



Daniel Djurić¹,
Jernej Pleša¹, Žiga Kozinc^{1,2}, Nejc Šarabon^{1,3,4}

Uporaba ultrazvočne elastografije za ocenjevanje mišične togosti pri športnikih: ponovljivost, medmišične in znotrajmišične razlike

Izvleček

Ultrazvočno slikanje se pogosto uporablja na znanstvenem področju in tudi v kliničnem okolju za oceno morfoloških in mehanskih lastnosti mišic in kit. V vrhunskem športu tovrstna metoda pomeni velik potencial za oceno prilagoditev na trening in ugotavljanje strukturnih nepravilnosti. Danes se vse pogosteje uporablja elastografija s strižnimi valovi z namenom pridobivanja vpogleda v mehanske značilnosti mišičnega tkiva, predvsem mišične togosti. V tej študiji smo izvedli meritve mišične togosti z elastografijo s strižnimi valovi na dvoglavi mečni mišici in štiriglavi stegenski mišici. Namen je bil preučiti morebitne razlike v mišični togosti med spoloma, med mišicam in/ali znotraj posameznih mišic. Vzorec je bil sestavljen iz 33 mladih zdravih športnikov iz različnih disciplin ($23,4 \pm 5,6$ leta; 17 moških in 16 žensk). Relativna ponovljivost meritev je bila dobra do odlična, medtem ko je bila absolutna ponovljivost za večino spremenljivk sprejemljiva. Med moškimi in ženskami ni bilo razlik v mišični togosti. Togost se ni razlikovala med različnimi glavami posamezne mišice, medtem ko je bila togost dvoglave mečne mišice statistično značilno višja od togosti štiriglave stegenske mišice.

Ključne besede: elastografija, mišična togost, dvoglava mečna mišica, štiriglava stegenska mišica



Using ultrasound elastography for assessing muscle stiffness in athletes: reliability, inter-muscular and intramuscular differences

Abstract:

Ultrasound imaging is widely used in scientific research, as well as in the clinical practice, to assess morphological and mechanical properties of muscles and tendons. It also has applications in elite sport, for assessing training adaptations and for the identification of structural anomalies. Shear wave elastography is being increasingly used in order to gain additional insights into the mechanical characteristics of muscle tissue, especially muscle stiffness. In this study, we performed shear-wave elastography measurements on the gastrocnemius and quadriceps muscles, in order to detect any inter-gender, inter-muscular and/or intra-muscular differences. The sample consisted of young athletes from various sports (23.4 ± 5.6 years; 17 males and 16 females). The relative repeatability was good to excellent while the absolute repeatability was also acceptable. Our results show that there are no differences between genders as well as no intramuscular differences in muscle stiffness. However, we did notice statistically significant differences in muscle stiffness between different muscle groups, namely between the gastrocnemius and quadriceps.

Key words: elastography, muscle stiffness, gastrocnemius, quadriceps

¹Univerza na Primorskem, Fakulteta za vede o zdravju, Izola

²Univerza na Primorskem, Inštitut Andrej Marušič, Koper

³InnoRenew CoE, Izola

⁴S2P, Znanost v prakso, d. o. o., Ljubljana

■ Uvod

V zadnjih nekaj desetletjih so se v vsakodnevni radiološki praksi uporabljale ultrazvočne (UZ) naprave za vrednotenje arhitekture mišično-skeletnih tkiv (debelina, prečni presek, penacijski kot, dolžina fasciklov), pri čemer so rezultati primerljivi z rezultati magnetne resonance (Jacobson, 2009). UZ je učinkovita diagnostična metoda za vrednotenje oziroma vpogled v mišično-skeletni sistem prav zaradi možnosti izvajanja dinamičnih preiskav visoke ločljivosti v realnem času. UZ-analiza nam poleg pridobivanja morfoloških podatkov omogoča vpogled v togost mišično-skeletnih struktur s pomočjo elastografije (Taljanovič idr., 2017). Togost je mehansko opredeljena kot odpornost za deformacijo ob delovanju sile. Ena najpogostejših tehnik, ki omogoča izračun togosti mišice, je elastografija s strižnimi valovi (angl. »shear wave elastography« – SWE). Pri metodi SWE potuje strižni ultrazvočni val paralelno v smeri poteka mišičnih vlaken, pri čemer je hitrost potovanja teh valov odvisna od togosti tkiva (Creze idr., 2018). SWE velja za najprimernejšo vrsto elastografije za merjenje značilnosti mišičnega tkiva in ponuja priložnost za nadaljnje poglobljanje razumevanja o pasivni in aktivni mišični togosti (Brandenburg idr., 2014). Pokazano je bilo, da je meritev togosti mišic s SWE veljavna, pri čemer so za zlati standard vzeli neposredno mehansko merjenje togosti (Eby idr., 2013). V pasivnih pogojih glavni prispevek k togosti mišice predstavljajo vezivna tkiva, kot je kolagen (Kjaer, 2004), ter mišični tonus (Goo idr., 2020). Elastografija se v klinični praksi uporablja tudi pri oceni poškodb kit, najpogosteje tendinopatije Ahilove kite in patelarne tendinopatije. Schneebeli idr. (2021) so opravili sistematičen pregled o zanesljivosti meritev togosti kit spodnjih okončin z elastografijo. Ugotovili so, da je zanesljivost elastografskih meritev med študijami zelo različna, pri čemer naj bi bila zanesljivost ocene stopnje prizadetosti patelarne kite višja kot pri oceni Ahilove kite. Zanesljivost rezultatov bi lahko bila precejšnja zaradi neupoštevanja intervalov zaupanja. Poleg tega so pri omenjenem sistematičnem pregledu ugotovili, da pomanjkanje zanesljivosti med ocenjevalci, med posameznimi meritvami in med napravami vzbuja pomembne dvome o klinični uporabnosti elastografije.

Nekatere študije so že pokazale povezavo med togostjo mišic in atletske uspešnostjo. Yamazaki idr. (2022) so uporabili SWE

za merjenje pasivne in aktivne togosti mišic pri 20 %, 50 %, 80 % in 100 % največje hotene kontrakcije notranje glave dvoglave mečne mišice (DM_N). Njihovi rezultati so pokazali, da je višja pasivna mišična togost dvoglave mečne mišice povezana z boljšo sprintersko zmogljivostjo, ker najverjetneje omogoča hitrejši razvoj sile/navora. Rezultati nakazujejo, da je togost, izmerjena med kontrakcijo, verjetno povezana z visoko zmogljivostjo sprinta zaradi omogočanja visoke aktivne togosti gležnja. Ando in Suzuki (2019) sta želela preučiti razmerje med togostjo mišic in največjim sklepnim navorom ter hitrostjo prirastka navora v gležnjem sklepu. Njihovi rezultati kažejo, da pasivna togost mišic ni povezana z mišično silo, medtem ko vsaj v nekaterih sklepnih kotih prispeva k hitrejšemu prirastu sile. Avrillon idr. (2019) so uporabili SWE, da bi ugotovili, ali obstajajo razlike v pasivni togosti mišic med vrhunskimi športniki iz različnih športnih disciplin in netreniranimi posamezniki. Rezultati omenjene študije kažejo manjšo mišično togost polopnaste mišice pri preiskovancih iz športov, ki zahtevajo velik obseg gibanja spodnjih okončin (tj. umetnostno drsanje, tekvondo, nogomet), pri čemer trenajni proces teh športnikov v precej večji meri vključuje raztezne vaje v primerjavi s kontrolno skupino. Med sprinterji, hokejisti in košarkarji niso ugotovili razlik za nobeno mišico, pri čemer je zanimivo tudi to, da med polkitasto in dvoglavo stegensko mišico niso zaznali statistično značilnih razlik v nobeni podskupini športnikov.

Nekatere temeljna vprašanja o uporabi SWE ostajajo brez odgovora: ali so razlike v mišični togosti med spoloma? So večje razlike med posameznimi mišicami, znotraj istih mišic ali med posamezniki? Kakšna je ponovljivost meritev pri različnih mišičnih skupinah in znotraj mišičnih skupin? Šarabon, Kozinc in Podrekar (2020) so poudarili, da je ponovljivost lahko boljša, če je mišica v raztegnjenem položaju. Nekateri avtorji so preverjali ponovljivost povprečne mere SWE za posamezne mišice (Zardi idr. 2019; Pang idr. 2021), a redko so primerjali več mišic in več glav iste mišice. Namen naše raziskave je z uporabo SWE izmeriti in primerjati togost DM_N in zunanje glave dvoglave mečne mišice (DM_Z) (lat. gastrocnemius medialis in gastrocnemius lateralis) ter notranje široke mišice od štiriglave stegenske mišice (SS_N) in zunanje široke mišice od štiriglave stegenske mišice (SS_Z) (lat. vastus medialis in vastus lateralis), pri čemer je bil namen pri SS_N in SS_Z

preučiti tudi razlike med meritvami v dveh položajih (ob iztegnjenem in pokrčenem kolenu).

■ Metode

Preiskovanci

V študijo je bilo vključenih 33 zdravih preiskovancev in preiskovank (17 moških in 16 žensk). Povprečna starost preiskovancev je bila 23,4 leta (SD = 5,6 leta), telesna masa 78,2 kg (SD = 3,4 kg) in telesna višina 178,1 cm (SD = 19,2 cm). Vsi preiskovanci so poročali o redni udeležbi v rekreativnih športnih aktivnostih (rokomet, nogomet, odbojka, dvigovanje uteži), pri čemer so dvakrat do štirikrat na teden izvajali tudi vadbo proti uporu. Izključitveni kriterij za sodelovanje v raziskavi je bila težja poškodba ali bolezen v minulih šestih mesecih ali prisotnost bolečin, ki bi lahko vplivale na izvedbo meritev. Vsi preiskovanci so pred izvedbo meritev podpisali informirano privolitev o sodelovanju, pri čemer je bilo za mlajše od 18 let zahtevano tudi soglasje staršev oz. skrbnikov. Vsi postopki so bili izvedeni v skladu z vlogama, ki ju je potrdila Komisija za medicinsko etiko Republike Slovenije, od tega je bila prva pridobljena za namen projekta TELASI [L5-1845; št. vloge: 0120-99/2018/5] in druga za izvedbo meritev na UP FVZ (št. vloge: 0120-690/2017/8).

Raziskovalni načrt in postopki

Raziskovalni načrt je bil prečno-presečni, pri čemer so preiskovanci meritve opravili v enem obisku. Pred izvedbo meritev so preiskovanci vodeno izpolnili vprašalnik o udeležbi v športni aktivnosti. Po 10-minutnem počitku na masažni mizi smo opravili meritve togosti mišic z ultrazvokom. Vrednotili smo togost SS_Z in SS_N ter DM_Z in DM_N. Togost mišic smo vrednotili v sproščenem ležečem položaju, pri čemer smo togost štiriglave stegenske mišice vrednotili tudi ob pokrčenem kolenu za 90° za notranjo (SS_N90) in zunanjo glavo (SS_Z90).

Za vrednotenje togosti dvoglave mečne mišice so preiskovanci ležali na trebuhu na masažni mizi z gležnji preko zadnjega roba mize, tako da je bil gležnjski sklep povsem sproščen. Pozicija sonde na DM_Z je bila na 1/3 razdalje med glavo mečnice in zunanjim delom petnice. Za vrednotenje togosti DM_N je bila sonda postavljena na najbolj izbočenem delu mišice (na trebuhu mišice). Vse lokacije smo označili z marker-

jem za zagotavljanje enake lokacije sonde med posameznimi meritvami. Sonda je bila orientirana v smeri poteka mišičnih vlaken.

Po opravljeni ultrazvočni preiskavi togosti dvoglave mečne mišice so se preiskovanci obrnili na hrbet, sledilo je 3–5 min počitka pred meritvijo togosti $\dot{S}\dot{S}_{_N}$ in $\dot{S}\dot{S}_{_Z}$. Togost $\dot{S}\dot{S}_{_N}$ smo merili na 80 % razdalje med zgornjim sprednjim črevničnim trnom (spina iliaca anterior superior) in špranjo na sprednjem delu sprednjega roba notranjega kolateralnega ligamenta. Togost $\dot{S}\dot{S}_{_Z}$ smo vrednotili na 2/3 razdalje med zgornjim sprednjim črevničnim trnom in zunanjim delom pogačice. Togost sprednjih stegenskih mišic smo najprej vrednotili ob iztegnjenem kolenu (mišica v sproščenem položaju) ter nato še ob pokrčenem kolenu za 90° (mišica v podaljšanem položaju). Pri prvi meritvi so preiskovanci sproščeno ležali na hrbtu s kolkom, kolonom in gležnjem v anatomskem (nevtralnem položaju). Za drugo meritev so pokrčili koleno (samo na merjeni strani) na 90° , kar smo preverjali sproti z goniometrom. Sonda je bila postavljena v smeri poteka mišičnih vlaken. Vse meritve so bile opravljene na desni nogi.

Oprema in pridobivanje podatkov

Meritve je izvajal en merilec, predhodno uveden za izvedbo ultrazvočne analize togosti mišic. Meritve so bile opravljene z diagnostičnim ultrazvokom Resona 7 (Mindray, Shenzhen, Kitajska). Za vrednotenje togosti mišic je bil ultrazvok nastavljen na modul za analizo mišično-skeletnega sistema (predpostavka, da je gostota tkiva 1000 kg/m^3). Uporabili smo srednje veliko linearno sondo (Model L11-3U, Mindray, Shenzhen, Kitajska) in ultrazvočni gel (AquaUltra Basic, Ultragel, Budimpešta, Madžarska). Za analizo podatkov smo vzeli tri ponovljene meritve, pri čemer smo za vsako posamezno ponovitev vzeli povprečno vrednost osmih zaporednih slik, ki so bile posnete v 10–12 s. Območje zajema podatkov je bilo nastavljeno na $1 \times 1 \text{ cm}$, medtem ko je bila globina zajemanja podatkov izbrana na podlagi antropometričnih značilnosti posameznika, tako da je bilo zajeto le mišično tkivo. Dva primera ultrazvočnega zajema sta prikazana na Sliki 1.

Analiza podatkov

Podatke smo analizirali s programom IBM SPSS Statistics 25 (IBM, New York, USA). Za



Slika 1. Primeri ultrazvočnih slik za zunanjo glavo štiriglave stegenske mišice v raztegnjenem položaju (levo) in zunanjo glavo dvoglave mečne mišice (desno). Bel kvadrat prikazuje območje zajema.

vse parametre smo izračunali opisno statistiko (povprečne vrednosti, standardni odklon, minimum in maksimum). Normalnost porazdelitve podatkov smo preverili s Shapiro-Wilkovim testom in histogramom. Relativno ponovljivost smo ovrednotili z intraklasnim koeficientom korelacije (angl. intra-class correlation coefficient; ICC) za absolutno ujemanje po dvosmernem modelu naključnih učinkov (tip 2,1). Glede na ICC smo ponovljivost interpretirali kot slabo ($< 0,5$), zmerno ($0,5\text{--}0,75$), dobro ($0,75\text{--}0,90$) in odlično ($> 0,90$) (Koo in Li, 2016). Absolutno ponovljivost smo ovrednotili z izračunom tipične napake (Hopkins, 2000), ki smo jo izrazili kot koeficient variacije (KV) po formuli $(KV (\%) = \text{tipična napaka} / \text{povprečna vrednost} * 100 \%)$, pri čemer je bil kriterij za sprejemljivo absolutno ponovljivost $KV < 10 \%$. Razlike v mišični togosti med različnimi pogoji oziroma značilnostmi (mišica, spol, položaj) smo preverili z analizo variance. Razlike v mišični togosti med spoloma smo preverili s t-testom za neodvisne vzorce, medtem ko smo razlike v togosti med mišicami preverili s parnim dvorepim t-testom. Za ugotavljanje statistične značilnosti medsebojne povezanosti spremenljivk smo uporabili Pearsonov korelacijski koeficient, pri čemer smo rezultate interpretirali kot: $0,1\text{--}0,29$ majhna povezanost; $0,3\text{--}0,49$ zmerna povezanost; $0,5\text{--}0,69$ velika povezanost; $0,7\text{--}0,89$ zelo velika povezanost; $0,9\text{--}0,99$ popolna povezanost (Akoglu,

2018). Statistična značilnost je bila sprejeta pri stopnji zaupanja $\alpha < 0,05$.

Rezultati

Opisna statistika – povprečne vrednosti, standardni odkloni (SO), najmanjše (minimum) in največje (maksimum) vrednosti – je predstavljena v Tabeli 1. V Tabeli 2 so prikazani rezultati analize ponovljivosti za posamezne mišične skupine. Za vse mišične skupine je bila relativna ponovljivost dobra do odlična ($ICC = 0,88\text{--}0,94$).

Rezultati analize variance kažejo statistično značilne razlike med mišicami ($F = 14,824$; $p < 0,001$; $\eta^2 = 0,324$). Post hoc test kaže na statistično značilno razliko med sprednjo stegensko mišico in dvoglavo mečno mišico ($p = 0,001$), medtem ko razlike znotraj mišice (pri DM_Z in DM_N ter $\dot{S}\dot{S}_{_Z}$ in $\dot{S}\dot{S}_{_N}$) niso statistično značilne ($p = 1,000$). Analiza variance interakcije mišice in spola ni statistično značilna ($p = 0,749$), kar kaže, da med moškimi in ženkami ni bilo razlik v mišični togosti. Nadalje analiza variance kaže statistično značilno razliko med različnim položajem (togost štiriglave stegenske mišice pri iztegnjenem kolenu in pri pokrčenem kolenu) ($p < 0,001$). Interakcija med položajem in spolom ni bila statistično značilna ($p = 0,771$), prav tako ni bila statistično značilna trojna interakcija med položajem,

Tabela 1.

Opisna statistika

	Spremenljivka	Povprečje	SO	Minimum	Maksimum
Vsi preiskovanci	Starost (leta)	22,82	3,84	17,00	33,00
	Telesna masa (kg)	74,10	11,81	53,00	101,00
	Telesna višina (cm)	175,52	9,05	160,00	193,00
	DM_Z	11,17	3,80	4,19	19,74
	DM_N	10,21	2,75	5,07	18,79
	ŠS_N	7,32	2,61	4,00	14,91
	ŠS_Z	7,43	2,26	3,58	12,05
	ŠS_N90	11,77	1,94	9,00	15,53
	ŠS_Z90	12,10	2,71	6,82	18,51
Moški	Starost (leta)	24,29	3,60	20	33
	Telesna masa (kg)	81,71	9,73	62	101
	Telesna višina (cm)	181,47	7,48	160	193
	DM_Z	10,96	4,26	4,19	17,69
	DM_N	9,93	3,55	5,07	18,79
	ŠS_N	7,69	2,76	4,00	12,87
	ŠS_Z	7,62	2,44	3,58	12,05
	ŠS_N90	12,28	1,99	9,41	15,53
	ŠS_Z90	12,69	3,36	6,82	18,51
Ženske	Starost (leta)	21,25	3,531	17	30
	Telesna masa (kg)	66,01	7,83	53	78
	Telesna višina (cm)	169,19	5,671	163	178
	DM_Z	11,38	3,36	6,91	19,74
	DM_N	10,51	1,60	6,37	12,62
	ŠS_N	6,93	2,46	4,82	14,91
	ŠS_Z	7,21	2,12	4,09	10,71
	ŠS_N90	11,23	1,80	9,00	15,18
	ŠS_Z90	11,48	1,68	8,41	13,77

Legenda: DM_Z – zunanja glava dvoglave mečne mišice; DM_N – notranja glava dvoglave mečne mišice; ŠS_N – notranja široka mišica štiriglave stegenske mišice; ŠS_Z – zunanja široka mišica štiriglave stegenske mišice; ŠS_Z90 – zunanja široka mišica s pokrčenim kolonom za 90°; ŠS_N90 – notranja široka mišica s pokrčenim kolonom za 90°; SO – standardni odklon; togost mišic je podana v kPa.

mišico in spolom ($F = 0,194$; $p = 0,663$; $\eta^2 = 0,006$).

Med moški in ženskami ni bilo razlik v togosti za nobeno mišico ($p = 0,122$ – $0,760$). Rezultati parnega t-testa kažejo na razlike v mišični togosti med dvoglavo mečno mišico in sprednjo stegensko mišico ($p < 0,001$). Znotraj posamezne mišice (N in Z dvoglave mečne mišice; N in Z štiriglave stegenske mišice ob iztegnjenem in pokrčenem kolenu) ni razlik v mišični togosti ($p = 0,214$ – $0,806$). Rezultati so skladni tako na ravni celotnega vzorca kot pri delitvi preiskovancev po spolu.

Rezultati korelacijske analize kažejo zmerne do visoke povezave ($r = 0,350$ – $0,765$) med posameznimi mišicami. Zanimivo je, da DM_Z ne kaže nobene statistično značilne povezave ($p = 0,053$ – $0,615$). Po drugi strani je največ statistično značilnih povezav pri ženskah opaznih pri ŠS_N in DM_N, medtem ko za slednjo velja enako tudi pri moškem spolu, pa štiriglave stegenske mišice v sproščenem položaju (iztegnjeno koleno) ne kažejo statistično značilnih povezav ($p > 0,05$). Analiza korelacij z/med telesnimi značilnostmi in togostjo mišic kaže visoko povezanost med telesno višino in telesno maso pri obeh spolih ($r = 0,533$ – $0,577$; $p = 0,015$ – $0,034$), pri čemer je pri moških opazna tudi statistično značilna negativna visoka povezanost med starostjo preiskovancev in togostjo ŠS_Z90 ($r = -0,528$; $p = 0,036$). Podrobni rezultati korelacijske analize so prikazani v Tabeli 3.

Razprava

Namen raziskave je bil preveriti ponovljivost rezultatov mišične togosti ŠS_N in ŠS_Z ter DM_N in DM_Z, pridobljenih z

Tabela 2.

Ponovljivost meritev mišične togosti

Mišica	Ponovitve						Relativna ponovljivost			Absolutna ponovljivost					
	P	SO	P	SO	P	SO	ICC	95 % IZ	TN	95 % IZ	KV	95 % IZ			
DM_Z	11,12	4,01	11,19	4,02	11,19	3,74	0,92	0,86	0,95	1,18	1,02	1,43	10,56	9,16	12,81
DM_N	10,17	3,08	10,01	2,68	10,44	2,95	0,89	0,82	0,93	1,00	0,87	1,21	9,77	8,48	11,85
ŠS_N	7,37	2,49	7,36	2,97	7,23	2,65	0,90	0,84	0,94	0,89	0,77	1,08	12,18	10,57	14,78
ŠS_Z	7,40	2,48	7,57	2,37	7,31	2,15	0,91	0,85	0,95	0,73	0,63	0,89	9,83	8,53	11,92
ŠS_N90	11,70	1,98	11,81	2,06	11,81	2,05	0,88	0,81	0,93	0,72	0,63	0,87	6,12	5,31	7,43
ŠS_Z90	11,99	2,88	11,87	2,58	12,43	2,89	0,94	0,90	0,97	0,70	0,61	0,85	5,79	5,02	7,02

Legenda: DM_Z – zunanja glava dvoglave mečne mišice; DM_N – notranja glava dvoglave mečne mišice; ŠS_N – notranja široka mišica štiriglave stegenske mišice; ŠS_Z – zunanja široka mišica štiriglave stegenske mišice; ŠS_Z90 – zunanja široka mišica s pokrčenim kolonom za 90°; ŠS_N90 – notranja široka mišica s pokrčenim kolonom za 90°; togost mišic je podana v kPa; P – povprečje; SO – standardni odklon; ICC – intraklasni koeficient; IZ – interval zaupanja; TN – tipična napaka; KV – koeficient variacije; togost mišic je podana v kPa.

Tabela 3.

Rezultati korelacijske analize. Vrednosti levo (pod diagonalo) se nanašajo na preiskovanke, vrednosti desno (nad diagonalo) pa na preiskovance.

	DM_Z	DM_N	ŠS_N	ŠS_Z	ŠS_N90	ŠS_Z90
DM_Z		0,11	-0,17	-0,14	0,35	0,22
DM_N	0,16		-0,58*	-0,11	-0,20	-0,59*
ŠS_N	-0,19	0,10		0,49	-0,01	0,41
ŠS_Z	-0,31	0,16	0,53*		-0,06	0,18
ŠS_N90	-0,27	0,65**	0,51*	0,38		0,61*
ŠS_Z90	-0,13	0,54*	0,55*	0,67**	0,41	

Legenda: DM_Z – zunanja glava dvoglave mečne mišice; DM_N – notranja glava dvoglave mečne mišice; ŠS_N – notranja široka mišica štiriglave stegenske mišice; ŠS_Z – zunanja široka mišica štiriglave stegenske mišice; ŠS_Z90 – zunanja široka mišica s pokrčenim kolonom za 90°; ŠS_N90 – notranja široka mišica s pokrčenim kolonom za 90°; SO – standardni odklon;

metodo SWE. Cilj študije je bil odgovoriti na nekatera temeljna vprašanja, povezana z uporabo metode SWE: a) preveriti morebitne razlike v mišični togosti med spoloma, b) primerjati velikost razlik med posameznimi mišicami, znotraj iste mišice in med posamezniki ter c) preveriti ponovljivost meritev pri različnih mišičnih skupinah in znotraj istih mišičnih skupin. Na podlagi rezultatov ugotavljamo, da se togost mišic med moškimi in ženskami ni razlikovala ($p = 0,122-0,760$). Prav tako ni bilo razlik v togosti znotraj posamezne mišice (med DM_N in DM_Z, ŠS_N in ŠS_Z) ($p = 1,000$). Po drugi strani rezultati kažejo razlike v togosti med dvoglavo mečno mišico in sprednjo stegensko mišico ($p < 0,001$). Rezultati so skladni na ravni celotnega vzorca ter tudi pri delitvi po spolu. Relativna ponovljivost meritev togosti mišic s SWE se je izkazala kot dobra do odlična za vse mišične skupine ($ICC = 0,88-0,94$), medtem ko je bila absolutna ponovljivost sprejemljiva za vse mišične skupine ($KV \leq 9,8\%$) z izjemo DM_Z ($KV = 10,6\%$) in ŠS_N ($KV = 12,2\%$). Poleg tega so bile vrednosti koeficienta variacije pri analizi absolutne ponovljivosti pri vrednotenju togosti štiriglave stegenske mišice v raztegnjenem položaju (ŠS_Z90 in ŠS_N90); pokrčeno koleno) manjši kot koeficienti variacije, izračunani iz meritev togosti štiriglave stegenske mišice v nevtralnem položaju (ŠS_N in ŠS_Z).

Pri obeh mišičnih skupinah ter pri obeh položajih pri sprednji stegenski mišici je bila relativna ponovljivost za odtenek višja pri zunanjih glavah v primerjavi z notranjimi glavami znotraj posamezne mišice (razlika v vrednosti $ICC = 0,01-0,06$). V skladu z našimi rezultati o odlični ponovljivosti pri uporabi metode SWE pri ŠS_N ($ICC = 0,969$) poročajo tudi Zardi idr. (2019). Meritve SWE

v omenjeni študiji je izvajal izkušeni merilec, kar je lahko razlog za še nekoliko višjo ponovljivost v primerjavi z našo študijo. V omenjeni študiji poročajo tudi o višjih povprečnih vrednostih mišične togosti ($10,9 \pm 5,8$ kPa) v primerjavi z našo študijo ($7,32 \pm 2,61$ kPa). Eden izmed razlogov za razlike v mišični togosti bi lahko bila starost preiskovancev (57 ± 22 let v omenjeni študiji), saj se pasivna togost mišice s starostjo povečuje (Eby idr., 2015), predvsem zaradi upadanja kvalitete mišičnega tkiva in povečane količine kolagena v mišičnem tkivu (Alnaqeeb, Al Zaid in Goldspink, 1984). O podobni relativni ponovljivosti za štiriglavo stegensko mišico (ICC med ponovitvami = $0,89-0,94$) poročajo tudi Phan, Lee in Gao, (2019) na vzorcu starejših odraslih (62–82 let), pri čemer pa je ponovljivostjo med merilcema nekoliko nižja ($ICC = 0,79$). Poleg tega v skladu z našo študijo njihovi rezultati kažejo razlike v mišični togosti med položajema (nevtralen položaj in upogib za 90°) in odsotnost razlik v mišični togosti med moškimi in ženskami. Nasprotno s predstavljenimi rezultati Bravo-Sanchez in sodelavci (2021) na vzorcu mladih rekreativnih športnikov poročajo o nekoliko nižji ponovljivosti ($ICC = 0,62-0,80$) ob precej višji povprečni togosti ŠS_Z ($15,74-17,49$ kPa) v primerjavi z našo študijo ($7,43 \pm 2,26$ kPa). Na splošno študije poročajo o dobri do odlični ponovljivosti meritev togosti štiriglave stegenske mišice z metodo SWE ($ICC = 0,77-0,90$) (Alfuraih idr., 2019; Lacourpaille, Hug, Bouillard, Hogrel in Nordez, 2012; Dubois idr., 2015).

Podobno kot pri sprednji stegenski mišici literatura poroča o dobri ponovljivosti tudi pri DM_N ($ICC = 0,95$), pri čemer povprečne vrednosti ($2,99 \pm 0,57$ kPa) niso primerljive z našo študijo ($10,21 \pm 2,75$ kPa

(Lacourpaille idr., 2012). Razlog za razlike v mišični togosti bi bil lahko različen položaj ob opravljanju meritev ter manjša stopnja treniranosti preiskovancev v navedeni študiji. Lima, Martins, Pereira in Oliveira (2017) sicer ugotavljajo, da ni povezanosti med mišično togostjo in sposobnostjo proizvodnje največjega zavestnega navora v gleženjskem sklepu. Rezultati te študije nakazujejo dobro do odlično ponovljivost, pri čemer so bile povprečne vrednosti mišične togosti DM_N med $12,78$ in $13,84$ kPa, kar je zelo primerljivo z vrednostmi v naši raziskavi ($DM_N = 10,21 \pm 2,75$ kPa). V skladu z našimi rezultati literatura poroča o dobri ponovljivosti meritev togosti DM_N z metodo SWE ($ICC = 0,82-0,98$) (Kelly idr., 2018; Dubois idr., 2015; Lima, Martins, Pereira in Oliveira, 2017; Davis, Baumer, Bey in Holsbeeck, 2019).

Nadalje Brandenburg in sodelavci (2015) pri otrocih, starih 2–12 let, poročajo o povečanju pasivne mišične togosti od $7,1 \pm 2,9$ kPa v sproščenem položaju do $36,2 \pm 22,0$ kPa v raztegnjenem položaju pri DM_Z. Do podobnih ugotovitev smo prišli tudi v naši študiji, saj se je togost štiriglave stegenske mišice v raztegnjenem položaju povečala ($s \sim 7,5$ kPa na $\sim 12,0$ kPa) pri čemer je bila ponovljivost med različnimi pogoji (položaji) primerljiva. Po drugi strani Šarabon idr. (2020) pri dvoglavi zadnji stegenski mišici poročajo o boljši relativni ponovljivosti v raztegnjenem položaju, kar lahko pripišemo temu, da so podatki v tem položaju bolj heterogeni (heterogenost vzorca ob enaki absolutni napaki povečuje relativno ponovljivost).

Poleg tega naši rezultati kažejo nekatere povezave med togostjo posameznih mišic. Medtem ko togost DM_N ni bila povezana s togostjo nobene druge mišice, togost DM_Z kaže največ značilnih povezav z drugimi mišicami, tako pri moških kot pri ženskah. Pri ženskah je togost DM_Z zmerno povezana s togostjo štiriglave stegenske mišice v raztegnjenem položaju ($r = 0,541-0,655$), medtem ko je pri moških zmerno negativno povezana s togostjo ŠS_Z v obeh položajih ($r = -0,587-(-0,592)$). Nadalje pri obeh spolih opažamo zmerno znotrajmišično povezanost med togostjo obeh glav štiriglave stegenske mišice ($r = 0,531-0,610$). Poleg tega je pri ženskah opazna tudi zmerena povezanost togosti ŠS_N v sproščenem položaju s togostjo mišice v raztegnjenem položaju ($r = 0,511-0,553$).

Kot smo utemeljili v uvodu, je SWE pomembno orodje, ki omogoča kvantitativno

spremljanje stanja mišic in kit v kliničnih in raziskovalnih aplikacijah (Soldos idr., 2021; Schneebeli idr., 2021). Poleg ocenjevanja degradacije mišične napetosti kot posledica sarkopenije ali raka ima ta tehnologija tudi aplikacije na področju športa. Do zdaj se je uporabljala za ocenjevanje resnosti poškodb kit, predvsem Ahilove in patelarne kite, v zadnjih nekaj letih pa se je povečalo zanimanje o povezavi med mišično togostjo in športno uspešnostjo. Višja mišična togost dvoglave mečne mišice v mirovanju je denimo povezana z boljšo sprintersko zmogljivostjo (Yamazaki idr., 2022). Ugotovitve Avrillona idr. (2019), ki so poročali o pomembnih razlikah v mišični togosti med športniki iz različnih panog, kažejo, da je mišična togost plastična lastnost, na katero lahko vplivamo z vadbenimi intervencijami in dolgoročnim športnim udejstvovanjem. Pri oceni mišične togosti moramo upoštevati nekaj ključnih praktičnih in metodoloških napotkov. Izpostaviti moramo predvsem problematično ponovljivost med izvajalci meritev ter vpliv izkušenosti merilca. Akagi in Takahashi (2015) poročata o velikih razlikah v ponovljivosti med izvajalci SWE, saj je bila ponovljivost v njihovi študiji pri izkušenih merilcih dobra ($ICC = 0,84$), pri manj izkušenih pa komaj sprejemljiva ($ICC = 0,59$). Kljub temu rezultati naše študije v skladu z literaturo na tem področju kažejo dobro do odlično ponovljivost SWE za vrednotenje mišične togosti DM_N ŠS_Z pri mladih športnikih.

Zaključek

Glavne ugotovitve naše študije so, da med spoloma ni razlik v mišični togosti in da se togost ne razlikuje znotraj posamezne mišice (znotraj štiriglave stegenske in znotraj dvoglave mečne mišice), vendar obstaja razlika v togosti med dvoglavo mečno in sprednjo stegensko mišico. Poleg tega rezultati naše študije kažejo dobro do odlično relativno ponovljivost elastografije za vrednotenje mišične togosti DM_N ŠS_Z. Vrednotenje togosti z ultrazvočno elastografijo je pri športnikih lahko smiselno dopolnilo drugim metodam in lahko strokovnjake v športni praksi informira o pomembnih lastnostih športnika.

Literatura

- Akdoglu, H. (2018). User's guide to correlation coefficients. *Turkish journal of emergency medicine*, 18(3), 91–93. <https://doi.org/10.1016/j.tjem.2018.08.001>
- Alfuraih, A. M., O'Connor, P., Hensor, E., Tan, A. L., Emery, P. in Wakefield, R. J. (2018). The effect of unit, depth, and probe load on the reliability of muscle shear wave elastography: Variables affecting reliability of SWE. *Journal of clinical ultrasound : JCU*, 46(2), 108–115. <https://doi.org/10.1002/jcu.22534>
- Alnaqeeb, M. A., Al Zaid, N. S. in Goldspink, G. (1984). Connective tissue changes and physical properties of developing and ageing skeletal muscle. *Journal of anatomy*, 139 (Pt 4)(Pt 4), 677–689.
- Ando, R. in Suzuki, Y. (2019). Positive relationship between passive muscle stiffness and rapid force production. *Human movement science*, 66, 285–291. Advance online publication. <https://doi.org/10.1016/j.humov.2019.05.002>
- Avrillon, S., Lacourpaille, L., Hug, F., Le Sant, G., Frey, A., Nordez, A. in Guilhem, G. (2020). Hamstring muscle elasticity differs in specialized high-performance athletes. *Scandinavian journal of medicine & science in sports*, 30(1), 83–91. <https://doi.org/10.1111/sms.13564>
- Brandenburg, J. E., Eby, S. F., Song, P., Zhao, H., Landry, B. W., Kingsley-Berg, S., Bamlet, W. R., Chen, S., Sieck, G. C. in An, K. N. (2015). Feasibility and reliability of quantifying passive muscle stiffness in young children by using shear wave ultrasound elastography. *Journal of ultrasound in medicine : official journal of the American Institute of Ultrasound in Medicine*, 34(4), 663–670. <https://doi.org/10.7863/ultra.34.4.663>
- Creze, M., Nordez, A., Soubeyrand, M., Rocher, L., Maitre, X. in Bellin, M. F. (2018). Shear wave sonoelastography of skeletal muscle: basic principles, biomechanical concepts, clinical applications, and future perspectives. *Skeletal radiology*, 47(4), 457–471. <https://doi.org/10.1007/s00256-017-2843-y>
- 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), 2381–2387.
- Eby, S. F., Cloud, B. A., Brandenburg, J. E., Giambini, H., Song, P., Chen, S., LeBrasseur, N. K. in An, K. N. (2015). Shear wave elastography of passive skeletal muscle stiffness: influences of sex and age throughout adulthood. *Clinical biomechanics (Bristol, Avon)*, 30(1), 22–27. <https://doi.org/10.1016/j.clinbiomech.2014.11.011>
- Goo, M., Johnston, L. M., Hug, F. in Tucker, K. (2020). Systematic review of instrumented measures of skeletal muscle mechanical properties: Evidence for the application of Shear Wave Elastography with children. *Ultrasound in Medicine & Biology*, 46(8), 1831–1840.
- Hopkins, W. G. (2000). Measures of reliability in sports medicine and science. *Sports medicine (Auckland, N.Z.)*, 30(1), 1–15. <https://doi.org/10.2165/00007256-200030010-00001>
- Jacobson, J. A. (2009). Musculoskeletal ultrasound: focused impact on MRI. *AJR. American journal of roentgenology*, 193(3), 619–627. <https://doi.org/10.2214/AJR.09.2841>
- Kelly, J. P., Koppenhaver, S. L., Michener, L. A., Proulx, L., Bisagni, F. in Cleland, J. A. (2018). Characterization of tissue stiffness of the infraspinatus, erector spinae, and gastrocnemius muscle using ultrasound shear wave elastography and superficial mechanical deformation. *Journal of electromyography and kinesiology : official journal of the International Society of Electrophysiological Kinesiology*, 38, 73–80. <https://doi.org/10.1016/j.jelekin.2017.11.001>
- Kjaer, M. (2004). Role of extracellular matrix in adaptation of tendon and skeletal muscle to mechanical loading. *Physiological reviews*, 84(2), 649–698.
- Koo, T. K. in Li, M. Y. (2016). A Guideline of Selecting and Reporting Intraclass Correlation Coefficients for Reliability Research. *Journal of chiropractic medicine*, 15(2), 155–163. <https://doi.org/10.1016/j.jcm.2016.02.012>
- Kot, B. C., Zhang, Z. J., Lee, A. W., Leung, V. Y. in Fu, S. N. (2012). Elastic modulus of muscle and tendon with shear wave ultrasound elastography: variations with different technical settings. *PloS one*, 7(8), e44348. <https://doi.org/10.1371/journal.pone.0044348>
- Kozinc, Ž. in Šarabon, N. (2020). Shear-wave elastography for assessment of trapezius muscle stiffness: Reliability and association with low-level muscle activity. *PloS one*, 15(6), e0234359. <https://doi.org/10.1371/journal.pone.0234359>
- Lacourpaille, L., Hug, F., Bouillard, K., Hogrel, J. Y. in Nordez, A. (2012). Supersonic shear imaging provides a reliable measurement of resting muscle shear elastic modulus. *Physiological measurement*, 33(3), N19–N28. <https://doi.org/10.1088/0967-3334/33/3/N19>
- Lima, K., Martins, N., Pereira, W. in Oliveira, L. (2017). Triceps surae elasticity modulus measured by shear wave elastography is not correlated to the plantar flexion torque. *Muscles, ligaments and tendons journal*, 7(2), 347–352. <https://doi.org/10.11138/mltj/2017.7.2.347>
- Pang, J., Wu, M., Liu, X., Gao, K., Liu, Y., Zhang, Y., Zhang, E. in Zhang, T. (2021). Age-Related Changes in Shear Wave Elastography Parameters of the Gastrocnemius Muscle in Association with Physical Performance in Healthy Adults. *Gerontology*, 67(3), 306–313. <https://doi.org/10.1159/000512386>
- Phan, A., Lee, J. in Gao, J. (2019). Ultrasound shear wave elastography in assessment of skeletal muscle stiffness in senior volunteers. *Clinical imaging*, 58, 22–26. <https://doi.org/10.1016/j.clinimag.2019.06.006>
- Sarto, F., Spörri, J., Fitze, D. P., Quinlan, J. I., Narici, M. V. in Franchi, M. V. (2021). Implementing Ultrasound Imaging for the Assessment

- of Muscle and Tendon Properties in Elite Sports: Practical Aspects, Methodological Considerations and Future Directions. *Sports medicine (Auckland, N.Z.)*, 51(6), 1151–1170. <https://doi.org/10.1007/s40279-021-01436-7>
23. Schneebeli, A., Folli, A., Falla, D. in Barbero, M. (2021). Reliability of Sonoelastography Measurements of Lower Limb Tendon Properties: A Systematic Review. *Ultrasound in medicine & biology*, 47(5), 1131–1150. <https://doi.org/10.1016/j.ultrasmedbio.2020.12.018>
24. Soldos, P., Besenyi, Z., Hideghéty, K., Pávics, L., Hegedűs, Á., Rácz, L. in Kopper, B. (2021). Comparison of Shear Wave Elastography and Dynamometer Test in Muscle Tissue Characterization for Potential Medical and Sport Application. *Pathology oncology research : POR*, 27, 1609798. <https://doi.org/10.3389/pore.2021.1609798>
25. Šarabon, N., Kozinc, Ž. in Podrekar, N. (2019). Using shear-wave elastography in skeletal muscle: A repeatability and reproducibility study on biceps femoris muscle. *PloS one*, 14(8), e0222008. <https://doi.org/10.1371/journal.pone.0222008>
26. Taljanovic, M. S., Gimber, L. H., Becker, G. W., Latt, L. D., Klauser, A. S., Melville, D. M., Gao, L. in Witte, R. S. (2017). Shear-Wave Elastography: Basic Physics and Musculoskeletal Applications. *Radiographics : a review publication of the Radiological Society of North America, Inc*, 37(3), 855–870. <https://doi.org/10.1148/rg.2017160116>
27. Yamazaki, K., Inoue, K. in Miyamoto, N. (2022). Passive and active muscle elasticity of medial gastrocnemius is related to performance in sprinters. *European journal of applied physiology*, 122(2), 447–457. <https://doi.org/10.1007/s00421-021-04848-5>
28. Zardi, E. M., Franceschetti, E., Giorgi, C., Palumbo, A. in Franceschi, F. (2019). Reliability of quantitative point shear-wave ultrasound elastography on vastus medialis muscle and quadriceps and patellar tendons. *Medical ultrasonography*, 21(1), 50–55. <https://doi.org/10.11152/mu-1712>

prof. dr. Nejc Šarabon
Univerza na Primorskem,
Fakulteta za vede o zdravju
nejc.sarabon@fvz.upr.si