

# MOČ MIŠIČNE KONTRAKCIJE, IZVABLJENE Z ELEKTRIČNO STIMULACIJO

## STRENGTH OF MUSCULAR CONTRACTION ELICITED WITH ELECTRICAL STIMULATION

doc. dr. Primož Novak, dr. med., izr. prof. dr. Gaj Vidmar, univ. dipl. psih. \*, Slavica Bajuk, dipl. fiziot., Igor Tomšič, dipl. org., prof. dr. Martin Štefančič, dr. med.

Univerzitetni rehabilitacijski inštitut Republike Slovenije – Soča, Ljubljana

\*tudi Univerza v Ljubljani, Medicinska fakulteta, Inštitut za biostatistiko in medicinsko informatiko, in Univerza na Primorskem, Fakulteta za matematiko, naravoslovje in informacijsko tehnologijo

### Izvleček

#### Izhodišča:

Živčno-mišično električno stimulacijo skeletnih mišic pogosto uporabljamo v terapevtske namene. Podatki o izboljšanju mišične moči pri različnih intenzitetah električne stimulacije se v svetovni strokovni literaturi močno razlikujejo. Z naraščanjem intenzitete električna stimulacija postane neprijetna in boleča. Prag bolečine se med posamezniki razlikuje, zato je na pragu bolečine pričakovati različno silo mišične kontrakcije. Cilj naše raziskave je bil ugotoviti, kakšna je moč kontrakcije kvadricepsa, izvabljene z živčno-mišično električno stimulacijo tik pod pragom bolečine (tj. električno stimulacijo maksimalne tolerance), glede na moč, ki jo preiskovanec doseže pri maksimalni voljni izometrični kontrakciji iste mišične skupine.

#### Metode:

V raziskavo smo vključili 12 zdravih moških preiskovancev v starosti od 22 do 73 let. Izmerili smo napore pri izometrični kontrakciji ekstenzorjev obeh kolen pri maksimalni voljni kontrakciji in med električno stimulacijo maksimalne tolerance, med katero preiskovanci niso voljno napenjali mišic.

#### Rezultati:

Povprečni navor ekstenzorjev kolen, dosežen pri električni stimulaciji maksimalne tolerance, je znašal na desni strani 34,2 Nm oziroma 15 % vrednosti pri maksimalni voljni kontrakciji, in na levi strani v povprečju 39,9 Nm oziroma 18 % vrednosti pri maksimalni voljni kontrakciji. Izrazite povezanosti rezultatov s starostjo nismo opazili pri nobenem od izmerjenih parametrov.

#### Zaključek:

Z električno stimulacijo maksimalne tolerance smo izzvali kontrakcijo kvadricepsa s približno 1/6 navora, ki ga preisko-

### Abstract

#### Background:

*Neuro-muscular electrical stimulation is frequently used for therapeutic purposes. Data on muscle strength improvement using electrical stimulation of different intensities differ widely in the literature. With increasing intensity, stimulation becomes unpleasant and painful. The pain threshold differs between individuals; different muscle force contraction can therefore be expected at pain threshold. The goal of our study was to find out what is the strength of quadriceps contraction, evoked by electrical stimulation bellow the pain threshold (i.e., electrical stimulation of maximal tolerance), compared to the strength achieved at maximal voluntarily isometric contraction of the same muscle group.*

#### Methods:

*Twelve healthy male volunteers, aged 22 to 73, were included in the study. Torques of knee extensors at maximal voluntarily isometric contraction and during electrical stimulation of maximal tolerance without voluntarily contraction was measured for both knees.*

#### Results:

*Average knee extensors torque during electrical stimulation of maximal tolerance was 34.2 Nm (15% of the value of maximal voluntarily isometric contraction) on the right side and 39.9 Nm (18% of value of maximal voluntarily isometric contraction) on the left side. Neither of the parameters exhibited a clear correlation with age.*

#### Conclusions:

*With electrical stimulation of maximal tolerance, quadriceps contraction of approximately 1/6 of the torque achieved at maximal voluntarily isometric contraction of the same muscle was evoked. There were large differences in response between*

vanci dosežejo pri maksimalni voljni izometrični kontrakciji iste mišice. Razlike v odzivnosti so med preiskovanci velike, zato je treba v klinični praksi nastavitve parametrov električne stimulacije prilagoditi posameznemu pacientu.

### Ključne besede:

živčno-mišična električna stimulacija maksimalne tolerance; izometrična kontrakcija; navor

*participants, therefore electrical stimulation parameters should be adjusted to each patient.*

### Keywords:

*neuro-muscular electrical stimulation of maximal tolerance; isometric contraction; torque*

## UVOD

V medicini so s tehnološkim razvojem v zadnjih desetletjih doživele razcvet različne oblike elektroterapije. Predvsem se je uveljavila nizkofrekvenčna električna stimulacija. Ta se uporablja na različnih področjih in v različne namene. Eno najbolj pogosto uporabljenih oblik električne stimulacije predstavljajo implantirani srčni spodbujevalniki, ki vzpostavljajo ustrezno ritmičnost srčnih kontrakcij (1). V rehabilitaciji gibal je velik razmah dosegla električna stimulacija za zunanji nadzor gibanja ohromelih udov – FES (2-9). Pogosto se uporablja tudi protibolečinska električna stimulacija – TENS (10-13), redkeje pa električna stimulacija za pospeševanje procesov zdravljenja kroničnih ran in celjenja kosti (14-16), za izboljšanje cirkulacije krvi (17-19) in v nekatere druge namene.

Ena od oblik nizkofrekvenčne električne stimulacije je stimulacija, ki se uporablja za izvajanje tetaničnih mišičnih kontrakcij in s tem za krepitev prečno-progastih mišic (živčno-mišična električna stimulacija – ŽMES). Učinkovito izvajanje mišičnih kontrakcij s pomočjo ŽMES je možno le ob ohranjeni motorični inervaciji. ŽMES lahko uporabljamo pri zdravih osebah (20), pa tudi v športni medicini tako za pridobivanje večje mišične sile kot za vzdrževanje mišične mase (21). V športu se sicer ŽMES uporablja predvsem pri tistih atletih, pri katerih je pomembna groba mišična moč (22). Nekateri fiziologi menijo, da je električni tok najboljšo sredstvo za zunanje draženje sicer normalno oživčenih mišic, saj ga je možno do neke mere odmerjati po želji. S površinsko električno stimulacijo je mogoče selektivno izvajati vadbo posameznih mišic in mišičnih skupin, ki ležijo razmeroma blizu pod kožo. Sistematična ŽMES vodi k povečanju sile njihove kontrakcije. Hkrati pa se moramo zavedati, da se metodologija uporabe ŽMES med posameznimi avtorji precej razlikuje. Veliko je tudi stanj, pri katerih ŽMES ne smemo uporabljati. Med kontraindikacijami za nizkofrekvenčno električno stimulacijo so najpomembnejše motnje srčnega ritma, vstavljen srčni spodbujevalnik, nosečnost ter maligni tumorji ali sum nanje (23, 24). Izogibati se je potrebno pretirani uporabi ŽMES, kot jo predstavlja tako imenovana »whole body electrical stimulation« zaradi tveganja za rabdomiolizo (25). Ponekod kombinirajo ŽMES z izvajanjem izometričnih mišičnih kontrakcij (26).

ŽMES skeletnih mišic v medicini uporabljamo predvsem za ohranjanje mišične mase in s tem mišične moči med dolgotrajnimi obdobji nerabe ali imobilizacije udov (27). Učinki ŽMES na krepitev mišic so opisani pri različnih okvarah, pri katerih pride do zmanjšanja mišične moči (28, 29). Ta postopek v klinični praksi lahko uporabljamo pri travmatoloških in ortopedskih pacientih pred operativnimi posegi in po njih. Tako ŽMES za krepitev mišic iztegovalk kolen (m. quadriceps femoris) lahko izvajamo pred vstavitvijo endoproteze kolen in po njej (30-33) ter pri rekonstrukciji sprednje križne vezi (34-37). ŽMES je lahko učinkovita metoda tudi pri izboljševanju funkcionalne vadbene sposobnosti pri odraslih osebah z napredujočimi boleznimi, npr. pri kronični obstruktivni pljučni bolezni – KOPB (38, 39), v poštev pa pride tudi pri pacientih, dolgotrajno zdravljenih v enotah intenzivne terapije (40-42).

Pri uporabi ŽMES se zastavlja vprašanje, kakšna stopnja izvajanih mišičnih kontrakcij zadošča za vzbuditev hipertrofičnega odgovora v mišici. Podatki o izboljšanju mišične moči pri različnih intenzitetah električne stimulacije se v svetovni strokovni literaturi močno razlikujejo. Tudi pogledi na učinkovitost električne stimulacije za mišico kvadriceps pri zdravih osebah niso enotni (43). Po eni strani naj bi trening z 10 % moči maksimalne voljne izometrične kontrakcije (MVIK) neokvarjene strani že zadostoval za doseganje porasta mišične moči (35). Po drugi strani pa se predvideva, da večja kot naj bi bila intenziteta kontrakcije med treningom, večjo mišično moč naj bi dosegli.

Pri naraščanju intenzitete ŽMES nastopi nezaželeni učinek. Pri določeni intenziteti stimulacija namreč postane neprijetna in celo boleča. Prag bolečine se med posamezniki razlikuje, zato je različna tudi intenziteta električne stimulacije, ki sproža neprijetne občutke. Govorimo o intenziteti »maksimalne tolerance« električne stimulacije, ki jo posameznik še prenese brez nelagodja oziroma bolečine. Zato je mogoče pričakovati tudi različno silo mišične kontrakcije, izvajane z ŽMES, ki jo različni posamezniki dosežejo ob pragu bolečine.

Cilj naše raziskave je bil ugotoviti, kakšna je moč kontrakcije mišice kvadriceps, izvajane z ŽMES tik pod pragom bolečine, glede na moč, ki jo preiskovanec doseže pri maksimalni hoteni izometrični kontrakciji iste mišične skupine.

## METODE

### Preiskovanci

Preiskovanci so bili naključno izbrani odrasli zdravi moški brez resnejših vnetnih, metabolnih ali drugih internističnih obolenj in brez prizadetosti sklepno-kostnega in živčno-mišičnega sistema spodnjih udov. V raziskavo smo vključili 12 oseb v starosti od 22 do 73 let (srednja vrednost 42 let). Vsi so bili seznanjeni z namenom raziskave in so podpisali izjavo o svobodni in zavestni privolitvi za sodelovanje.

### Meritve navora ekstenzorjev kolen

Dinamometrične meritve smo izvajali na aparatu Biodex System 2, in sicer v Službi za raziskave in razvoj na Univerzitetnem rehabilitacijskem inštitutu Republike Slovenije (URI – Soča). Izmerili smo navor pri izometrični kontrakciji ekstenzorjev kolen (m. quadriceps femoris). Meritve smo izvajali na obeh straneh, najprej na desni, nato na levi nogi. Preiskovanci so med meritvami sedeli na preiskovalnem stolu z nogami, fiksiranimi v položaju 60° fleksije v kolenu. Navor izometrične kontrakcije ekstenzorjev kolen smo merili na dva načina:

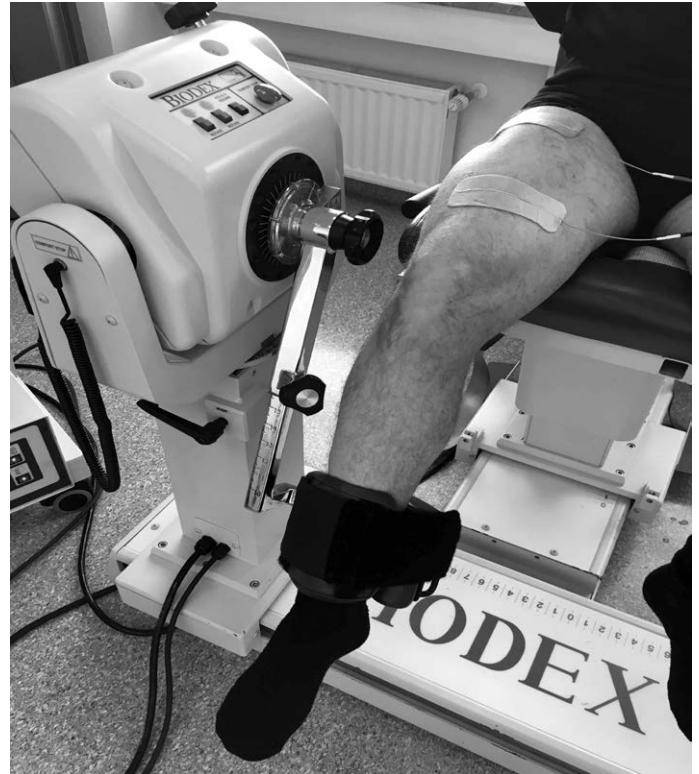
1. Navor pri maksimalni voljni izometrični kontrakciji (MVIK) v smislu ekstenzije kolen v trajanju 5 s z odmorom 20 s pri treh ponovitvah. Preiskovanci so izvajali izometrične kontrakcije ob verbalnem spodbujanju in opazovanju velikosti doseženega navora.
2. Navor ekstenzorjev kolen, dosežen pri ŽMES maksimalne tolerance, povprečen preko treh uspešnih poskusov; pri tem preiskovanci niso voljno napejali mišic.

Pri obeh načinih smo kot dosežek preiskovanca upoštevali povprečje doseženega navora, izraženega v newtonmetrih (Nm).

### Električna stimulacija

Za ŽMES smo uporabili dvokanalni električni stimulator FEDA PO 32 (proizvajalec Soča Oprema, Ljubljana, Slovenija) z napatostnim izhodom. Stimulator proizvaja monofazne pravokotne električne impulze s širino 0,3 ms in frekvenco 20 Hz, ciklično v vlakih trajanja 7 s in z odmori 7 s. Intenziteto (napetost) električne stimulacije smo nastavljali individualno. Uporabili smo samolepilne pravokotne površinske elektrode velikosti 5 × 13 cm (Platinum Neurostimulation Electrodes, Model 895250, Axelgaard manufacturing Co., ZDA). Elektrodni par je bil pritrjen nad sprednjo stranjo stegna, ena elektroda na meji med zgornjo in srednjo, druga elektroda pa na meji med srednjo in spodnjo tretjino stegna; središče proksimalne elektrode je bilo nameščeno nekoliko lateralno, središče distalne pa nekoliko medialno od srednje linije stegna (Slika 1). Pri izvajanju električne stimulacije smo poleg kontraindikacij (23, 24) upoštevali tudi vse previdnostne ukrepe (44).

Pri preiskovancih smo električno stimulacijo nastavili individualno na intenziteto maksimalne tolerance, torej tik pod ravnijo, ko bi električna stimulacija povzročila neprijeten občutek oziroma bolečino. Pri nastavitvi intenzitete maksimalne tolerance smo na podlagi treh uspešnih sekvenc stimulacije določali vrednost izometričnega navora z aparatom Biodex System 2 in izračunali povprečje doseženega navora v Nm.



Slika 1: Namestitev elektrod pri električni stimulaciji.

Figure 1: Placement of electrodes for electrical stimulation.

### Statistična analiza

Za ekstenzijo kolen na obeh straneh smo izračunali oziroma ocenili:

- opisne statistike za dosežen navor MVIK, izražen v Nm;
- opisne statistike za intenziteto (napetost) ŽMES maksimalne tolerance, izraženo v voltih (V);
- povprečne vrednosti doseženega navora pri ŽMES maksimalne tolerance, izraženega v Nm;
- delež doseženega navora pri ŽMES maksimalne tolerance glede na MVIK;
- korelacijo (Pearsonov  $r$  in Spearmanov  $r_o$ ) starosti z MVIK, intenziteto ŽMES maksimalne tolerance, doseženim navorom pri ŽMES maksimalne tolerance in deležem doseženega navora pri ŽMES maksimalne tolerance.

### REZULTATI

V Tabeli 1 so poleg starosti preiskovancev posebej za desno in levo stran navedeni MVIK ekstenzorjev kolen, napetost ŽMES maksimalne tolerance, navor izometrične kontrakcije pri tej napetosti in delež tako doseženega navora glede na MVIK iste mišične skupine. Poleg vrednosti za posamezne udeležence so

**Tabela 1: Zbrani podatki in opisne statistike.****Table 1: Raw data and descriptive statistics.**

Stran/Side		Desno/Right				Levo/Left			
Meritev/Measurement		U	MVIC	ESIC	ESIC	U	MVIC	ESIC	ESIC
Oseba/Person	Starost/ Age	[V]	[Nm]	[Nm]	[%]	[V]	[Nm]	[Nm]	[%]
1	42	50	208,4	58,6	28,1	50	212,5	84,6	39,8
2	45	57	284,0	29,0	10,2	57	268,3	38,6	14,4
3	47	47	148,6	28,6	19,2	47	153,0	23,7	15,5
4	44	72	256,4	25,5	9,9	83	255,8	46,6	18,2
5	33	68	211,0	15,5	7,4	68	210,5	19,9	9,5
6	39	62	256,3	29,7	11,6	68	279,4	22,6	8,1
7	37	48	303,4	26,0	16,3	48	160,2	20,7	12,9
8	35	60	231,8	49,2	16,2	64	284,4	30,4	10,7
9	22	52	231,8	35,8	15,4	52	236,5	86,3	36,5
10	52	58	177,1	22,3	12,6	58	179,0	24,0	13,4
11	39	52	250,0	38,8	15,5	52	245,1	41,3	16,8
12	73	85	174,0	51,0	29,3	84	203,0	39,6	19,5
Opisna statistika/ Descriptive statistics	M	59	227,7	34,2	15,0	61	224,0	39,9	17,9
	SD	11	46,1	12,9	6,8	13	44,9	23,1	10,1
	Min	47	148,6	15,5	7,4	47	153	19,9	8,1
	Max	85	303,4	58,6	29,3	84	284,4	86,3	39,8
Korelacija s starostjo/ Correlation with age	<i>r</i>	0,57	-0,45	0,24	0,50	0,47	-0,28	-0,25	-0,15
	<i>p(r)</i>	0,051	0,140	0,461	0,094	0,124	0,373	0,437	0,639
	<i>ro</i>	0,13	-0,39	0,02	0,28	0,14	-0,33	0,07	0,26
	<i>p(ro)</i>	0,700	0,211	0,948	0,372	0,671	0,301	0,829	0,409

Legenda: U – napetost ŽMES maksimalne tolerance; MVIC – navor ekstenzorjev kolen pri maksimalni voljni izometrični kontrakciji; ESIC – navor ekstenzorjev kolen, dosežen pri ŽMES maksimalne tolerance (izražen absolutno in kot delež MVIC); M – povprečje; SD – standardni odklon; *r* – Pearsonov korelacijski koeficient; *ro* – Spearmanov korelacijski koeficient; *p* – statistična značilnost

Legend: U – voltage of maximum-tolerance neuromuscular electrical stimulation (NMES); MVIC – maximum voluntary isometric contraction of knee extensors; ESIC – elicited torque of knee extensors at maximum-tolerance NMES (absolute and expressed as proportion of MVIC); M – mean; SD – standard deviation; *r* – Pearson correlation; *ro* – Spearman correlation, *p* – statistical significance

navedene tudi opisne statistike za celotno skupino. V Tabeli 1 so navedene tudi ocenjene korelacije. Blizu statistični značilnosti je bila le pozitivna Pearsonova korelacija starosti z napetostjo ŽMES maksimalne tolerance (na obeh straneh).

## RAZPRAVA

Na povečevanje mišične moči s pomočjo ŽMES vplivajo številni dejavniki: oblika, trajanje in intenziteta impulzov, frekvenca, trajanje stimulacije, celotno število apliciranih impulzov, velikost in pozicija elektrod, število in razpored seans idr. Najpomembnejši dejavnik, ki vpliva na porast mišične moči, naj bi bilo pri frekvencah nad 14 Hz skupno število apliciranih impulzov, ki jim

je mišica podvržena (45). Pravilna izbira trajanja kontrakcij in odmorov ter razmerja med njimi (t. i. režima obremenitev, angl. duty cycle) ima poleg ostalih uporabljenih parametrov ključno vlogo pri uspešnosti ŽMES (46).

Pomembno vlogo ima seveda tudi intenziteta stimulacije. Vprašanje, katera intenziteta električne stimulacije je optimalna za krepitev progastega mišičja, še ni povsem razjasnjeno. Različni avtorji omenjajo različno stopnjo intenzitete električne stimulacije pri svojih eksperimentih krepitev mišic in tudi pri rutinskem delu, manj pa je zaslediti jasnih priporočil. Stopnja električne stimulacije za krepitev mišic se običajno izraža v odstotkih dosežene mišične moči glede na MVIC iste oziroma zdrave strani. Razpon intenzitet električne stimulacije, s katerimi so uspeli doseči porast mišične

moči in so opisane v strokovni literaturi, se začne pri minimalni stopnji 5 % in sega vse do 80 % MVIK ali še višje (43). Caggiano in sodelavci tako navajajo, da so v raziskavi, v katero so vključili starejše moške, v skupini z ŽMES za krepitev mišic v povprečju ugotovili 36 % MVIK, doseženega pred začetkom obravnave, medtem ko je druga skupina izvajala tradicionalne vaje za krepitev mišic pri 42 % MVIK. Obe skupini sta dosegli statistično značilen porast mišične moči (47). Razlike med rezultati raziskav gre v veliki meri pripisati različni metodologiji pri aplikaciji električne stimulacije in različnim načinom ocenjevanja mišične moči. Vsekakor mnogi avtorji ne navajajo intenzitete električne stimulacije, pač pa se omejujejo na opisno stopnjo maksimalne tolerance za uporabljeno jakost električnega toka. Ob tem torej ne navajajo vedno vrednosti intenzitete (toka ali napetosti) električne stimulacije, s katero so izvajali kontrakcije. Pri naših preiskovancih pa smo želeli osvetliti tudi to, kakšen je obseg napetosti ŽMES maksimalne tolerance.

Glede na to, da se v praksi pri ojačevalnem treningu z ŽMES uporabljajo površinske elektrode, je pričakovati pri višjih intenzitetah stimulacije zaradi rekrutacije globljih slojev mišic večji porast mišične moči (48). Kot rečeno, pa se z dvigovanjem intenzitete ŽMES pojavlja neprijeten občutek, ki lahko preide pri nadaljnjem dvigovanju v bolečino, čemur se je seveda treba izogniti. Zato moramo ostati pri terapevtskih postopkih z ŽMES v tistih mejah, ki niso neprijetne, kaj šele boleče.

Rezultati v naši raziskavi, v kateri smo se omejili na intenzitete ŽMES v območju pod pragom bolečine, kažejo vrednosti izmerjene mišične moči v povprečju na desni strani 34 Nm oziroma 15 % MVIK, in na levi strani v povprečju 40 Nm oziroma 18 % MVIK. Snyder-Mackler in sodelavci menijo, da naj bi trening s kontrakcijo moči 10 % MVIK neprizadete strani že zadoščal za porast mišične moči (35). Torej ima tudi razmeroma šibka električna stimulacija že pozitiven učinek v smislu izboljševanja mišične moči.

Razlaga za to je v dejstvu, da pri nižjih intenzitetah električne stimulacije prej pride do aktivacije hitrih motoričnih enot fazičnega značaja (tipa II) kot pa do aktivacije toničnih motoričnih enot tipa I (48-50), čeprav je treba priznati, da vse raziskave tega ne potrjujejo (51). Zaporedje rekrutacije motoričnih enot tipa I in II med električno stimulacijo je namreč obratno kot med hoteno kontrakcijo (52). Ob tem je treba upoštevati, da je dosežena mišična moč odvisna tudi od izbrane frekvence električne stimulacije (53). Ne gre prezreti, da lahko zgodnji porast mišične moči pri kratkotrajnih treningih z ŽMES modificirajo živčne, zlasti supraspinalne adaptacije (54). Nelagodje, ki ga povzroča električna stimulacija, pa je odvisno tudi od življenjskega sloga spoprijemanja (55).

Po drugi strani smo opazili velike razlike med posamezniki tako glede MVIK kot glede intenzitete ŽMES maksimalne tolerance in na ta način doseženega navora. Tako je bil MVIK pri naših preiskovancih v povprečju desno 228 Nm (najmanj 149 Nm, največ 303 Nm) in levo 224 Nm (najmanj 153, največ 284 Nm). Pri ŽMES maksimalne tolerance je bila napetost na desni strani v

povprečju 59 V (najmanj 47 V, največ 85 V) in na levi praktično enako (v povprečju 61 V, najmanj 47 V in največ 84 V). Doseženi navor je znašal povprečno na desni 34 Nm (najmanj 16 Nm, največ 59 Nm) in na levi 40 Nm (najmanj 20 Nm, največ 86 Nm). Izrazite korelacije s starostjo nismo opazili pri nobenem od izmerjenih parametrov. Srednje visoka Pearsonova korelacija napetosti ŽMES maksimalne kontrakcije s starostjo je zaradi najstarejšega udeleženca, pri katerem smo dosegli zelo visoko napetost. V skladu s tem je Spearmanova korelacija rangov, ki je posamezne vplivne točke ne povečajo, praktično nična. Brez vplivne točke tudi Pearsonove korelacije ni (znaša 0,02 oz. 0,05 za desno oz. levo stran). Tako se potrjuje pravilo, da je treba v terapevtskem pogledu pri izbiri parametrov električne stimulacije – enako kot tudi pri drugih oblikah fizikalne terapije – upoštevati odzivnost vsakega pacienta posebej.

Nedvomno je glavni način pridobivanja mišične mase in moči tako v športu kot pri pacientih trening z ustreznimi vajami. Prevladuje prepričanje, da so za krepitev mišičja najbolj učinkovite izometrične kontrakcije (56-58). Številni avtorji ugotavljajo, da je v te namene učinkovit tako trening z izometričnimi kontrakcijami kot z ŽMES (20, 59, 60). Obstaja tudi nasprotno stališče, da trening z ŽMES ne dosega tistega z izvajanjem izometričnih vaj (61). V določenih primerih zna biti trening z ŽMES primernejši, npr. pri osebah, ki so slabo motivirane za izvajanje vaj ali pa težko dosežejo dovolj močno voljno kontrakcijo (20). ŽMES ima prednost tudi v posebnih situacijah, kot je imobilizacija v mavcu, ko je izvajanje vaj oteženo (62). Ponekod pa se priporoča za krepitev mišic poleg izvajanja izometričnih kontrakcij njihova kombinacija z ŽMES (26, 37).

## ZAKLJUČEK

Z električno stimulacijo maksimalne tolerance smo izzvali mišično kontrakcijo kvadricepsa s približno 1/6 navora, ki ga preiskovanci dosežejo pri maksimalni hoteni izometrični kontrakciji iste mišice. Razlike v odzivnosti so med preiskovanci velike, zato je treba v klinični praksi nastavitve parametrov električne stimulacije prilagoditi posameznemu pacientu.

### Literatura:

1. Brunner M, Olschewski M, Geibel A, Bode C, Zehender M. Long-term survival after pacemaker implantation. *Eur Heart J* 2004; 25: 88-95.
2. Liberson WT, Holmquest HJ, Scot D, Dow M. Functional electrotherapy – Stimulation of the peroneal nerve synchronized with the swing phase of the gait of hemiplegic patient. *Arch Phys Med Rehab* 1961; 42: 101-105.
3. Moe JH, Post HW. Functional electrical stimulation for ambulation in hemiplegia. *J Lancet* 1962; 82: 285-288.
4. Kantrowitz A. *Electronic physiologic aids*. New York: Maimonides Hospital of Brooklin; 1963.

5. Dimitrijević MR, Gračanin F, Prevec T, Trontelj J. Electronic control of paralyzed extremities. *Biomedical Engineering* 1968; 3: 8-14.
6. Gračanin F. Functional electrical stimulation in control of motor output and movements. *Electroencephalogr Clin Neurophysiol Suppl* 1978; (34): 355-368.
7. Kralj A, Bajd T. Functional electrical stimulation – standing and walking after spinal cord injury. Boca Raton: CRC Press; 1989.
8. Stein RB, Prochazka A. Impaired motor function: functional electrical stimulation. V: Lozano AM, Gildenberg PL, Tasker RR, eds. *Textbook of stereotactic and functional neurosurgery*. Berlin: Springer; 2009: 3047-3060.
9. Bajd T, Munih M. Basic functional electrical stimulation (FES) of extremities: an engineer's view. *Technol Health Care* 2010; 18(4-5): 361-369.
10. Burton D, Maurer DD. Pain suppression by transcutaneous electrical stimulation; *IEEE Trans Biomed Eng* 1974; 21: 81-88.
11. Cheing GLY, Tsui AYY, Lo SK, Hui-Chan CWY. Optimal stimulation duration of TENS in the management of osteoarthritic knee pain. *J Rehabil Med* 2003; 35(2): 62-68.
12. Law PP, Cheing GL. Optimal stimulation frequency of transcutaneous electrical nerve stimulation on people with knee osteoarthritis. *J Rehabil Med* 2004; 36(5): 220-225.
13. Johnson M, Martinson M. Efficacy of electrical nerve stimulation for chronic musculoskeletal pain: a meta-analysis of randomized controlled trials. *Pain* 2007; 130: 157-165.
14. Thomas D, Lassaux G, Bocquillon S, Daumard N. Traitement d'une escarre de décubitus par électrostimulation - Premier résultat `a propos d'un cas. *Cah Kinésithér* 1982; 93: 57-63.
15. Vodovnik L, Karba R. Treatment of chronic wounds by means of electric and electromagnetic fields. Part 1. Literature review. *Med Biol Eng Comput* 1992; 30:257-266.
16. Evans RD, Foltz D, Foltz K. Electrical stimulation with bone and wound healing. *Clin Podiatr Med Surg* 2001; 18: 79-95.
17. Dooley DM, Kasprak M. Modification of blood flow to the extremities by electrical stimulation of the nervous system. *South Med J* 1976; 69(10): 1309-1311.
18. Peters EJG, Armstrong DG, Wunderlich RP, Bosma J, Stacopole-Shea S, Lavery LA. The benefit of electrical stimulation to enhance perfusion in persons with diabetes mellitus. *J Foot Ankle Surg* 1998; 37(5): 396-400.
19. Prešern-Štrukelj M, Poredoš P. The influence of electrostimulation on the circulation of the remaining leg in patients with one-sided amputation. *Angiology* 2002; 53(3): 329-335.
20. McMiken DF, Todd-Smith M, Thompson C. Strengthening of human quadriceps muscles by cutaneous electrical stimulation. *Scand J Rehab Med* 1983; 15: 25-28.
21. Lake DA. Neuromuscular electrical stimulation. *Sports Medicine* 1992; 13(5): 320-336.
22. Delitto A, Brown M, Strube MJ, Rose SJ, Lehman RC. Electrical stimulation of quadriceps femoris in an elite weight lifter: a single subject experiment. *Int J Sports Med* 1989; 10: 187-191.
23. Kitchen S. Neuromuscular and muscular electric stimulation. V: Kitchen S, Bazin S, eds. *Clayton's Electrotherapy*, 10th ed. Philadelphia: Saunders; 1996: 276-286.
24. Shapiro S. Electric Currents. V: Cameron MH, ed. *Physical agents in rehabilitation, from research to practice*, 2nd ed. Philadelphia: Saunders; 2003: 219-240.
25. Malnick SDH, Band Y, Alin P, Maffiuletti NA. It's time to regulate the use of whole body electrical stimulation. *BMJ* 2016; 352.
26. Paillard T. Combined application of neuromuscular electrical stimulation and voluntary muscular contractions. *Sports Medicine* 2008; 38(2): 161-177.
27. Gibson JNA, Smith K, Rennie MJ. Prevention of disuse muscle atrophy by means of electrical stimulation: maintenance of protein synthesis. *Lancet* 1988; 2(8614): 767-770.
28. Sheffler LR, Chae J. Neuromuscular electrical stimulation in neurorehabilitation. *Muscle Nerve* 2007; 35: 562-590.
29. Dehail P, Duclos C, Barat M. Electrical stimulation and muscle strengthening. *Ann Readapt Med Phys* 2008; 51 (6): 441-451.
30. Lewek M, Stevens J, Snyder-Mackler L. The use of electrical stimulation to increase quadriceps femoris muscle force in an elderly patient following a total knee arthroplasty. *Physical Therapy* 2001; 81(9): 1565-1571.
31. Stevens JE, Mizner RL, Snyder-Mackler L. Neuromuscular electrical stimulation for quadriceps muscle strengthening after bilateral total knee arthroplasty: a case series. *J Orthop Sports Phys Ther* 2004; 34(1): 21-29.
32. Walls RJ, McHugh G, O'Gorman DJ, Moyna NM, O'Byrne JM. Effects of preoperative neuromuscular electrical stimulation on quadriceps strength and functional recovery in total knee arthroplasty. A pilot study. *BMC Musculoskelet Disord* 2010; 11:119.
33. Stevens Lapsley JE, Balter JE, Wolfe P, Eckhoff DG, Kohrt WM. Early neuromuscular electrical stimulation to improve quadriceps muscle strength after total knee arthroplasty: a randomized controlled trial. *Phys Ther* 2012; 92(2): 210.
34. Delitto A, Rose SJ, McKowen JM, Lehman RC, Thomas JA, Shively RA. Electrical stimulation versus voluntary exercise in strengthening thigh musculature after anterior cruciate ligament surgery. *Phys Ther* 1988; 68(5): 660-663.
35. Snyder-Mackler L, Delitto A, Stralka SW, Bailey SL. Use of electrical stimulation to enhance recovery of quadriceps femoris muscle force production in patients following anterior

- cruciate ligament reconstruction. *Phys Ther* 1994; 74(10): 901-90.
36. Fitzgerald GK, Piva SR, Irrgang JJ. A modified neuromuscular electric stimulation protocol for quadriceps strength training following anterior cruciate ligament reconstruction. *J Orthop Sports Phys Ther* 2003; 33(9): 492-501.
  37. Kyung-Min K, Croy T, Hertel J, Saliba S. Effects of neuromuscular electrical stimulation after anterior cruciate ligament reconstruction on quadriceps strength, function, and patient-oriented outcomes: a systematic review. *J Orthop Sports Phys Ther* 2010; 40(7): 383-391.
  38. Neder JA, Sword D, Ward SA, Mackay E, Cochrane LM, Clark CJ. Home based neuromuscular electrical stimulation as a new rehabilitative strategy for severely disabled patients with chronic obstructive pulmonary disease (COPD): *Thorax* 2002; 57: 333-337.
  39. Maddocks M, Nolan CM, Man WD, Polkey MI, Hart N, Gao W, Rafferty GF, Moxham J, Higginson IJ. Neuromuscular electrical stimulation to improve exercise capacity in patients with severe COPD: a randomised double-blind, placebo-controlled trial. *Lancet Respir Med* 2016; 4(1): 27-36.
  40. Maffiuletti NA, Roig M, Karatzanos E, Nanas S. Neuromuscular electrical stimulation for preventing skeletal-muscle weakness and wasting in critically ill patients: a systematic review. *BMC Medicine* 2013; 11: 137.
  41. Parry SM, Berney S, Granger CL, Koopman R, El-Ansary D, Denehy L. Electrical muscle stimulation in the intensive care setting: a systematic review. *Crit Care Med* 2013; 41(10): 2406-18.
  42. Burke D, Gorman E, Stokes D, Lennon O. An evaluation of neuromuscular electrical stimulation in critical care using the ICF framework: a systematic review and meta-analysis. *Clin Respir J* 2014; 10(4): 407-20.
  43. Callaghan MJ and Oldham JA: A critical review of electrical stimulation of the quadriceps muscles. *Crit Rev Phys Med Rehab* 1997; 9(3&4): 301-314.
  44. Kralj A, Bajd T. Safety measures in applying electrical stimulators. V: Bajd T. *Functional electrical stimulation of extremities*. Ljubljana: J. Stefan Institute; 1983: 123-125, 132.
  45. Binder-Macleod SA, Dean JC, Ding J. Electrical stimulation factors in potentiation of human quadriceps femoris. *Muscle Nerve* 2002; 25(2): 271-279.
  46. Štefančič M, Bajuk S, Vidmar G, Novak P, Zupanc A, Tomšič I, Petkovšek Gregorin R, Kic N, Omerzo M, Cikajlo I. Prikaz dveh načinov krepitve skeletnih mišic z električno stimulacijo. *Rehabilitacija* 2011; 10: 26-36.
  47. Caggiano E, Emrey T, Shirley S, Craik RL. Effects of electrical stimulation on voluntary contraction for strengthening the quadriceps femoris muscles in an aged male population. *J Orthop Sports Phys Ther* 1994; 20(1): 22-28.
  48. Binder-Macleod SA, Halden EE, Jungles KA. Effects on stimulation intensity on the physiological responses of human motor units. *Med Sci Sports Exerc* 1995; 27: 556-565.
  49. Sinacore DR, Delitto A, King DS, Rose SJ. Type II fiber activation with electrical stimulation: a preliminary report. *Phys Ther* 1990; 70(7): 416-422.
  50. Trimble MH, Enoka RM. Mechanisms underlying the training effects associated with neuromuscular electrical stimulation. *Phys Ther* 1991; 71(4): 273-280.
  51. Gregory CM, Bickel CS. Recruitment patterns in human skeletal muscle during electrical stimulation. *Phys Ther* 2005; 85(4): 358-364.
  52. Henneman E, Somjen G, Carpenter DO. Functional significance of cell size in spinal motoneurons. *J Neurophysiol* 1965; 28: 560-580.
  53. Sbruzzi G, Schaan BD, Pimentel GL, Signori LU, Da Silva AN, Oshiro MS, Irigoyen MC, Plentz RD. Effects of low frequency functional electrical stimulation with 15 and 50 Hz on muscle strength in heart failure patients. *Disabil Rehabil* 2011; 33(6): 486-493.
  54. Hortobágyi T, Maffiuletti NA. Neural adaptations to electrical stimulation strength training. *Eur J Appl Physiol* 2011; 111(10): 2439-2449.
  55. Delitto A, Strube MJ, Shulman AD, Scott DM. A Study of discomfort with electrical stimulation. *Phys Ther* 1992; 72: 410-421.
  56. Hettinger T, Mueller EA. *Muskelleistung und Muskeltraining*. (Muscle capacity and muscle training). *Arbeitsphysiologie* 1953; 15(2): 111-126.
  57. Russek AS, Hofkosh J. *Isometric exercises for physical fitness*. New York: Institute of Rehabilitation Medicine; 1964.
  58. Liberson WT: *Brief isometric exercises*. V: Basmajian JV, ed. *Therapeutic exercise*, 4th ed. Baltimore, London: Williams & Wilkins; 1979: 236-256.
  59. Currier DP, Mann R. Muscular strength development by electrical stimulation in healthy individuals. *Phys Ther* 1983; 63(6): 915 - 921.
  60. Kubiak RJ, Whitman KM, Johnston RM. Changes in quadriceps femoris muscle strength using isometric exercise versus electrical stimulation. *Journal of Orthopaedic & Sports Phys Ther* 1987; 8(11): 537-541.
  61. Walmsley RP, Letts G, Vooyes J. A comparison of torque generated by knee extension with a maximal voluntary muscle contraction vis-a-vis electrical stimulation. *JOSPT* 1984; 6(7): 10-17.
  62. Bax L, Staes F, Verhagen A. Does neuromuscular electrical stimulation strengthen the quadriceps femoris? A systematic review of randomised controlled trials. *Sports Med* 2005; 35(3): 191-212.