadbo sploh zmanjšala in tudi niso zaznali nobenih razlik v mišični aktivaciji med ishemično in običajno vadbo proti majhnemu uporju. To jih je napeljalo k sklepu, da centralno

utrufanje nima pomembne vloge pri vadbi proti upor do odpovedi in da je torej utrufanje v celoti periferno, na ravni skeletne mišice. Novejša raziskava Husmanna in sodelavcev (25) je podrobneje proučila časovni vzorec utrufanja med ishemično vadbo; meritve ravni CA in mišične kontraktilnosti so preverjali po vsakem izvedenem nizu ekstenzije kolena (30 % 1 RM) in ugotovili, da je bila vzdraženost mišice na električni skrček pomembno manjša že od prvega niza ishemične vadbe naprej, razlika v upadu ravni CA med ishemično in običajno vabo pa se je pojavila šele v zadnjem nizu. Zato ugotavljajo, da so med ishemično vadbo bolj izraženi periferni kot centralni mehanizmi utrufanja (25). Poleg tega razlike v vzdraženosti kortikalnih motoričnih centrov in perifernega živca (27) nakazujejo, da se utrufanje med vadbo proti majhnemu upor ne pojavi na kortikalni ravni, temveč na ravni hrbtenjače in periferno ter neodvisno od pretoka krvi. Pri tem je treba poudariti, da je raven CA zaradi omejitev metodologije vedno ocenjena med izometričnimi kontrakcijami, zato lahko le predpostavljamo, da je vzorec spremembe enak tudi med izvajanjem dinamičnih kontrakcij. Povečano centralno utrufanje med ishemično vadbo sicer posredno potrjujejo tudi višje subjektivne ocene napora in utrufenosti, o katerih so poročali preiskovanci nekaterih raziskav (25, 27). Na različne ugotovitve teh raziskav so lahko vplivale razlike v stopnji motivacije vadečih, saj so pri visoko motiviranih posameznikih zmanjšane proizvedene sile v glavnem posledica poslabšanja kontraktilne funkcije mišice (22). Tudi Cook in sodelavci (4) opozarjajo, da je upad v ravni CA pri redno telesno dejavnih posameznikih manjši kot pri netreniranih. Raziskave, ki so bile narejene na športnikih (4, 25), lahko torej podcenijo resnični vpliv centralnega utrufanja pri slabše telesno pripravljenih ljudeh.

Manj je znanega o regeneraciji mišične aktivacije po ishemični vadbi. V dveh raziskavah (25, 27) poročajo o hitri normalizaciji maksimalne mišične sile in EMG amplitude takoj po ishemični vadbi (približno 2 minuti), v eni raziskavi (22) pa je aktivacija mišice ostala pomembno znižana še 20 minut po vadbi. To kaže, da je vpliv ishemične vadbe na raven hotene mišične aktivacije in živčno-mišično utrufenost sicer odpravljen kmalu po

reperfuziji, vendar je kljub temu večji kot med enako vadbo brez ishemije.

ZAKLJUČEK

Izsledki pregledanih raziskav kažejo, da ishemična vadba proti majhnemu upor vpliva na povečanje hotene aktivacije skeletnih mišic. Mišična aktivacija je sicer najintenzivnejša, kadar mišice krčimo proti velikemu mehanskemu upor ($\geq 65\%$ 1 RM), vendar jo z oviranjem pretoka krvi v aktivnih skeletnih mišicah lahko pomembno povečamo tudi med vadbo proti majhnemu upor (od 20 do 30 % 1 RM). Pri dani intenziteti in količini vadbe se mišična aktivacija in utrufenost razlikujeta tudi v odvisnosti od stopnje okluzije. Kaže, da je za optimalne učinke ishemične vadbe potrebna 60- do 80-odstotna arterijska okluzija, višji okluzijski tlaki pa imajo lahko tudi dolgotrajne negativne učinke na mišično aktivacijo. Na učinke ishemične vadbe vpliva tudi več drugih dejavnikov, vključno s številom, fazo in vrsto mišične kontrakcije, sestavo mišice oziroma mišične skupine, dolžino odmora ter reperfuzije med vadbo in fizikalnih lastnosti napihljive manšete. Ishemična vadba pospeši tako periferno kot centralno utrufanje, kar je zelo verjetno pomemben sprožilec trajnih pozitivnih prilagoditev motoričnega sistema na vadbo, zato je ishemična vadba proti majhnemu upor lahko učinkovit nadomestek za standardno vadbo proti velikemu upor, zlasti kadar je ta zaradi okvare sklepa neizvedljiva ali kontraindicirana. V klinični fizioterapevtski praksi je njena uporaba primerna predvsem v začetni fazi krepitve mišic po poškodbah sklepov zgornjih in spodnjih udov. Za potrditev učinkovitosti ishemične vadbe proti majhnemu upor za trajno izboljšanje mišične aktivacije so potrebne nadaljnje raziskave z vključenostjo obeh spolov.

LITERATURA

1. Hvid LG, Strotmeyer ES, Skjødt M, Magnussen LV, Andersen M, Caserotti P (2016). Voluntary muscle activation improves with power training and is associated with changes in gait speed in mobility-limited older adults - a randomized controlled trial. *Exp Gerontol* 80: 51–6.
2. Stackhouse SK, Dean JC, Lee SC, Binder-MacLeod SA (2000). Measurement of central activation failure of the quadriceps femoris in healthy adults. *Muscle Nerve* 23(11): 1706–12.
3. Taylor JL, Gandevia SC (2008). A comparison of central aspects of fatigue in submaximal and

- maximal voluntary contractions. *J Appl Physiol* 104(2): 542–50.
4. Cook SB, Murphy BG, Labarbera KE (2013). Neuromuscular function after a bout of low-load blood flow-restricted exercise. *Med Sci Sports Exerc* 45(1): 67–74.
 5. 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.
 6. Faryal Z, Radha B, Gabrielle G, Lily G, Aliza B (2017). The physiological basis of neuromuscular fatigue during high intensity exercise. *STEM Fellowship J* 3(2): 1–3.
 7. Ilett MJ, Rantalainen T, Keske MA, May AK, Warmington SA (2019). The effects of restriction pressures on the acute responses to blood flow restriction exercise. *Front Physiol* 10: 1018.
 8. Pearson SJ, Hussain SR (2015). A review on the mechanisms of blood-flow restriction resistance training-induced muscle hypertrophy. *Sports Med* 45(2): 187–200.
 9. Henneman E (1985). The size-principle: a deterministic output emerges from a set of probabilistic connections. *J Exp Biol* 115: 105–12.
 10. Enoka RM (1995). Neuromechanical basis of kinesiology. *Med Sci Sport Exerc* 27(11): 1578.
 11. Folland JP, Williams AG (2007). Methodological issues with the interpolated twitch technique. *J Electromyogr Kinesiol* 17(3): 317–27.
 12. Zarkou A, Stackhouse S, Binder-Macleod SA, Lee SCK (2017). Comparison of techniques to determine human skeletal muscle voluntary activation. *J Electromyogr Kinesiol* 36: 8–15.
 13. Špenko M (2018). Vpliv različnih fizioterapevtskih metod na zavestno aktivacijo mišice quadriceps femoris po pretrganju sprednje križne vezi. *Fizioterapija* 26(2): 24–32.
 14. Merton PA (1954). Voluntary strength and fatigue. *J Physiol* 123(3): 553–64.
 15. Maffiuletti NA, Barbero M, Cescon C, Clijsen R, Beretta-Piccoli M, Schneebeli A, et al. (2016). Validity of the twitch interpolation technique for the assessment of quadriceps neuromuscular asymmetries. *J Electromyogr Kinesiol* 28: 31–6.
 16. Frissora KN (2014). Reliability of Measuring Voluntary Quadriceps Activation Using the Burst Superimposition and Interpolated Twitch Techniques. *Magistrsko delo*. Toledo: The University of Toledo.
 17. Yasuda T, Loenneke JP, Thiebaut RS, Abe T (2012). Effects of blood flow restricted low-intensity concentric or eccentric training on muscle size and strength. *PLoS One* 7(12): e52843.
 18. Kacin A, Rosenblatt B, Zargi T, Biswas A (2015). Safety considerations with blood flow restricted resistance training. *Annales Kinesiologiae*. 6: 3–26.
 19. Patterson SD, Hughes L, Warmington S, Burr J, Scott BR, Owens J, Abe T, Nielsen JL, Libardi CA, Laurentino G, Neto GR, Brandner C, Martin-Hernandez J, Loenneke J (2019). Blood flow restriction exercise: considerations of methodology, application, and safety. *Front Physiol* 10 (533): 1–15.
 20. Downs ME, Hackney KJ, Martin D, Caine TL, Cunningham D, O'Connor DP, et al. (2014). Acute vascular and cardiovascular responses to blood flow-restricted exercise. *Med Sci Sports Exerc* 46(8): 1489–97.
 21. Fatela P, Reis JF, Mendonca GV, Avela J, Mil-Homens P (2016). Acute effects of exercise under different levels of blood-flow restriction on muscle activation and fatigue. *Eur J Appl Physiol* 116(5): 985–95.
 22. Copithorne DB, Rice CL (2020). Neuromuscular function and blood flow occlusion with dynamic arm flexor contractions. *Med Sci Sports Exerc* 52(1): 205–13.
 23. Wernbom M, Järrebring R, Andreasson MA, Augustsson J (2009). Acute effects of blood flow restriction on muscle activity and endurance during fatiguing dynamic knee extensions at low load. *J Strength Cond Res* 23(8): 2389–95.
 24. Ishizaka H, Uematsu A, Mizushima Y, Nozawa N, Katayanagi S, Matsumoto K, et al. (2019). Blood flow restriction increases the neural activation of the knee extensors during very low-intensity leg extension exercise in cardiovascular patients: a pilot study. *J Clin Med* 8(8): 1252.
 25. Husmann F, Mittlmeier T, Bruhn S, Zschorlich V, Behrens M (2018). Impact of blood flow restriction exercise on muscle fatigue development and recovery. *Med Sci Sports Exerc* 50(3): 436–46.
 26. Fatela P, Reis JF, Mendonca GV, Freitas T, Valamatos MJ, Avela J, et al. (2018). Acute neuromuscular adaptations in response to low-intensity blood-flow restricted exercise and high-intensity resistance exercise: are there any differences? *J Strength Cond Res* 32(4): 902–10.
 27. Kjeldsen SS, Næss-Schmidt ET, Hansen GM, Nielsen JF, Stubbs PW (2019). Neuromuscular effects of dorsiflexor training with and without blood flow restriction. *Heliyon* 5(8): e02341.
 28. Karabulut M, Cramer JT, Abe T, Sato Y, Bemben MG (2010). Neuromuscular fatigue following low-intensity dynamic exercise with externally applied vascular restriction. *J Electromyogr Kinesiol* 20(3): 440–7.
 29. Labarbera KE, Murphy BG, Laroche DP, Cook SB (2013). Sex differences in blood flow restricted

- isotonic knee extensions to fatigue. *J Sports Med Phys Fitness* 53(4): 444–52.
30. Kacin A, Strazar K (2011). Frequent low-load ischemic resistance exercise to failure enhances muscle oxygen delivery and endurance capacity. *Scand J Med Sci Sports* 21(6): 231–41.