



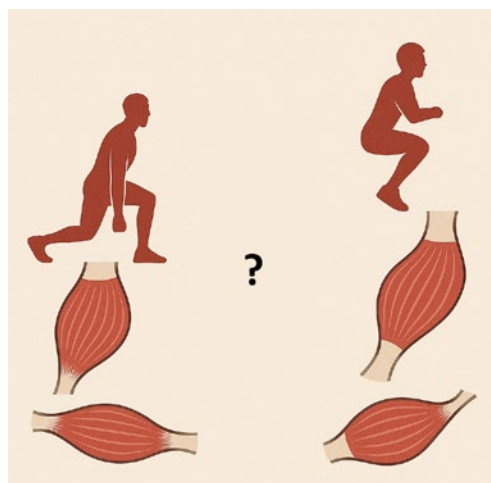
Matija Kodarin,
Žiga Kozinc

Primerjava dolgoročnih učinkov različnih vrst ekscentrične in pliometrične vadbe na mišično arhitekturo

Izvleček

Vadbene intervencije, usmerjene v izboljšanje mišične zmogljivosti, povzročajo arhitekturne spremembe mišično-tetivnega kompleksa, vključno s spremembami dolžine mišičnih fasciklov, penacijskega kota, debeline in volumna mišic. Z različnimi pristopi, kot sta ekscentrična in pliometrična vadba, lahko ciljno vplivamo na arhitekturne prilagoditve. Namen pregleda je bil primerjati učinke ekscentrične in pliometrične vadbe na mišično arhitekturo. Sistematično smo pregledali podatkovno zbirko PubMed (Medline) in vključili eksperimentalne raziskave, ki so proučevale dolgoročne učinke ekscentrične ali pliometrične vadbe. V končno analizo smo zajeli deset raziskav, objavljenih med letoma 2009 in 2024. Ugotovitve kažejo, da visoko intenzivna ekscentrična vadba z večjim številom ponovitev in počasnim tempom izvedbe do odpovedi ali blizu te povečuje dolžino fasciklov. Po drugi strani pliometrična vadba nakazuje, da pogostejša in intenzivnejša vadba v krajšem časovnem obdobju vodi do izrazitejšega povečanja v dolžini fasciklov v primerjavi z manj intenzivno vadbo. Ekscentrična vadba je povezana z zmanjšanjem penacijskega kota, medtem ko pliometrična vadba kaže trend njegovega povečanja. Daljše izvajanje ekscentrične vadbe z večjim številom vadbenih enot tedensko vodi do povečanja mišične debeline in volumna, medtem ko lahko pliometrična vadba z večjo količino skokov prav tako pozitivno vpliva na njeno povečanje. Pregled literature nakazuje usmerjenost obeh vadbenih metod k specifičnim arhitekturnim prilagoditvam, vendar so za natančnejšo opredelitev vadbenih parametrov potrebne nadaljnje raziskave, ki bodo odpravile nekatere metodološke pomanjkljivosti dozdajšnjih študij.

Glavne besede: penacijski kot, dolžina fasciklov, mišični volumen in debelina, ekscentrična vadba, pliometrična vadba.



Comparison of the Long-Term Effects of Different Types of Eccentric and Plyometric Exercise on Muscle Architecture

Abstract

Training interventions aimed at enhancing muscle performance induce architectural changes in the muscle-tendon complex, including alterations in fascicle length, pennation angle, muscle thickness, and muscle volume. Through different approaches, such as eccentric and plyometric training, it is possible to target architectural adaptations. This review compares the effects of eccentric and plyometric training on muscle architecture. A systematic search of the PubMed (Medline) database identified experimental studies examining the long-term effects of these training modalities. Ten studies published between 2009 and 2024 met the inclusion criteria. Findings indicate that high-intensity eccentric training with a higher number of repetitions and a slow execution tempo, performed to or near failure, increases fascicle length. In contrast, plyometric training appears to lead to greater increases in fascicle length when performed more frequently and at higher intensity over a shorter period, compared to lower-intensity protocols. Eccentric training is associated with a decrease in pennation angle, whereas plyometric training shows a trend toward increasing it. Additionally, longer-term eccentric training, combined with a higher number of weekly sessions, leads to increases in muscle thickness and volume, while plyometric training with a greater volume of jumps may also have a positive effect on these outcomes. The literature review suggests that both training methods elicit specific architectural adaptations. However, further research is needed to precisely define training parameters while addressing some methodological limitations present in existing studies.

Keywords: pennation angle, fascicle length, muscle volume and thickness, eccentric exercise, plyometric exercise.

■ UVOD

S programi vadbe proti uporabi običajno želimo doseči spremembe v mišični zmogljivosti (povečanje mišične jakosti in moči) ali povečanje mišične mase (Phillips in Winett, 2010; Ünlü idr., 2020). Pomembne spremembe se po tovrstni vadbi zgodijo tudi glede arhitekture mišično-tetivnega kompleksa (dolžina mišičnih fasciklov, penacijski kot, debelina ter volumen mišice (Blazevich idr., 2007; Seynnes idr., 2007). Dolžina fasciklov opisuje dolžino mišičnih vlaken in je ključna za gibljivost. Poleg tega je povezana s hitrostjo krčenja mišice (Blazevich idr., 2007). Penacijski kot je kot, pod katerim so mišična vlakna pritrjena na tetivo in ki vpliva na smer ter učinkovitost prenosa sile iz mišice na tetivo (Wickiewicz idr., 1983). Mišice z daljšimi vlakni in večjim penacijskim kotom lahko proizvedejo večjo silo in moč (Blazevich idr., 2007). V ozadju tega je dejstvo, da imajo daljša vlakna več zaporedno povezanih sarkomer, kar omogoča večjo hitrost krčenja, medtem ko večji penacijski kot omogoča večje število mišičnih vlaken pri danem prečnem preseku mišice, kar pomeni večja zmogljivost za ustvarjanje mišične sile (Lieber in Fridén, 2000). Mišična sila je opredeljena kot napetost, ki jo mišična vlakna proizvedejo med kontrakcijo. Njena velikost je odvisna od dolžine mišice, hitrosti krčenja ter aktivacije in rekrutacije motoričnih enot (Feher, 2012). Debelina mišice se nanaša na razdaljo med povrhnjo in globoko aponevrozo, torej pravokotno razdaljo med zgornjim in spodnjim robom mišice, medtem ko se volumen mišice nanaša na skupno količino mišičnega tkiva v določenem anatomskem območju ter se običajno izračuna iz površine prečnega preseka in dolžine mišice (Maughan idr., 1983). Parametre mišične arhitekture najlažje pridobimo z uporabo slikovnih tehnik, kot sta ultrazvočno slikanje in magnetna resonanca, s čimer lahko učinkovito spremljamo spremembe v mišični arhitekturi med vadbenimi intervencijami in po njih (Eby idr., 2013; Pillen idr., 2009).

Učinkovitost vadbenih intervencij je odvisna od številnih dejavnikov, vključno z izbiro in vrstnim redom vaj, dolžino odmora med serijami, količine vadbe

(skupno število tednov), pogostostjo vadbenih enot (število vadbenih dni na teden), intenzivnostjo vadbe, vrsto mišičnih kontrakcij in tempom izvajanja vaj (Kraemer in Ratamess, 2004; Seger idr., 1998).

Intenzivnost vadbe je opredeljena kot objektivna ali subjektivna mera stopnje napora, vloženega med telesno dejavnostjo (Hofmann in Tschakert, 2010). Objektivna mera za oceno intenzivnosti vadbe proti uporabi je pogosto izražena na podlagi največje mase bremena, ki jo je posameznik sposoben premagati v eni ponovitvi (angl. one repetition maximum; 1RM) (Hoeger idr., 1987, 1990). Subjektivna mera pa temelji na posameznikovi zaznavi napora (angl. perceived rate of exertion; RPE), ki jo ta oceni na lestvici od 1 do 10 (Helms idr., 2016; Zourdos idr., 2016).

Mišično kontrakcijo lahko glede na vrsto gibanja razdelimo na izometrično in izotonično kontrakcijo, ki jo nadalje delimo na koncentrično, ekscentrično in ekscentrično-koncentrično kontrakcijo (EKK) (Gash idr., 2025). Pri izometrični kontrakciji mišica proizvaja silo brez spremembe dolžine mišično-tetivnega kompleksa, medtem ko izotonična kontrakcija vključuje spremembo dolžine mišice. Ta zajema koncentrično kontrakcijo, kjer se mišica skrajša in omogoča premik sklepa, ter ekscentrično kontrakcijo, ki vključuje podaljševanje mišice ob hkratni produkciji sile, kar omogoča nadzorovano zaviranje in absorpcijo mehanske energije (Franchi idr., 2017; Konow in Roberts, 2015). Po drugi strani je za EKK značilen neposredni prehod med ekscentrično in koncentrično kontrakcijo, izveden brez odmora ali sprostitve mišične napetosti (Davies idr., 2015).

Pomemben vidik izotoničnih kontrakcij je tako imenovani tempo izvajanja, ki označuje trajanje posameznih faz giba in morebitne prekinitev med njimi, kar neposredno vpliva na čas pod napetostjo in s tem na kumulativno mehansko obremenitev mišic (Schoenfeld idr., 2015). Tempo je tesno povezan s hitrostjo izvedbe, saj počasnejši tempo pomeni manjšo hitrost gibanja. Tako je lahko izvedba giba nadzorovana in upočasnjena (npr. tri sekunde ekscentrične faze) ali maksimalno

eksplozivna, pri čemer posameznik skuša gib izvesti z največjo mogočo hitrostjo, zlasti v koncentrični fazi (Wilk idr., 2021). Poleg tega ima lahko nadzor tempa neposreden vpliv na izkoriščanje cikla raztezanja in skrajševanja, ki je razviden med pliometrično vadbo (npr. odmor med ekscentrično in koncentrično fazo prepreči njen izkoristek) (Davies idr., 2015).

Pliometrična vadba temelji na mehanizmu cikla raztezanja in skrajševanja (angl. stretch-shortening cycle), ki vključuje zaporedje hitrih ekscentrično-koncentričnih kontrakcij (Davies idr., 2015; Komi, 2000; Seiberl idr., 2021). Cikel raztezanja in skrajševanja je sestavljen iz treh faz: (1) ekscentrična faza, v kateri pride do raztezanja agonistične mišice, refleksnega odziva ter shranjevanja elastične energije v mišičnem in vezivnem tkivu; (2) amortizacijska faza, ki pomeni prehod med ekscentrično in koncentrično kontrakcijo – ta faza mora biti čim krajša (približno ≤ 250 ms), saj se v nasprotnem primeru učinkovitost prenosa elastične energije zmanjša (Bobbett idr., 1996); (3) koncentrična faza, pri kateri se elastična energija sprosti ter mišica proizvede največjo silo in moč.

Ključni del takšne kontrakcije je učinkovito izkoriščanje elastičnih lastnosti mišično-tetivnega kompleksa v kombinaciji z refleksnim odzivom. Elastične lastnosti mišice omogočajo skladiščenje in sproščanje elastične energije (Aura in Komi, 1987), medtem ko refleksni odziv dodatno poveča proizvedeno silo, saj hitro raztezanje mišice vzdraži mišična vretena in sproži kontrakcijo agonista (Hryvniak idr., 2021). Mehanizem refleksnega odziva je razviden na primeru patelnarnega refleksa, pri katerem udarec po tetivi povzroči hiter razteg in refleksno krčenje mišic iztegovalk kolenskega sklepa (Beck idr. 2015).

Pliometrične vaje tako ločimo na podlagi trajanja izvedbe, ki ga opredeljuje uporaba refleksnega odziva. Pri vajah z refleksnim odzivom je značilen izjemno hiter prehod med ekscentrično in koncentrično fazo, kar se v praksi kaže kot kratek čas stika s podlago (npr. poskoki) (Hryvniak idr., 2021). Oblika vaje z refleksnim odzivom običajno traja ≤ 250 ms. Vaje z daljšim časom stika (> 250 ms) spadajo pod

počasni cikel raztezanja in skrajševanja, vendar se v širšem smislu pogosto še vedno štejejo za pliometrične (npr. skok z nasprotnim gibanjem) (Markovic in Mikulic, 2010).

Zaradi izkoriščanja prej omenjenih elastičnih lastnosti pliometrična vadba tako prispeva k večji hitrosti gibanja in razvoju moči (Kraemer in Newton, 2000). Poleg funkcionalnih učinkov povzroča tudi arhitekturne spremembe mišic, vključno s povečanjem mišične debeline in spremembami v dolžini mišičnih fasciklov (Ramírez-delaCruz idr., 2022).

Ekscentrična kontrakcija, ki v okviru cikla raztezanja in skrajševanja omogoča shranjevanje elastične energije in aktivacijo refleksnega odziva, se opredeljuje tudi kot del samostojne vadbe. V praksi gre pogosto za ekscentrično vadbo, ki temelji na ekscentrični kontrakciji mišice in pomeni učinkovito metodo za spodbujanje mišičnih prilagoditev, saj lahko s postopnim povečevanjem mehanske obremenitve mišičnega tkiva vodi do povečanja debeline mišice, dolžine fasciklov in sprememb v penacijskem kotu mišic (Franchi idr., 2017; Pincheira idr., 2022). Podaljšanje mišičnih fasciklov vodi do povečanja števila zaporedno razporejenih sarkomer (Blazevich idr., 2007). Daljši fascikli omogočajo, da se raztezna obremenitev porazdeli na več sarkomer, to pa zmanjša mehansko napetost posamezne sarkomere in prispeva k večji sposobnosti mišice za prenašanje raztezne sile (Morgan, 1990; Proske in Morgan, 2001). Poleg strukturnih prilagoditev ekscentrična vadba vpliva na živčno-mišični sistem z večjo rekrutacijo motoričnih enot, kar prispeva k izboljšanju ekscentrične jakosti in moči ter zmanjšanju tveganja za poškodbe (Duclay idr., 2008; Gérard idr., 2020; Vangsgaard idr., 2014).

Arhitekturne spremembe so odvisne od uporabljenih metod ekscentrične vadbe, ki se razlikujejo od prej omenjenih številnih dejavnikov in konteksta uporabe vaje (Burgos-Jara idr., 2023; Isner-Horobetti idr., 2013; Krentz idr., 2017; Markovic in Mikulic, 2010). Ločimo štiri glavne metode ekscentrične vadbe (Burgos-Jara idr., 2023): (1) nizko intenzivna, ki je pogosto uporabljena v rehabilitaciji in preventivi, se opredeljuje z intenzivnostjo do 40 %

koncentričnega dela 1 RM in do 4 RPE; (2) srednje intenzivna, ki se uporablja v srednji ali pozni fazi rehabilitacije ter v kontekstu preventive in športne zmogljivosti. Ta vključuje tudi pliometrične vaje brez cikla raztezanja in skrajševanja (npr. nizko intenzivni poskoki, pospeševanja, zaviranja gibanja), z intenzivnostjo do 40–60 % koncentričnega 1 RM in RPE med 4–6; (3) submaksimalno intenzivna, ki vključuje pliometrične vaje cikla raztezanja in skrajševanja ter izolirane submaksimalne ekscentrične vaje (npr. nordijski spust do odpovedi). Njena uporaba je namenjena predvsem razvoju mišične moči in jakosti v okviru vrnitve v šport, preprečevanju poškodb in povečanju športne zmogljivosti pri treniranih posameznikih. Intenzivnost je opredeljena na ravni 60–90 % koncentričnega 1 RM in RPE med 6–8; (4) maksimalna in supramaksimalna intenzivnost, ki je namenjena predvsem izboljšanju športne zmogljivosti. Zanj so značilne predvsem visoko intenzivne večsklepne in pliometrične vaje, ki uporabljajo obremenitve pri 90–140 % koncentričnega 1 RM in RPE nad 8.

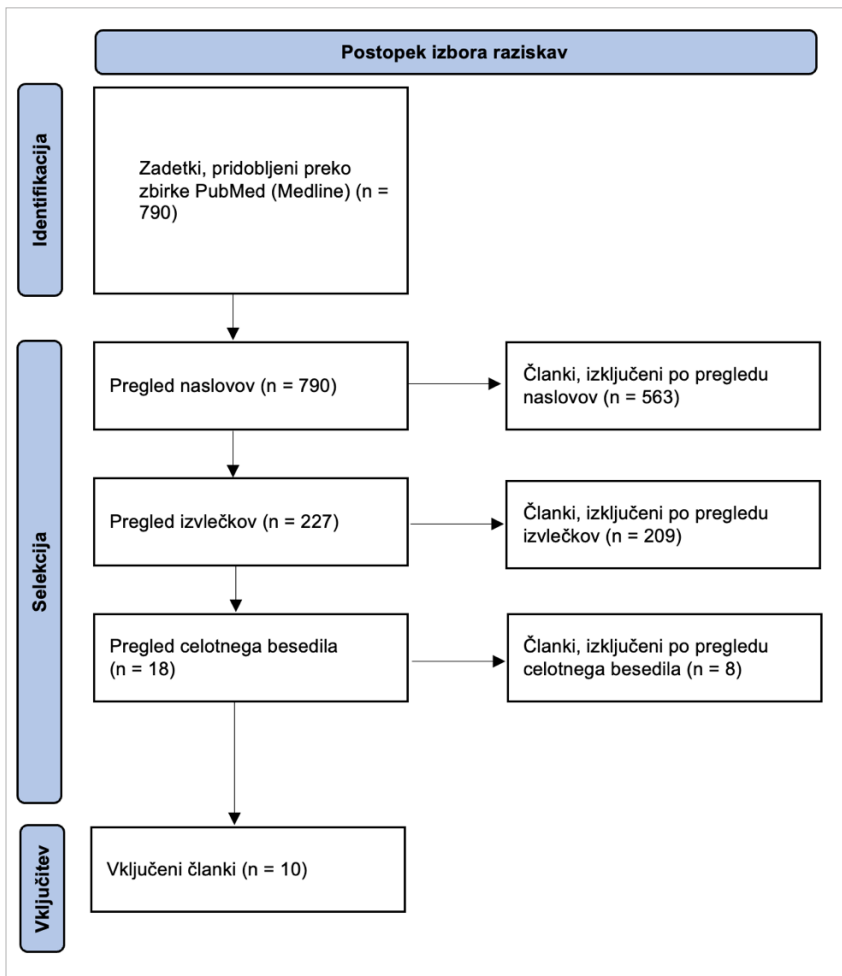
Razumevanje učinkov obeh vadbenih metod na mišično arhitekturo, ki vključuje dolžino fasciklov, penacijski kot ter volumen in debelino mišic, je pomembno za razvoj in prilagoditev preventivnih vadbenih programov. Cilj našega sistematičnega pregleda je primerjava raziskav, v katerih so proučevali vpliv dolgoročnega učinka submaksimalne ekscentrične vadbe, ki vključuje izolirano ekscentrično kontrakcijo, ter pliometrične vadbe, izvedene s ciklom raztezanja in skrajševanja ter brez njega, na mišično arhitekturo. S primerjavo teh dveh metod, pogosto uporabljenih v preventivi in rehabilitaciji po poškodbah, želimo ugotoviti, kako se njuni učinki razlikujejo glede na strukturne prilagoditve v mišični arhitekturi. To nam omogoča bolj ciljno usmerjeni pristop pri načrtovanju intervencij za preprečevanje poškodb ter izboljšanje gibalnih in funkcionalnih sposobnosti posameznikov in pri globljem razumevanju konteksta uporabe posameznih intervencij.

■ METODE

Podatkovne zbirke smo pregledali v zbirki PubMed (Medline). Za iskanje smo uporabili naslednji iskalni niz: (plyometric* OR eccentric*) AND (elastography OR "muscle architecture" OR "cross sectional area" OR "fascicle length" OR "penetration angle" OR "muscle thickness"). Iskalni niz je bil oblikovan z uporabo logičnih operatorjev in ustreznih ključnih besed. Pregledali smo raziskave, objavljene do 24. decembra 2024. V končni pregled smo vključili članke, objavljene v angleškem jeziku, ki so proučevali vpliv ekscentrične ali pliometrične vadbe na dolžino fasciklov, penacijski kot, debelino mišice in volumen mišice. Izključitveni kriteriji so zajemali raziskave, ki so proučevale akutne učinke intervencije, raziskave, ki so proučevale trajanje intervencije manj kot šest tednov, raziskave, ki niso proučevale vadbe na rekreativnih športnikih ali aktivnih posameznikih, ter raziskave, ki niso merile arhitekturnih parametrov v mirovanju. Po upoštevanju vseh vključenih in izključenih kriterijev smo v končni pregled vključili štiri randomizirane kontrolirane raziskave in šest drugih eksperimentalnih raziskav. Natančnejši postopek izbora raziskav je predstavljen na Sliki 1.

■ REZULTATI

V sistematični pregled literature smo vključili štiri randomizirane kontrolirane raziskave, ki so bile objavljene med letoma 2009 (Potier idr., 2009) in 2020 (Marušič idr., 2020), ter šest eksperimentalnih raziskav, ki so bile objavljene med letoma 2018 (Ullrich idr., 2018) in 2024 (Andrews idr., 2024). Število udeležencev v raziskavah se je gibalo med osem (Monti idr., 2020) in 34 (Marušič idr., 2020). Vzorec so sestavljali predvsem rekreativni športniki, stari od 18 do 30 leti, ki so izvajali različne oblike ekscentrične vadbe (Andrews idr., 2024; Carmichael idr., 2022; Marušič idr., 2020; Potier idr., 2009; Seymore idr., 2017; Timmins idr., 2016) in pliometrične vadbe (Fouré idr., 2011; Kudo idr., 2020; Monti idr., 2020; Ullrich idr., 2018). Šest raziskav je proučevalo vpliv ekscentrične vadbe na dolžino fasciklov in penacijski



Slika 1: Diagram poteka pregleda literature po sistemu PRISMA

kot (Andrews idr., 2024; Carmichael idr., 2022; Marušič idr., 2020; Potier idr., 2009; Seymore idr., 2017; Timmins idr., 2016), tri na debelino mišice (Carmichael idr., 2022, 2022; Marušič idr., 2020) in dve na volumen mišice (Andrews idr., 2024; Seymore idr., 2017) v zadnjih stegenskih mišicah. Nobena raziskava ni neposredno primerjala učinkov ekscentrične in pliometrične vadbe.

Dve raziskavi sta proučevali vpliv pliometrične vadbe na dolžino fasciklov in penacijski kot v sprednjih stegenskih mišicah (Fouré idr., 2011; Kudo idr., 2020) in dve v mečnih mišicah (Monti idr., 2020; Ullrich idr., 2018). Ena raziskava je proučevala vpliv pliometrične vadbe na debelino mišice (Kudo idr., 2020) in ena na volumen mišice (Monti idr., 2020). Intervencije v raziskavah so trajale od šest (Carmichael idr., 2022; Marušič idr., 2020; Monti idr., 2020; Timmins idr., 2016;

Ullrich idr., 2018) do 14 tednov (Fouré idr., 2011).

Med raziskavami, pri katerih so proučevali ekscentrično vadbo, so v treh izvajali nordijski spust (Andrews idr., 2024; Marušič idr., 2020; Seymore idr., 2017), v dveh enonožni ekscentrični upogib kolenskega sklepa (Potier idr., 2009; Timmins idr., 2016), v eni enonožno ekstenzijo kolka s spustom na klop (Carmichael idr., 2022) in v eni enonožni izteg kolka z drsenjem po podlagi (Marušič idr., 2020). Pri pliometrični vadbi so raziskave vključevale različne tipe skokov, kot so globinski skoki, skoki iz počepa in skoki z nasprotnim gibanjem (Fouré idr., 2011), serijske skoke v obliki zaporednih poskokov na vadbeni napravi tramp trainer (Monti idr., 2020), skoke z nasprotnim gibanjem z dodatno obremenitvijo (Ullrich idr., 2018) ter hitre vzpone in spuste na prste (Kudo idr., 2020). Vse raziskave so proučevale učinke

intervencij z ultrazvokom pri posameznikih v mirovanju.

V skupini z ekscentrično vadbo so tri raziskave poročale o značilnem povečanju dolžine fasciklov v eksperimentalni skupini v primerjavi s kontrolno skupino (Marušič idr., 2020), in sicer v primerjavi z nasprotno (kontrolno) nogo (Carmichael idr., 2022), poleg tega pa tudi v primerjavi s skupino, ki je izvajala koncentrične kontrakcije (Timmins idr., 2016). V vseh raziskavah skupine z ekscentrično vadbo je intervencijska skupina pokazala značilno povečanje penacijskega kota v primerjavi z začetnimi meritvami (Andrews idr., 2024; Carmichael idr., 2022; Marušič idr., 2020; Potier idr., 2009; Seymore idr., 2017; Timmins idr., 2016). V skupini s pliometrično vadbo so tri raziskave poročale o značilnem povečanju dolžine fasciklov (Kudo idr., 2020; Monti idr., 2020; Ullrich idr., 2018), v primerjavi z nasprotno (kontrolno) nogo (Monti idr., 2020), začetnimi meritvami eksperimentalne skupine (Ullrich idr., 2018) in s skupino s počasnim tempom izvedbe (Kudo idr., 2020).

V skupini z ekscentrično vadbo so tri raziskave poročale o značilnem zmanjšanju penacijskega kota med eksperimentalno in kontrolno skupino (Marušič idr., 2020), skupino s koncentrično kontrakcijo (Timmins idr., 2016), nasprotno (kontrolno) nogo (Carmichael idr., 2022) v prid eksperimentalne skupine. V eni raziskavi so zaznali značilno povečanje penacijskega kota v primerjavi s kontrolno skupino (Seymore idr., 2017). V skupini s pliometrično vadbo sta dve raziskavi ugotovili značilno povečanje penacijskega kota (Monti idr., 2020; Ullrich idr., 2018). V skupini z ekscentrično vadbo sta dve raziskavi (Andrews idr., 2024; Seymore idr., 2017) poročali o značilnem povečanem volumnu mišice v prid eksperimentalne skupine. V skupini pliometrične vadbe je ena raziskava poročala o povečanem mišičnem volumnu (Monti idr., 2020) in ena raziskava o povečani mišični debelini (Kudo idr., 2020).

Podrobne značilnosti raziskav, ki so proučevale vpliv ekscentrične vadbe, so prikazane v Tabeli 1. Raziskave, ki so proučevale učinke pliometrične vadbe, so prikazane v Tabeli 2.

Tabela 1:
Značilnosti vključenih raziskav z ekscentrično vadbo

Avtor in leto	Značilnosti preiskovancev	Intervencija	Intenzivnost	Količina / pogostost / ponovitve	Mere izida	Ugotovitve intervencij
Marušič idr., 2020	n = 24 M/10 Ž; n1 = 18; n2 = 16; s1 = 24,2 (2,1); s2 = 23,0 (2,8); aktivni posamezniki	Nordijski spust v 75° upogiba kolka + enonožni izteg kolka z drsenjem po podlagi (angl. glider); primerjava s kontrolno skupino	Lastna teža s 3–5 sekundami ekscentrične kontrakcije; če so poročali o RPE < od 8, dodatek: 1. vaja: 5–10 kg in 2. vaja: 8–20 kg	6 tednov; 2-krat tedensko; 2 seriji; 5–8 ponovitev; z vsakim tednom progresija serij in ponovitev	ZSM: debelina mišice, dolžina fasciklov, penacijski kot dolge glave biceps femoris; merjeno z UZ v mirovanju	Brez SZI v debelini mišic med ES in KS (p > 0,05); brez SZI v ES z 1,97 ± 0,34 cm na 2,09 ± 0,31 cm (p > 0,05) ↑ dolžina fasciklov v prid ES v primerjavi s KS (p < 0,05); ↑ ES s 7,74 ± 0,82 cm na 8,32 ± 0,85 cm (p < 0,001) ↓ penacijski kot v prid ES v primerjavi s KS (p < 0,05); ↓ ES s 13,91 ± 2,95° na 12,32 ± 2,39° (p < 0,001)
Timmins idr., 2016	n = 28 M; n1 = 14; n2 = 14; s1 = 21,2 (2,7); s2 = 23,4 (5,1); rekreativni športniki	Enonožni ekscentrični upogib kolenskega sklepa sede na izokinetičnem dinamometru; primerjava s koncentrično kontrakcijo	Število ponovitev do odpovedi	6 tednov; 2–3-krat tedensko; 4–6 serij; 6–8 ponovitev; 30 sekund odmora med ponovitvami	ZSM: debelina mišice, dolžina fasciklov, penacijski kot dolge glave biceps femoris; merjeno z UZ v mirovanju, slikanje B-mode (frekvenca: 12 MHz)	Brez SZI v debelini mišic med ES in KS (p > 0,05); brez SZI v ES z 2,69 ± 0,2 cm na 2,91 ± 0,2 cm (p > 0,05) ↑ dolžina fasciklov med ES in KS (p < 0,05); ↑ ES s 11,53 ± 0,6 cm na 13,42 ± 0,8 cm (p < 0,001) ↓ penacijski kot v prid ES v primerjavi s KS (p < 0,05); ↓ ES s 13,52 ± 1,2° na 12,50 ± 1,2° (p < 0,05)
Potier idr., 2009	n = 6 M/16 Ž; n1 = 11; n2 = 11; s1 = 29,6 (1,2); s2 = 27 (0,8); populacija ni opredeljena	Enonožni ekscentrični upogib kolenskega sklepa leže na izokinetični napravi (angl. leg-curl machine); primerjava s kontrolno skupino	5 sekund ekscentrične kontrakcije 1RM	8 tednov; 3-krat tedensko; 3 serije; 1–8 ponovitev; z vsakim tednom progresija ponovitev	ZSM: dolžina fasciklov, penacijski kot dolge glave biceps femoris; merjeno z UZ v mirovanju, slikanje B-mode (frekvenca: 13 MHz)	Brez SZI v dolžini fasciklov med ES in KS (p = 0,11); ↑ ES s 5,9 ± 0,3 cm na 7,8 ± 0,35 cm (p < 0,01) Brez SZI v penacijskem kotu med ES in KS (p > 0,05); brez SZI v ES s 17,1 ± 1,3° na 16,6 ± 1,1° (p = 0,38)
Seymore idr., 2017	n = 6 M/14 Ž; n1 = 10; n2 = 10; s1 = 18,3 (0,5); s2 = 19,9 (1,2); rekreativni športniki	Nordijski spust s partnerjem; primerjava s kontrolno skupino	Lastna telesna masa	6 tednov; 1–3-krat tedensko; 2–3 serije; 6–12 ponovitev; z vsakim tednom progresija serij in ponovitev	ZSM: volumen mišice, dolžina fasciklov, penacijski kot dolge glave biceps femoris; merjeno z UZ v mirovanju, slikanje B-mode	↑ Volumen mišice v prid ES v primerjavi s KS (p < 0,05); ↑ ES s 131,46 ± 43,31 cm3 na 145,2 ± 46,42 cm3 (p > 0,05) Brez SZI v dolžini fasciklov med ES in KS (p > 0,05); ↑ ES s 8,96 ± 1,23 cm na 9,07 ± 1,73 cm (p < 0,05) Brez SZI v penacijskem kotu med ES in KS (p > 0,05); ↑ ES s 13,6 ± 3,2 na 14,9 ± 2,7° (p < 0,05)
Andrews idr., 2024	n = 5 M/7 Ž; s M = 27,6 (4,1); s Ž = 26,5 (3,6); rekreativni športniki	Nordijski spust s partnerjem; brez kontrolne skupine	Lastna telesna masa	9 tednov; 3-krat tedensko; 4–5 serij; 6–8 ponovitev	ZSM: volumen mišice, dolžina fasciklov dolge glave biceps femoris; merjeno z UZ v mirovanju (frekvenca: 13 MHz)	↑ Volumen mišice za 8 % cm3 Brez SZI v dolžini fasciklov med ES in KS (p = 0,33); ↑ ES za 19 % v centralnem predelu in 33 % v distalnem predelu
Carmichael idr., 2022	n = 27 M; s1 = 22,2 ± 4,5 y; rekreativni športniki	Enonožna ekstenzija kolka s spustom na trenažerju v 30° (Roman chair); primerjava z nasprotno nogo	Lastna telesna masa; če so poročali o RPE < 8 od 10, dodatek 5 kg	6 tednov; 2-krat tedensko; 2–5 serij; 4 ponovitve; 5 sekund izvedbe; 90 sekund odmora med ponovitvami	ZSM: debelina mišice, dolžina fasciklov, penacijski kot dolge glave biceps femoris; merjeno z UZ v mirovanju	Brez SZI v debelini mišic med nogama; intervencijska noga z 2,0 ± 0,2 cm na 2,2 ± 0,3 cm ↑ Dolžina fasciklov v prid intervencijske noge (p < 0,001); ↑ ES s 7,7 ± 0,9 cm na 9,2 ± 1,1 cm Brez SZI v penacijskem kotu med nogama (p > 0,05); ↓ intervencijska noga s 15,4 ± 1,5° na 13,6 ± 2,0° (p < 0,05)

Legenda: n – število preiskovancev; n1 – število preiskovancev v eksperimentalni skupini 1; n2 – število preiskovancev v eksperimentalni skupini 2 ali kontrolni skupini; s – povprečna starost v letih; s1 – povprečna starost v letih v eksperimentalni skupini 1; s2 – povprečna starost v letih v eksperimentalni skupini 2 ali kontrolni skupini; ES – eksperimentalna skupina; ES1 – eksperimentalna skupina ena; ES2 – eksperimentalna skupina dve; ES3 – eksperimentalna skupina tri; KS – kontrolna skupina; M – moški; Ž – ženske; SZ – statistično značilno; UZ – ultrazvok; ↑ – statistično značilno povečanje; ↓ – statistično značilno zmanjšanje; RPE – vrednost posameznikove stopnje napora; 1RM – največja teža bremena, ki jo je posameznik sposoben premagati v eni ponovitvi; ZSM – zadnje stegenske mišice.

Tabela 2:

Značilnosti vključenih raziskav s pliometrično vadbo

Avtor in leto	Značilnosti preiskovancev	Intervencija	Intenzivnost	Količina / pogostost / ponovitve	Mere izida	Ugotovitve intervencij
Monti idr., 2020	n = 8 M; s = 25,3 ± 4,6; aktivni posamezniki	Poskoki na vadbeni napravi tramp trainer; brez kontrolne skupine	30 RM z dodatnim bremenom	6 tednov; 3-krat tedensko; 4–5 serij; 30 ponovitev; 20–25 minut intervencije; skupno število skokov: 2160–2700	SSM: volumen mišice, dolžina fasciklov, penacijski kot mišice vastus lateralis; merjeno z UZ v mirovanju	↑ Volumen s 593,22 ± 123,46 cm ³ na 648,70 ± 131,85 cm ³ (p < 0,05) ↑ Dolžina fasciklov s 7,79 ± 1,13 na 8,13 ± 1,17 cm (p < 0,01) ↑ Penacijski kot s 16,50 ± 1,42° na 17,46 ± 1,73° (p < 0,01)
Ullrich idr., 2018	n = 12 M/10 Ž; s = 24,3 ± 2,6; n1 = 11; rekreativni športniki	Skoki z nasprotnim gibanjem; primerjava s skupino z nestrukturirano periodizacijo	Breme 0, 15, 30 % telesne mase posameznika (stopnjevanje na 2 tedna)	6 tednov; 3-krat tedensko; 4–6 serij; 5 ponovitev; 40 minut intervencije; skupno število skokov: 540	SSM: debelina mišice, dolžina fasciklov, penacijski kot mišice vastus lateralis – center; merjeno z UZ v mirovanju (frekvenca: 7,5 MHz)	Brez SZI v debelini (p > 0,05) z 1,97 ± 0,32 cm na 2,17 ± 0,32 cm ↑ Dolžina fasciklov s 6,97 ± 0,77 cm na 7,12 ± 0,75 cm (p < 0,05) ↑ Penacijski kot s 16,50 ± 1,74° na 17,9 ± 2,00°
Fouré idr., 2011	n = 19 M; n1 = 9; n2 = 10; s1 = 18,8 ± 0,9; s1 = 18,9 ± 1,0; rekreativni športniki	Skok iz počepa, skok z nasprotnim gibanjem, globinski skok (35, 50 ali 65 cm); primerjava s kontrolno skupino	Stopnjevanje števila skokov ali višine	14 tednov; 2–3-krat tedensko; 34 vadbenih enot; 60 minut intervencije; skupno število skokov: 6800 (200–600 skokov na vadbeno enoto)	MM: dolžina fasciklov, penacijski kot medialne glave mišice gastrocnemius; merjeno z UZ v mirovanju	Brez SZI v dolžini fasciklov s 5,5 ± 0,6 na 5,9 ± 0,7 (p > 0,05) Brez SZI v penacijskem kotu s 24,4 ± 3,2° na 23,1 ± 2,2° (p > 0,05)
Kudo idr., 2020	n = 14 M/7 Ž; n1 = 11, n2 = 10; s1 = 21,2 ± 3,9; s2 = 19,6 ± 0,7; aktivni posamezniki	Vzpomi in spusti na prste s hitrim tempom izvedbe (60 vzponov na minuto); primerjava z nasprotno nogo z normalnim tempom izvedbe	Lastna telesna masa	12 tednov; 7-krat tedensko; 15 ponovitev / 3 serije / 2-krat dnevno; 84 vadbenih enot	MM: debelina mišice, dolžina fasciklov, penacijski kot medialne glave mišice gastrocnemius; merjeno z UZ v mirovanju (frekvenca: 12 MHz)	↑ Mišična debelina z 1,8 ± 0,23 cm na 1,96 ± 0,23 cm (p < 0,05) ↑ Dolžina fasciklov s 6,83 ± 0,81 cm na 7,45 ± 8,3 cm (p < 0,01) brez SZI v penacijskem kotu s 17,4 ± 2° na 16,9 ± 1,5° (p > 0,05)

Legenda: n – število preiskovancev; n1 – število preiskovancev v eksperimentalni skupini 1; n2 – število preiskovancev v eksperimentalni skupini 2 ali kontrolni skupini; s – povprečna starost v letih; s1 – povprečna starost v letih v eksperimentalni skupini 1; s2 – povprečna starost v letih v eksperimentalni skupini 2 ali kontrolni skupini; ES – eksperimentalna skupina; ES1 – eksperimentalna skupina ena; ES2 – eksperimentalna skupina dve; ES3 – eksperimentalna skupina tri; KS – kontrolna skupina; M – moški; Ž – ženske; SZ – statistično značilno; UZ – ultrazvok; ↑ – statistično značilno povečanje; ↓ – statistično značilno zmanjšanje; 1RM – največja teža bremena, ki jo je posameznik sposoben premagati v eni ponovitvi; SSM – sprednje stegenske mišice; MM – mečne mišice.

■ RAZPRAVA

Namen sistematičnega pregleda je bil proučiti dolgoročni vpliv ekscentrične in pliometrične vadbe na mišično arhitekturo ter primerjati njune učinke za ciljno usmerjene prilagoditve. Ugotovitve kažejo, da submaksimalna ekscentrična vadba z večjim številom ponovitev in počasnim tempom izvedbe, tj. do mišične odpovedi ali blizu nje, vodi k povečanju dolžine fasciklov. Po drugi strani pliometrična vadba kaže, da pogostejša in intenzivnejša vadba v krajšem časovnem obdobju vodi do izrazitejših sprememb v dolžini fasciklov v primerjavi z manj intenzivnimi pristopi. Individualno prilagojena in intenzivna ekscentrična vadba, izvajana do mišične odpovedi ali blizu nje, je povezana z zmanjšanjem penacij-

skega kota, medtem ko se po pliometrični vadbi kaže trend povečanja, vendar le pri sprednjih stegenskih mišicah. Poleg sprememb v dolžini fasciklov in penacijskem kotu so raziskave pokazale, da je ekscentrična vadba z večjim številom vadbenih enot povezana tudi s povečanjem mišičnega volumna, pri čemer ima ta ključno vlogo dolgotrajno izvajanje in postopno povečevanje intenzivnosti. Za pliometrično vadbo je zaradi omejenega števila raziskav težje navesti trdne sklepe, vendar se nakazuje, da večja količina skokov pozitivno vpliva na povečanje mišične debeline in volumna. Razumevanje teh učinkov omogoča boljše izbiro vadbenih metod za optimizacijo vadbenih parametrov, kot so intenzivnost, količina in tempo izvedbe vaj, z namenom ciljno usmerjenih sprememb v mišični

arhitekturi. Rezultati pregleda potrjujejo, da so prilagoditve mišične arhitekture tesno povezane z vadbenimi parametri, ne glede na to, ali gre za ekscentrično ali pliometrično vadbo. Za boljše razumevanje dolgoročnih učinkov obeh vadbenih metod bi bilo smiselno nadaljnje raziskovanje vadbenih parametrov na homogenih mišičnih skupinah, kar bi omogočilo še natančnejše in ciljno usmerjeno načrtovanje treningov v različnih populacijah.

Dolžina fasciklov

Ekscentrična vadba ima pozitiven učinek na podaljšanje dolžine fasciklov v zadnjih stegenskih mišicah. V raziskavi Timmins idr. (2016) so ugotovili povečanje dolžine fasciklov z 11,53 na 13,42 cm, v raziskavi Potier idr. (2009) s 5,7 na 6,68 cm, medtem

ko so v Marušič idr. (2020) poročali o povečanju s 7,4 cm na 8,32 cm. V omenjenih raziskavah so bile uporabljene submaksimalno intenzivne vadbene intervencije, pri katerih so udeleženci izvajali vaje z dodatnim bremenom do mišične odpovedi ali blizu nje. Podobno so ugotovili tudi avtorji sistematičnih pregledov Franchi idr. (2017) ter Pincheira idr. (2022). Ti so poročali, da ekscentrična vadba spodbuja podaljšanje fasciklov, kar je ključno za izboljšanje sposobnosti ustvarjanja sile.

Razlog za takšno učinkovanje ekscentrične vadbe je lahko večplasten. Učinek povečanja dolžine fasciklov je lahko posledica povečanja števila zaporedno razporejenih sarkomer (Pincheira idr., 2022). To spremembo najverjetneje sprožita velika intenzivnost in počasen tempo izvedbe vaj. Raziskave z najizrazitejšim učinkom so vključevale izvajanje ponovitev do odpovedi (Timmins idr., 2016), postopno napredovanje od ene do osmih ponovitev, določenih na podlagi največje mase bremena, ki jo je posameznik sposoben premagati v eni ponovitvi, s počasnim tempom izvedbe (do 5 sekund) (Potier idr., 2009), ter izvajanje od petih do osmih ponovitev z dodatnim bremenom in počasnim tempom izvedbe (do 5 sekund) (Marušič idr., 2020). V nasprotju z njimi so druge raziskave uporabile vadbo z lastno maso, kar udeležencem ni omogočilo doseganja intenzivnosti blizu 1 RM (Andrews idr., 2024; Carmichael idr., 2022; Seymore idr., 2017).

Če opazujemo samo intervencijsko skupino v vseh raziskavah z ekscentrično vadbo, lahko kljub temu opazimo, da se je v vseh skupinah podaljšala dolžina fasciklov. To kaže, da učinke izmerjenih rezultatov lahko pripisujemo tudi zadostni količini in pogostosti vadbe. Najdaljše intervencije sta imeli raziskavi Andrews idr. (2024), pri kateri so udeleženci devet tednov trikrat tedensko izvajali od štiri do pet serij na vadbeno enoto, ter Potier idr. (2009), v kateri so vadbeno intervencijo osem tednov izvajali trikrat tedensko, in sicer do tri serije na vadbeno enoto. V preostalih raziskavah so šest tednov dvakrat tedensko izvajali do tri serije na enoto, razen raziskave Carmichael idr. (2022), v kateri so izvajali do pet serij na vadbeno enoto. Učinki so bili primerljivi kljub veliki raznolikosti uporabljenih vaj. V raziskavah Andrews idr. (2024) ter Carmichael idr. (2022) so izvajali sonožno vajo

nordijskega spusta, medtem ko so v Timmins idr. (2016) ter Potier idr. (2009) izvajali enonožne vaje v odprti kinetični verigi na trenažerju. V raziskavi Marušič idr. (2020) so združili nordijski spust in enonožni izteg kolka z drsenjem po podlagi, kar je prav tako vodilo do statistično značilnih učinkov v primerjavi s kontrolno skupino.

Za dosego učinkovitih sprememb mišične arhitekture, zlasti za podaljšanje dolžine fasciklov, so ključni dejavniki izvajanje submaksimalno intenzivnih ekscentričnih vaj s počasnim tempom ter zadostna količina in pogostost izvajanja vadbe – ne glede na izbrano vrsto vaj. Povečanje dolžine fasciklov je verjetno posledica dodajanja sarkomer na koncih mišičnih vlaken, kjer se priključijo na kite, kar se zgodi med večjim raztegom dolžine mišice (Hryvniak idr., 2021). To se ujema z ugotovitvami Pincheira idr. (2022), ki so poročali, da je daljša dolžina fasciklov posledica povečanja števila zaporednih sarkomer.

O povečanju dolžine fasciklov pri pliometrični vadbi so poročali v večini študij, vendar v različnem obsegu, kar lahko kaže na vpliv izbire vaj, količine in intenzivnosti vadbene programa. Najizrazitejše povečanje dolžine fasciklov so ugotovili v študiji Kudo idr. (2020), v kateri se je dolžina fasciklov medialne glave mišice gastrocnemius s 6,83 povečala na 7,45 cm. Takšen učinek bi lahko bil posledica obsežnejše količine vadbene programa, ki je trajal 12 tednov, in pogostosti izvajanja vaj sedemkrat tedensko. Monti idr. (2020) so ugotovili podobne rezultate s povečanjem dolžine fasciklov sprednje stegenske mišice vastus lateralis s 7,79 na 8,13 cm, pri čemer je bila količina vadbene programa krajša (do šest tednov), vendar z veliko skupno količino skokov na vadbeno enoto (po 30 ponovitev in od štiri do pet serij).

Po drugi strani so Ullrich idr. (2018) zaznali manjše, a statistično značilno povečanje dolžine fasciklov sprednje stegenske mišice vastus lateralis s 6,97 na 7,12 cm, kar bi lahko kazalo na vpliv intenzivnosti vadbe, in ne toliko na količino. Prej omenjeni avtorji so izvajali manj ponovitev (do pet ponovitev) v posamezni vadbeni enoti, tudi vadbeni program je trajal manj (do šest tednov), vendar je bila izvedba vaj intenzivnejša, saj so izvajali skok z nasprotnim gibanjem s progresivnim dodajanjem bremena. Čeprav je bilo v raziskavi Ullrich idr. (2018) število ponovitev manjše kot v drugih raziskavah, je

bil rezultat vseeno statistično značilen, kar podpira domnevo, da ima tudi intenzivnost vadbe ključno vlogo pri povečanju dolžine fasciklov. V nasprotju s temi ugotovitvami Fouré idr. (2011) niso zaznali statistično značilne spremembe v dolžini fasciklov, čeprav je njihov program trajal 14 tednov ob izvedbi intenzivnih vaj – različne vrste skokov s progresivnim stopnjevanjem v ponovitvah in v višini. Razlog za ugotovljene rezultate bi lahko bila izbira mišične skupine za analizo mišične arhitekture – meritve so izvajali na mečnih mišicah, medtem ko so drugi avtorji, Ullrich idr. (2018) ter Monti idr. (2020), izvajali meritve na sprednjih stegenskih mišicah. Meritve mišične aktivnosti v skoku iz počepa in skoku z nasprotnim gibanjem, ki so jih izvajali v študiji Donahue idr. (2021), kažejo na večjo aktivacijo v sprednjih stegenskih mišicah kot v mečnih, kar lahko pojasni razlike v rezultatih.

Na podlagi rezultatov lahko sklepamo, da so prilagoditve dolžine fasciklov pri pliometrični vadbi odvisne tako od visoke intenzivnosti vaj, kot so skoki z dodatkom bremena, kot od skupne količine vadbene programa, predvsem v številu skokov in pogostosti izvajanja vadbe.

Penacijski kot

Raziskava avtorjev Timmins idr. (2016) je pokazala, da izvajanje ekscentrične vadbe do odpovedi zmanjša penacijski kot mišice dolge glave biceps femoris s 13,52 na 12,50°, kar nakazuje na strukturne prilagoditve mišic. Prav tako so zmanjšanje penacijskega kota opazili Carmichael idr. (2022) ter Marušič idr. (2020), kar bi lahko pripisali intenzivnejšim vadbenim protokolom, saj so vaje izvajali z večjimi obremenitvami – izraženimi kot velikost bremena – pogosto blizu mišične odpovedi. V raziskavi Marušič idr. (2020) so ugotovili statistično značilno zmanjšanje penacijskega kota v primerjavi s kontrolno skupino, medtem ko so Carmichael idr. (2022) poročali o zmanjšanju samo v nogi, ki je bila izpostavljena v intervenciji. Marušič idr. (2020) so izvajali dve vaji z visoko intenzivnostjo s počasnim tempom izvedbe, pri katerih je med izvedbo vaje subjektivna ocena napora presegla vrednost osem na lestvici posameznikove zaznave napora. Carmichael idr. (2022) pa so izvajali le enonožno ekstenzijo kolka s spustom na trenažerju, a z enako intenzivnostjo izvedbe vaj kot v raziskavi Marušič idr. (2020).

O nasprotnih rezultatih so poročali Seymore idr. (2017), saj vadbene intenzivnosti niso individualno prilagodili, temveč so za vse udeležence standardizirali število ponovitev in serij. Takšen neindividualizirani pristop bi lahko pojasnil povečanje penacijskega kota pri nekaterih posameznikih, saj so vaje morda izvajali pri manjših obremenitvah, kot bi jih sicer zmogli. Kljub tem spremembam raziskava ni zaznala statistično značilnih razlik v primerjavi s kontrolno skupino, temveč le izboljšanje v intervencijski skupini. Tudi Potier idr. (2009) niso opazili sprememb v penacijskem kotu, kljub izvajanju vadbe do odpovedi. Možen razlog za odsotnost prilagoditev bi lahko bila proučevana populacija, saj je bila sestavljena iz posameznikov, ki niso redno izvajali vadbe za spodnje okončine, kar bi lahko vplivalo na drugačen odziv mišic na vadbeno intervencijo. Timmins idr. (2016) so sicer izvajali vadbo do odpovedi, vendar so njihovi udeleženci že pred začetkom raziskave dosegali višjo osnovno raven telesne pripravljenosti, kar bi lahko dodatno prispevalo k izrazitejšim strukturnim spremembam.

Pri pliometrični vadbi so rezultati prav tako pokazali heterogenost pri poročanju o spremembah v penacijskem kotu. Raziskava Monti idr. (2020) je ugotovila povečanje penacijskega kota s 16,50 na 17,46°, medtem ko so v študiji Ullrich idr. (2018) poročali o povečanju s 16,50 na 17,9°. Obe raziskavi sta spremljali penacijski kot mišice vastus lateralis. Nasprotno sta avtorja Fouré idr. (2011) ter Kudo idr. (2020) pri medialni glavi mišice gastrocnemius zaznala rahlo, a statistično neznačilno zmanjšanje penacijskega kota. To lahko nakazuje, da so spremembe penacijskega kota bolj izražene pri določenih mišičnih skupinah, v našem primeru pri mišici vastus lateralis. Razlike med raziskavami bi lahko bile posledica tudi intenzivnosti in izbire vaj. V raziskavah Monti idr. (2020) ter Ullrich idr. (2018) so udeleženci izvajali vaje z dodatnim bremenom, pri čemer so bile izvedbe intenzivnejše in čas trajanja vadbe krajši. Nasprotno so v raziskavi Kudo idr. (2020) izvajali pliometrične vaje z lastno telesno maso, vendar v veliko večjem obsegu (12 tednov z dvema vadbenima enotama dnevno). Avtorji Fouré idr. (2011) so v raziskavi uporabili vaje, kot so skok iz počepa, globinski skok in skok z nasprotnim gibanjem, kar se ni pokazalo v povečanju penacijskega kota mečnih mišic. Morda bi bile spremembe

izrazitejše pri sprednjih stegenskih mišicah, zato bi bilo smiselno, da prihodnje raziskave proučijo arhitekturne spremembe tudi pri tej mišični skupini.

Volumen in debelina mišic

Raziskave kažejo, da ima vadba pomemben vpliv na mišični volumen, vendar se rezultati med študijami razlikujejo glede na izbiro vaj in količino vadbe. Raziskavi Andrews idr. (2024) ter Seymore idr. (2017) sta poročali o značilnem povečanju mišičnega volumna, kar se ujema z ugotovitvami avtorjev Bourne idr. (2018), ki so zaznali hipertrofični učinek pri zadnjih stegenskih mišic med izvajanjem nordijskega spusta. Presenetljivo, da tega učinka ni zaznala raziskava Marušič idr. (2020), ki je prav tako proučevala učinke nordijskega spusta. Morda je na rezultate poleg izbire vaj vplival tudi obseg vadbenih intervencij – predvsem pogostost izvedbe vadbe. V raziskavah Andrews idr. (2024) ter Seymore idr. (2017) so preiskovanci vadbo izvajali trikrat tedensko, pri čemer je Seymore idr. (2017) že v prvem tednu postopno stopnjeval obremenitev. Intervencija pri Andrews idr. (2024) je trajala devet tednov, pri Seymore idr. (2017) pa šest tednov. Nasprotno so v Carmichael idr. (2022) ter Marušič idr. (2020) vadbo izvajali le dvakrat tedensko, intervencija pa je v obeh primerih trajala šest tednov. Manjša pogostost vadbe in krajše trajanje, kar pomeni tudi manjši skupni obseg vadbe, bi lahko pojasnilo manj izrazite spremembe v mišičnem volumnu in debelini.

Zanimivo je, da avtorji Timmins idr. (2016) niso zaznali značilnega povečanja mišičnega volumna, čeprav je bila količina vadbe primerljiva z Andrews idr. (2024) ter Seymore idr. (2017). Razlog za to razliko bi lahko bila izbira vaj, saj so v Timmins idr. (2016) uporabili izokinetični dinamometer, pri katerem se mišične kontrakcije izvajajo z enakomerno hitrostjo. Takšna oblika vadbe lahko drugače vpliva na strukturne prilagoditve mišic v primerjavi z izotonično vadbo, ki so jo izvajali v preostalih raziskavah. Te razlike potrjujejo tudi rezultati raziskave Christine Eyre idr. (2024), v kateri so opazili, da se učinki izokinetične vadbe na mišično moč in uspešnost v skokih razlikujejo od učinkov izotonične vadbe, predvsem pri izokinetični vadbi, izvedeni pri manjši hitrosti.

Le tri raziskave s pliometrično vadbo so proučevale spremembe v mišični

debelini ali volumnu. Kudo idr. (2020) so ugotovili statistično značilno povečanje debeline medialne glave mišice gastrocnemius z 1,8 na 1,96 cm. V nasprotju z njihovimi ugotovitvami raziskava Ullrich idr. (2018) ni poročala o značilnem povečanju, kar lahko kaže, da je količina vadbe ključni dejavnik za spremembe v mišični debelini. V raziskavi Kudo idr. (2020) so namreč vadbo izvajali vsak dan 12 tednov, kar je precej večji obseg kot v študiji Ullrich idr. (2018), pri kateri so vadbo izvajali le trikrat tedensko šest tednov s progresivnim stopnjevanjem in skupnim številom 540 skokov. O podobnih rezultatih kot pri študiji Kudo idr. (2020) so poročali v raziskavi Monti idr. (2020), kjer so zaznali povečanje volumna mišice vastus lateralis. Udeleženci so izvajali vaje trikrat na teden z velikim številom ponovitev (do 30) in do mišične odpovedi, s skupnim številom skokov od 2160 do 2700.

Ti rezultati kažejo na pozitiven vpliv količine in pogostosti izvajanja vadbe pri spodbujanju mišične hipertrofije. Pri ekscentrični vadbi lahko opazimo trend izboljšanja v raziskavah, pri katerih so izvajali vadbeno intervencijo dalj časa in z večjim številom vadbenih enot na teden. Za pliometrično vadbo je sicer težje navesti jasne zaključke zaradi omejenega števila raziskav, vendar je mogoče opaziti trend, da večja količina skokov pozitivno vpliva na mišično debelino in volumen.

Pomanjkljivost našega sistematičnega pregleda je omejen vzorec preiskovancev, saj so bile vključene predvsem študije, ki so proučevale aktivne posameznike ali rekreativne športnike. Mišične prilagoditve bi lahko bile drugačne pri neaktivnih posameznikih ali drugih populacijskih skupinah, kot so starejši odrasli, kar omejuje posplošitev ugotovitev. Dodatna omejitev je heterogenost proučevanih mišičnih skupin, kar otežuje neposredno primerjavo rezultatov. Mišice se namreč razlikujejo po svojih osnovnih značilnostih, kot sta prečni presek in penacijski kot, ter arhitekturnih tipih (bipenatne, unipenatne, multi-penatne ali paralelne). Poleg tega številne raziskave niso vključevale kontrolnih skupin, kar otežuje oceno dejanskega vpliva intervencij. Med raziskavami se pojavljajo tudi razlike v protokolih vadbe (različne intenzivnosti, trajanje in frekvence vadbenih programov), kar zmanjšuje močnost neposredne primerjave učinkov. V

prihodnje bi bilo smiselno izvesti raziskave, ki bi proučevale enake mišične skupine pod vplivom različnih intervencij, saj bi to omogočilo boljše razumevanje prilagoditev v mišični arhitekturi. Prav tako bi vključitev kontrolnih skupin in standardiziranih vadbenih protokolov izboljšali zanesljivost in uporabnost ugotovitev.

■ ZAKLJUČEK

Za dosego dolgoročnih sprememb v mišični arhitekturi se kot učinkoviti izkazuje ekscentrična in pliometrična vadba, pri čemer so ključni dejavniki količina vadbe, pogostost izvedbe vadbenih enot ter intenzivnost in tempo izvedbe vaj. Na podlagi razpoložljive literature lahko sklenemo, da submaksimalno intenzivna ekscentrična vadba z večjim številom ponovitev in počasnim tempom izvedbe, do odpovedi ali blizu te, prispeva k povečanju dolžine fasciklov. Po drugi strani pliometrična vadba kaže, da pogostejša izvedba z večjo količino skokov in večjo intenzivnostjo v krajšem časovnem obdobju povzroči izrazitejšo spremembo v povečanju dolžine fasciklov v primerjavi z manj intenzivno vadbo. Ekscentrična vadba, izvajana do odpovedi ali blizu te, je povezana z zmanjšanjem penacijskega kota pri aktivnih posameznikih, medtem ko pliometrična vadba kaže trend povečanja kota, vendar le pri sprednjih stegenskih mišicah. Prav tako dolgotrajnejša ekscentrična vadba z večjim številom vadbenih enot na teden vodi do povečanja mišične debeline in volumna. Za pliometrično vadbo je zaradi omejenega števila raziskav težje navesti trdne zaključke, vendar je mogoče opaziti, da večja količina skokov pozitivno vpliva na povečanje mišične debeline in volumna. Zaradi nehomogenosti raziskav, ki se razlikujejo glede na preiskovane mišične skupine, stopnjo treniranosti posameznikov in prisotnost kontrolnih skupin, ostajajo natančno opredeljeni vadbeni parametri nejasni. Kljub temu pregled literature kaže na usmerjeni trend učinkovitosti ekscentrične in pliometrične vadbe, vendar so za jasno opredelitev vadbenih parametrov potrebne dodatne raziskave, ki bodo upoštevale omenjene pomanjkljivosti.

■ LITERATURA

- Andrews, M. H., S. A. P., Gurchiek, R. D., Pincheira, P. A., Chaudhari, A. S., Hodges, P. W., Lichtwark, G. A. in Delp, S. L. (2024). Multiscale hamstring muscle adaptations following 9 weeks of eccentric training. *Journal of Sport and Health Science*, 100996. <https://doi.org/10.1016/j.jshs.2024.100996>
- Aura, O. in Komi, P. V. (1987). Effects of Muscle Fiber Distribution on the Mechanical Efficiency of Human Locomotion*. *International Journal of Sports Medicine*, 08(S 1), S30–S37. <https://doi.org/10.1055/s-2008-1025701>
- Beck, T. W., Simmons, J. L., in Defreitas, J. M. (2015). EMG spectral differences among the quadriceps femoris during the stretch reflex. *Muscle & nerve*, 52(5), 826–831. <https://doi.org/10.1002/mus.24625>
- Blazevich, A. J., Cannavan, D., Coleman, D. R. in Horne, S. (2007). Influence of concentric and eccentric resistance training on architectural adaptation in human quadriceps muscles. *Journal of Applied Physiology (Bethesda, Md. : 1985)*, 103(5), 1565–1575. <https://doi.org/10.1152/japplphysiol.00578.2007>
- Bobbert, M. F., Gerritsen, K. G., Litjens, M. C. in Van Soest, A. J. (1996). Why is countermovement jump height greater than squat jump height? *Medicine and Science in Sports and Exercise*, 28(11), 1402–1412. <https://doi.org/10.1097/00005768-199611000-00009>
- Bourne, M. N., Timmins, R. G., Opar, D. A., Pizzari, T., Ruddy, J. D., Sims, C., Williams, M. D. in Shield, A. J. (2018). An Evidence-Based Framework for Strengthening Exercises to Prevent Hamstring Injury. *Sports Medicine (Auckland, N.Z.)*, 48(2), 251–267. <https://doi.org/10.1007/s40279-017-0796-x>
- Burgos-Jara, C., Cerdá-Köhler, H., Aedo-Muñoz, E. in Miarka, B. (2023). Eccentric Resistance Training: A Methodological Proposal of Eccentric Muscle Exercise Classification Based on Exercise Complexity, Training Objectives, Methods, and Intensity. *Applied Sciences*, 13(13), 7969. <https://doi.org/10.3390/app13137969>
- Carmichael, D. S., Hickey, J. T., Tofari, P. J., Bourne, M. N., Ward, M. R. in Timmins, R. G. (2022). Effect of an Isometric or Eccentric Hip Extension Exercise Intervention on Hamstring Strength, Architecture, and Morphology. *Medicine and Science in Sports and Exercise*, 54(12), 2196–2207. <https://doi.org/10.1249/MSS.0000000000003012>
- Christine Eyre, J., Weyer, J., Geisler, S. in Gavauda, S. (2024). Comparison of the effects of isokinetic and isotonic strength training in team sport athletes: A randomized controlled trial. *Journal of Biomechanics*, 173, 112246. <https://doi.org/10.1016/j.jbiomech.2024.112246>
- Davies, G., Riemann, B. L. in Manske, R. (2015). CURRENT CONCEPTS OF PLYOMETRIC EXERCISE. *International Journal of Sports Physical Therapy*, 10(6), 760–786. <https://www.ncbi.nlm.nih.gov/pmc/articles/PMC4637913/>
- Donahue, P. T., Wilson, S. J., Williams, C. C., Hill, C. M. in Garner, J. C. (2021). Comparison of Countermovement and Squat Jumps Performance in Recreationally Trained Males. *International Journal of Exercise Science*, 14(1), 462–472. <https://doi.org/10.70252/FXQB8485>
- Duclay, J., Martin, A., Robbe, A. in Pousson, M. (2008). Spinal reflex plasticity during maximal dynamic contractions after eccentric training. *Medicine and Science in Sports and Exercise*, 40(4), 722–734. <https://doi.org/10.1249/MSS.0b013e31816184dc>
- Eby, S. F., Song, P., Chen, S., Chen, Q., Greenleaf, J. F. in An, K.-N. (2013). Validation of Shear Wave Elastography in Skeletal Muscle. *Journal of biomechanics*, 46(14), 10.1016/j.jbiomech.2013.07.033. <https://doi.org/10.1016/j.jbiomech.2013.07.033>
- Feher, J. (2012). 3.4 – Skeletal Muscle Mechanics. V J. Feher (ur.), *Quantitative Human Physiology* (str. 239–248). Academic Press. <https://doi.org/10.1016/B978-0-12-382163-8.00027-X>
- Fouré, A., Nordez, A., McNair, P. in Cornu, C. (2011). Effects of plyometric training on both active and passive parts of the plantarflexors series elastic component stiffness of muscle-tendon complex. *European Journal of Applied Physiology*, 111(3), 539–548. <https://doi.org/10.1007/s00421-010-1667-4>
- Franchi, M. V., Reeves, N. D. in Narici, M. V. (2017). Skeletal Muscle Remodeling in Response to Eccentric vs. Concentric Loading: Morphological, Molecular, and Metabolic Adaptations. *Frontiers in Physiology*, 8, 447. <https://doi.org/10.3389/fphys.2017.00447>
- Frouin, A., Le Sant, G., Barbier, L., Jacquemin, E., McNair, P. J., Ellis, R., Nordez, A. in Lacourpaille, L. (2024). Individual distribution of muscle hypertrophy among hamstring muscle heads: Adding muscle volume where you need is not so simple. *Scandinavian Journal of Medicine & Science in Sports*, 34(3), e14608. <https://doi.org/10.1111/sms.14608>
- Gash, M. C., Kandle, P. F., Murray, I. V. in Vaccallo, M. A. (2025). Physiology, Muscle Contraction. V StatPearls. StatPearls Publishing. <http://www.ncbi.nlm.nih.gov/books/NBK537140/>
- Gérard, R., Gojon, L., Declève, P. in Van Cant, J. (2020). The Effects of Eccentric Training on Biceps Femoris Architecture and Strength: A Systematic Review With Meta-Analysis. *Journal of Athletic Training*, 55(5), 501–514. <https://doi.org/10.4085/1062-6050-194-19>
- Helms, E. R., Cronin, J., Storey, A. in Zourdos, M. C. (2016). Application of the Repetitions in Reserve-Based Rating of Perceived Exertion Scale for Resistance Training. *Strength and Conditioning Journal*, 38(4), 42–49. <https://doi.org/10.1519/SSC.0000000000000218>
- Hoeger, W. W. K., Barette, S. L., Hale, D. F. in Hopkins, D. R. (1987). Relationship Between Repetitions and Selected Percentages of One Repetition Maximum. *The Journal of Strength & Conditioning Research*, 1(1), 11. https://journals.lww.com/nsca-jscr/abstract/1987/02000/relationship_between_repetitions_and_selected.2.aspx
- Hoeger, W. W. K., Hopkins, D. R., Barette, S. L. in Hale, D. F. (1990). Relationship between Repetitions and Selected percentages of One Repetition Maximum: A Comparison between Untrained and Trained Males and Females. *The Journal of Strength & Conditioning Research*, 4(2), 47. https://journals.lww.com/nsca-jscr/abstract/1990/05000/relationship_between_repetitions_and_selected.4.aspx

23. Hofmann, P. in Tschakert, G. (2010). Special needs to prescribe exercise intensity for scientific studies. *Cardiology Research and Practice*, 2011, 209302. <https://doi.org/10.4061/2011/209302>
24. Hryvniak, D., Wilder, R. P., Jenkins, J. in Statuta, S. M. (2021). 15 – Therapeutic Exercise. V.D. X. Cifu (ur.), *Braddom's Physical Medicine and Rehabilitation (Sixth Edition)* (Sixth Edition, str. 291-315.e4). Elsevier. <https://doi.org/10.1016/B978-0-323-62539-5.00015-1>
25. Isner-Horobeti, M.-E., Dufour, S. P., Vautravers, P., Geny, B., Coudeyre, E. in Richard, R. (2013). Eccentric Exercise Training: Modalities, Applications and Perspectives. *Sports Medicine*, 43(6), 483–512. <https://doi.org/10.1007/s40279-013-0052-y>
26. Komi, P. V. (2000). Stretch-shortening cycle: a powerful model to study normal and fatigued muscle. *Journal of Biomechanics*, 33(10), 1197–1206. [https://doi.org/10.1016/S0021-9290\(00\)00064-6](https://doi.org/10.1016/S0021-9290(00)00064-6)
27. Konow, N. in Roberts, T. J. (2015). The series elastic shock absorber: tendon elasticity modulates energy dissipation by muscle during burst deceleration. *Proceedings of the Royal Society B: Biological Sciences*, 282(1804), 20142800. <https://doi.org/10.1098/rspb.2014.2800>
28. Kraemer, W. J. in Ratamess, N. A. (2004). Fundamentals of resistance training: progression and exercise prescription. *Medicine and Science in Sports and Exercise*, 36(4), 674–688. <https://doi.org/10.1249/01.mss.0000121945.36635.61>
29. Krentz, J. R., Chilibek, P. D. in Farthing, J. P. (2017). The effects of supramaximal versus submaximal intensity eccentric training when performed until volitional fatigue. *European Journal of Applied Physiology*, 117(10), 2099–2108. <https://doi.org/10.1007/s00421-017-3700-3>
30. Kudo, S., Sato, T. in Miyashita, T. (2020). Effect of plyometric training on the fascicle length of the gastrocnemius medialis muscle. *Journal of Physical Therapy Science*, 32(4), 277–280. <https://doi.org/10.1589/jpts.32.277>
31. Lieber, R. L. in Fridén, J. (2000). Functional and clinical significance of skeletal muscle architecture. *Muscle & Nerve*, 23(11), 1647–1666. [https://doi.org/10.1002/1097-4598\(200011\)23:11<1647::aid-mus1>3.0.co;2-m](https://doi.org/10.1002/1097-4598(200011)23:11<1647::aid-mus1>3.0.co;2-m)
32. Markovic, G. in Mikulic, P. (2010). Neuro-Musculoskeletal and Performance Adaptations to Lower-Extremity Plyometric Training. *Sports Medicine*, 40(10), 859–895. <https://doi.org/10.2165/11318370-000000000-00000>
33. Markovic, G. in Mikulic, P. (2010). Neuro-Musculoskeletal and Performance Adaptations to Lower-Extremity Plyometric Training. *Sports Medicine*, 40(10), 859–895. <https://doi.org/10.2165/11318370-000000000-00000>
34. Marušič, J., Vatovec, R., Marković, G. in Šarabon, N. (2020). Effects of eccentric training at long-muscle length on architectural and functional characteristics of the hamstrings. *Scandinavian Journal of Medicine & Science in Sports*, 30(11), 2130–2142. <https://doi.org/10.1111/sms.13770>
35. Maughan, R. J., Watson, J. S. in Weir, J. (1983). Strength and cross-sectional area of human skeletal muscle. *The Journal of Physiology*, 338, 37–49. <https://www.ncbi.nlm.nih.gov/pmc/articles/PMC1197179/>
36. Monti, E., Franchi, M. V., Badiali, F., Quinlan, J. I., Longo, S. in Narici, M. V. (2020). The Time-Course of Changes in Muscle Mass, Architecture and Power During 6 Weeks of Plyometric Training. *Frontiers in Physiology*, 11, 946. <https://doi.org/10.3389/fphys.2020.00946>
37. Morgan, D. L. (1990). New insights into the behavior of muscle during active lengthening. *Biophysical Journal*, 57(2), 209–221. [https://doi.org/10.1016/S0006-3495\(90\)82524-8](https://doi.org/10.1016/S0006-3495(90)82524-8)
38. Phillips, S. M. in Winett, R. A. (2010). Uncomplicated resistance training and health-related outcomes: evidence for a public health mandate. *Current Sports Medicine Reports*, 9(4), 208–213. <https://doi.org/10.1249/JSR.0b013e3181e7da73>
39. Pillen, S., Tak, R. O., Zwarts, M. J., Lammens, M. M. Y., Verripi, K. N., Arts, I. M. P., van der Laak, J. A., Hoogerbrugge, P. M., van Engelen, B. G. M. in Verrips, A. (2009). Skeletal muscle ultrasound: correlation between fibrous tissue and echo intensity. *Ultrasound in Medicine & Biology*, 35(3), 443–446. <https://doi.org/10.1016/j.ultrasmedbio.2008.09.016>
40. Pincheira, P. A., Boswell, M. A., Franchi, M. V., Delp, S. L. in Lichtwark, G. A. (2022). Biceps femoris long head sarcomere and fascicle length adaptations after 3 weeks of eccentric exercise training. *Journal of Sport and Health Science*, 11(1), 43–49. <https://doi.org/10.1016/j.jshs.2021.09.002>
41. Potier, T. G., Alexander, C. M. in Seynnes, O. R. (2009). Effects of eccentric strength training on biceps femoris muscle architecture and knee joint range of movement. *European Journal of Applied Physiology*, 105(6), 939–944. <https://doi.org/10.1007/s00421-008-0980-7>
42. Proske, U. in Morgan, D. L. (2001). Muscle damage from eccentric exercise: mechanism, mechanical signs, adaptation and clinical applications. *The Journal of Physiology*, 537(Pt 2), 333–345. <https://doi.org/10.1111/j.1469-7793.2001.00333.x>
43. Ramírez-de la Cruz, M., Bravo-Sánchez, A., Esteban-García, P., Jiménez, F. in Abián-Vicén, J. (2022). Effects of Plyometric Training on Lower Body Muscle Architecture, Tendon Structure, Stiffness and Physical Performance: A Systematic Review and Meta-analysis. *Sports Medicine - Open*, 8(1), 40. <https://doi.org/10.1186/s40798-022-00431-0>
44. Schoenfeld, B. J., Ogborn, D. I. in Krieger, J. W. (2015). Effect of repetition duration during resistance training on muscle hypertrophy: a systematic review and meta-analysis. *Sports Medicine (Auckland, N.Z.)*, 45(4), 577–585. <https://doi.org/10.1007/s40279-015-0304-0>
45. Seger, J. Y., Arvidsson, B. in Thorstensson, A. (1998). Specific effects of eccentric and concentric training on muscle strength and morphology in humans. *European Journal of Applied Physiology and Occupational Physiology*, 79(1), 49–57. <https://doi.org/10.1007/s004210050472>
46. Seiberl, W., Hahn, D., Power, G. A., Fletcher, J. R. in Siebert, T. (2021). Editorial: The Stretch-Shortening Cycle of Active Muscle and Muscle-Tendon Complex: What, Why and How It Increases Muscle Performance? *Frontiers in Physiology*, 12. <https://doi.org/10.3389/fphys.2021.693141>
47. Seymore, K. D., Domire, Z. J., DeVita, P., Rider, P. M. in Kulas, A. S. (2017). The effect of Nordic hamstring strength training on muscle architecture, stiffness, and strength. *European Journal of Applied Physiology*, 117(5), 943–953. <https://doi.org/10.1007/s00421-017-3583-3>
48. Seynnes, O. R., de Boer, M. in Narici, M. V. (2007). Early skeletal muscle hypertrophy and architectural changes in response to high-intensity resistance training. *Journal of Applied Physiology (Bethesda, Md.: 1985)*, 102(1), 368–373. <https://doi.org/10.1152/japplphysiol.00789.2006>
49. Timmins, R. G., Ruddy, J. D., Presland, J., Manniar, N., Shield, A. J., Williams, M. D. in Opar, D. A. (2016). Architectural Changes of the Biceps Femoris Long Head after Concentric or Eccentric Training. *Medicine and Science in Sports and Exercise*, 48(3), 499–508. <https://doi.org/10.1249/MSS.0000000000000795>
50. Ullrich, B., Pelzer, T. in Pfeiffer, M. (2018). Neuromuscular Effects to 6 Weeks of Loaded Countermovement Jumping With Traditional and Daily Undulating Periodization. *Journal of Strength and Conditioning Research*, 32(3), 660–674. <https://doi.org/10.1519/JSC.00000000000002290>
51. Ünlü, G., Çevikol, C. in Melekoğlu, T. (2020). Comparison of the Effects of Eccentric, Concentric, and Eccentric-Concentric Isotonic Resistance Training at Two Velocities on Strength and Muscle Hypertrophy. *The Journal of Strength & Conditioning Research*, 34(2), 337. <https://doi.org/10.1519/JSC.00000000000003086>
52. Vangsgaard, S., Taylor, J. L., Hansen, E. A. in Madeleine, P. (2014). Changes in H reflex and neuromechanical properties of the trapezius muscle after 5 weeks of eccentric training: a randomized controlled trial. *Journal of Applied Physiology (Bethesda, Md.: 1985)*, 116(12), 1623–1631. <https://doi.org/10.1152/japplphysiol.00164.2014>
53. Wickiewicz, T. L., Roy, R. R., Powell, P. L. in Edgerton, V. R. (1983). Muscle architecture of the human lower limb. *Clinical Orthopaedics and Related Research*, 179, 275–283.
54. Wilk, M., Zajac, A. in Tufano, J. J. (2021). The Influence of Movement Tempo During Resistance Training on Muscular Strength and Hypertrophy Responses: A Review. *Sports Medicine*, 51(8), 1629–1650. <https://doi.org/10.1007/s40279-021-01465-2>
55. Zourdos, M. C., Klemp, A., Dolan, C., Quiles, J. M., Schau, K. A., Jo, E., Helms, E., Esgró, B., Duncan, S., Garcia Merino, S. in Blanco, R. (2016). Novel Resistance Training-Specific Rating of Perceived Exertion Scale Measuring Repetitions in Reserve. *Journal of Strength and Conditioning Research*, 30(1), 267–275. <https://doi.org/10.1519/JSC.0000000000001049>

doc. dr. Žiga Kozinc
Fakulteta za vede o zdravju,
Univerza na Primorskem, Izola, Slovenija
ziga.kozinc@fvz.upr.si