

PRIKAZ DVEH NAČINOV KREPITVE SKELETNIH MIŠIČ Z ELEKTRIČNO STIMULACIJO

ON TWO PROTOCOLS FOR STRENGTHENING SKELETAL MUSCLES USING ELECTRICAL STIMULATION

prof. dr. Martin Štefančič, dr. med., Slavica Bajuk, dipl. fiziot., doc. dr. Gaj Vidmar, univ. dipl. psih.,
asist. dr. Primož Novak, dr. med., Aleksander Zupanc, dipl. fiziot., Igor Tomšič, univ. dipl. org.,
Romana Petkovšek Gregorin, dipl. med. ses., Nataša Kic, dipl. med. ses., Martina Omerzo, dipl.
med. ses., prof. dr. Imre Cikajlo, univ. dipl. inž. el.
Univerzitetni rehabilitacijski inštitut Republike Slovenije – Soča, Ljubljana

Izvleček

Izhodišča:

Električno stimulacijo v rehabilitacijski medicini pogosto uporabljamo za krepitev progastega mišičja. Vendar ostaja pri doseganju najboljših učinkov odprta vrsta vprašanj o načinih uporabe, pogojih in zlasti o izboru parametrov.

Metode:

Dvajset zdravih oseb smo razdelili v dve študijski skupini po deset preiskovancev. Prva skupina je izvajala vadbo za krepitev mišic iztegovalk kolena z električno stimulacijo obojestransko, druga skupina pa na dominantni strani z električno stimulacijo, na nedominantni strani pa vadbo aktivnih mišičnih kontrakcij s pomočjo slušno-vidne biološke povratne zanke. Spremembe mišične moči pred vadbo in po njej smo ugotavljali z merjenjem izometričnega maksimalnega navora ekstenzije kolen. Poleg tega smo pri prvi skupini analizirali ravni elektrolitov in osnovnih biokemičnih parametrov v serumu. Pri tej skupini smo vrednosti izometričnega navora primerjali tudi z oceno po Lestvici telesne aktivnosti. Vse podatke smo statistično analizirali.

Rezultati:

Pri obeh skupinah smo ugotovili statistično značilno povečanje maksimalno izvedljivega navora izometrične kontrakcije tako na dominantnem kot na nedominantnem spodnjem udu. Povečanje le-tega se je med skupinama razlikovalo in je bilo pri drugi skupini statistično značilno večje, v tej skupini pa večje na nedominantni strani, torej po vadbi z aktivnimi kontrakcijami. Vrednosti biokemičnih preiskav seruma in elektrolitov so nakazovale

Prispelo: 20. 4. 2011
Sprejeto: 10. 5. 2011

Abstract

Background:

Electrical stimulation is often used in rehabilitation medicine for strengthening skeletal muscles. However, in achieving optimal effects, many open questions remain regarding the protocols, conditions and, particularly, selection of parameters.

Methods:

Twenty healthy volunteers were divided into two study groups of 10 persons each. The first group underwent strengthening training of knee extensor muscles using electrical stimulation on both sides, while the second group used electrical stimulation on the dominant side and active exercise using biofeedback on the non-dominant side. Changes in muscular strength were assessed by measuring peak torque of isometric knee extension. Additionally, blood serum electrolytes and basic biochemical serum parameters were analysed in the first group. In the first group, torque measurements were also compared with physical activity self-assessment scores. All the collected data were statistically analysed.

Results:

A statistically significant increase in peak torque of isometric contraction was observed in both groups on the dominant as well as on the non-dominant lower limb. The increase differed between the groups. It was statistically significantly larger in the second groups, whereby within that group it was larger on the non-dominant side, i.e., after active exercise using biofeedback. Blood test indicated an increase after training only in creatine kinase, but it was not

povečanje po vadbi le pri kreatin-kinazi, a je bilo statistično neznačilno. Ocene po Lestvici telesne aktivnosti so pokazale negativno korelacijo s starostjo in so bile le mejno statistično značilno povezane z nekaterimi izmed merjenih parametrov.

Zaključki:

Glede na ugotovitve študij, narejenih v svetu, in naše študije menimo, da je električna stimulacija poleg poglavitne terapevtske metode – ustrezno izbranih terapevtskih vaj – uporabna kot dopolnilna metoda za krepitev mišic.

Ključne besede:

progaste mišice, krepitev, električna stimulacija, vaje

statistically significant. Physical activity self-assessment scores correlated negatively with age and were only marginally significantly associated with some of the other measured parameters.

Conclusion:

Based on the literature and our own findings, we believe that electrical stimulation is viable as a supplementary method for muscle strengthening in addition to the main one, i.e., properly chosen therapeutic exercise.

Key words:

skeletal muscles, strengthening, electrical stimulation, exercise

UVOD

Skeletno oziroma progasto mišičje se v normalnih pogojih hotene kontrakcije aktivira pod vplivom impulzov, ki po perifernih živcih prihajajo iz centralnega živčevja. Progaste mišice kot efektorni organ za vzdrževanje drže telesa in za gibanje se krčijo zaradi osnovnega refleksnega mehanizma, predvsem pa je njihova aktivnost pod vplivom naše volje. Da bi opravljale svojo osnovno funkcijo, morajo biti mišice v primernem trofičnem stanju in imeti morajo ustrezno mišično moč oziroma silo kontrakcije.

Krčenje mišic lahko dosežemo tudi umetno s pomočjo električnega toka, ki se v stanjih normalnega oživčenja aktivira prek vlaken motoričnih živcev. Depolarizacija vzdražljivih membran, ki jo sproži električni impulz, se širi po živcu v obliki akcijskega potenciala in pri normalno oživčenih mišicah prenaša prek sinaps – motoričnih ploščic na mišična vlakna; električnemu odgovoru v mišici sledi mehanski odgovor – mišična kontrakcija. V bistvu torej z električnimi impulzi dražimo motorične enote, pri tem pa morajo imeti mišična vlakna ohranjeno primerno sposobnost krčenja (kontraktilnost).

Nizkofrekvenčno električno stimulacijo v rehabilitacijski medicini veliko uporabljamo v različne namene (1). Z njo dražimo različna tkiva in organe, med drugim tudi živčevje in mišice – govorimo o živčno-mišični (nevromuskularni) električni stimulaciji. Električno stimulacijo največkrat uporabljamo za protibolečinsko terapijo in za umetno izvajanje mišičnega krčenja. Uporabljamo jo tudi za pospeševanje prekrvitve (2) in nekatere procese celjenja tkiva, vendar redkeje (3). Živčno-mišično električno stimulacijo (ŽMES) lahko izvajamo v funkcionalne in tudi terapevtske namene; med terapevtskimi oblikami se dostikrat uporablja za krepitev progaste mišice.

Pri rehabilitaciji oseb z okvarami gibal se pogosto srečujemo s pacienti, ki imajo atrofično in oslabeledo mišičje, zato je treba mišice pri njih okrepiti. Večjo mišično moč običajno dosežemo z ustrezno vadbo mišičja. Pri terapevtski vadbi ločimo predvsem statične in dinamične oziroma izometrične in izotonične kontrakcije mišic oziroma vaje. Če se pri kontrakciji dolžina mišice zmanjšuje, njen prečni premer povečuje, tonus mišičnih vlaken pa se ne spreminja, se mišica skrajšuje pri enakem tonusu; govorimo o izotonični kontrakciji. Če pa se kontrakcija mišice izvede z večjim tonusom, ne da bi se spremenila njena dolžina, je takšna kontrakcija izometrična. Kljub različnim stališčem še vedno prevladuje prepričanje, da izometrične vaje povečajo mišično moč hitreje in učinkoviteje kot izotonične (4-6). Za povečanje mišične moči naj bi zadoščalo že razmeroma majhno število izometričnih kontrakcij, izvedenih z največjim naprežanjem pri polnem upor, vzdrževanem pet do šest sekund, enkrat dnevno. Poleg tovrstnih aktivnih vaj za krepitev mišic uporabljamo tudi električno stimulacijo.

Doslej je bilo narejenih veliko študij o krepitvi progastega mišičja z ŽMES. Osnovne podatke o tem so sicer ugotovili v študijah na poskusnih živalih. Učinke ŽMES pri krepitvi mišic so opisovali v več študijah pri zdravih ljudeh, pri katerih mišična moč ni bila zmanjšana (7-15). Primerjava ugotovitev iz študij različnih avtorjev je težavna zaradi različnih pristopov, tako pri izvedbi vadbe z električno stimulacijo kot tudi pri ugotavljanju njene učinkovitosti. Večina avtorjev opisuje povečanje mišične moči po vadbi, pri čemer so le nekateri ugotovili statistično značilno izboljšanje.

Terapevtsko metodo že uporabljamo v klinični praksi, in sicer za krepitev mišic pri osebah z oslabeledim, a normalno oživčenim mišičjem. Večinoma gre za paciente po poškodbah in z okvarami okostja in sklepov (16-19). V nekaterih

rehabilitacijskih centrih pa jo uporabljajo za krepitev mišic tudi pri pacientih z okvarami centralnih motoričnih nevronov (20-21). Obnavljanje mišične moči pri pacientih s parezo ali celo paralizo mišičja zaradi insuficience perifernega motoričnega oživčenja pa je povezano s procesom regeneracije motoričnih vlaken perifernih živcev, ki je zapleten splet težav in se jih lotevamo z drugačnimi pristopi, ter ga v prispevku ne opisujemo.

Ponekod po svetu električno stimulacijo uporabljajo pri športnikih, torej pri zdravih ljudeh, da bi povečali njihovo mišično maso oziroma mišično silo. Največ so jo uporabljali v Sovjetski zvezi (22), predvsem pri športnikih tistih športnih disciplin, pri katerih je potrebna velika mišična moč. Nekateri fiziologi menijo, da je električni tok najboljše sredstvo za zunanje draženje sicer normalno oživčenih mišic, saj ga je mogoče poljubno dozirati. S površinsko električno stimulacijo je mogoče selektivno izvajati vadbo za posamezno pomembno mišico in mišično skupino, ki je razmeroma blizu pod kožo. Sistematična električna stimulacija, ki povzroča krčenje mišic, poveča prostornino oziroma maso stimuliranih mišic in tako poveča sile hotenega krčenja le-teh. Vadba z uporabo električne stimulacije v izometričnih pogojih pa ne vpliva na sposobnost koordinacije pri voljnem gibanju.

V primerjavi s hotenim krčenjem mišic lahko električna stimulacija maksimalno aktivira ves kontrakcijski aparat ali pa vsaj privede k močnejšemu krčenju mišic, kot ga dosežemo pri hotenem nadzoru. Poleg tega se maksimalna kontrakcija mišic, ki jo dosežemo s pomočjo električne stimulacije, obdrži dosti dlje kot pri hotenem naprežanju in jo lahko tudi ponavljamo. Zato lahko z uporabo električne stimulacije mišično maso povečamo, pri čemer pa ni nujno, da bi oseba, ki ji mišice stimuliramo, vložila kakršen koli napor. Obstaja tudi možnost vadbe hotenega mišičnega krčenja sočasno z uporabo električne stimulacije.

Zanimivo je, da kljub obsežni svetovni literaturi o študijah učinkov ŽMES pri krepitvi mišic, še vedno ni izdelano jasno stališče, kateri načini ŽMES in v kakšnih pogojih so najbolj učinkoviti. To niti ni presenetljivo, saj so učinki odvisni od vrste različnih dejavnikov, ki vsak na svoj način vplivajo na končni izid. Tudi protokoli tovrstnih študij se med seboj zelo razlikujejo, tako po vadbi z ŽMES kot tudi po različnih načinih ocenjevanja doseženih učinkov.

Različna je lahko že izbira parametrov uporabljenih električnih impulzov, kot so oblika impulzov, frekvenca (nosilna in modulacija z dodatnimi frekvencami), časovna širina posamičnega impulza in trajanje paketov (vlakov) impulzov, odmori med njimi, amplituda, trajanje posameznega postopka, pogostnost oziroma zaporedje postopkov in trajanje celotnega programa. Razlike so tudi pri izbiri vrste, oblike, velikosti in postavitve elektrod. Pomembno je tudi, ali je vadba z ŽMES izvedena v izometričnih ali v izotoničnih pogojih in kakšen je položaj telesa med vadbo;

pri ŽMES stegenskih mišic je pomemben zlasti položaj kolka in kolena.

Proces pridobivanja mišične moči pa je tesno povezan z utrujanjem mišičja. Zato je seveda treba pri vsakem terapevtskem ukrepu za krepitev progastega mišičja in pri ocenjevanju pridobivanja mišične moči upoštevati možnost, da nastopi bolj ali manj izrazita utrujenost mišic. Ustrezno izbrano zaporedje sekvenc krepitve mišic in vmesnih odmorov ter trajanje terapije pa lahko izboljša vzdržljivost mišične aktivnosti. Pravilna izbira časa krčenja mišic in odmora ter razmerja med njima (t. i. režima obremenitev, angl. *duty cycle*) je poleg ustrezne amplitude električnih impulzov ključnega pomena pri pričakovani uspešnosti terapije z ŽMES. Ravno to pa je težava, ki jo je treba pri tovrstnem terapevtskem ukrepanju upoštevati in smo jo želeli v naši študiji pojasniti.

Različni so tudi načini ugotavljanja učinkov ŽMES pri krepitvi mišic. Uporabljamo predvsem biomehanske meritve, s katerimi za ocenjevanje mišične moči največkrat merimo izometrični navor mišične kontrakcije, lahko pa tudi različne teste dinamične dinamometrije. Pomembno je, da upoštevamo, v kakšnih časovnih intervalih po končani vadbi bomo meritve izvajali. Ugotavljamo lahko tudi spremembe mišične mase – bodisi orientacijsko z meritvami obsega udov bodisi z natančnejšim ocenjevanjem preseka mišic z računalniško tomografijo ali magnetno resonanco.

Ker med mišicami, ki relativno hitro atrofirajo, izstopajo mišice iztegovalke kolena (predvsem m. quadriceps femoris), so prizadevanja za čim hitrejše in čim bolj učinkovito krepitev usmerjena predvsem v to mišičje. V rehabilitacijski medicini posvečamo tem mišicam poseben pomen zaradi njihove vloge pri pokončnem položaju človekovega telesa, stabilna staja posameznika pa je izhodišče za vadbo hoje. Tako moramo pri številnih pacientih okrepiti ekstenzorne mišice kolen, pri katerih je nastopila atrofija in oslabeledost kot posledica različnih bolezni in okvar, zaradi katerih morajo pacienti mirovati, kot so na primer stanja po poškodbah in boleznih v predelu kolenskega sklepa.

Zato ŽMES uporabljajo v rutinskih terapevtskih programih že marsikje v rehabilitacijskih centrih po svetu in tudi pri nas (23, 24). Kljub temu pa nekateri vidiki uporabe ŽMES za krepitev progastih mišičnih vlaken niso povsem pojasnjeni. V objavljeni literaturi je razmeroma malo študij o biokemičnih spremembah mišic, ki spremljajo procese krepitve le-teh z ŽMES, če ne upoštevamo ugotovitev, do katerih so prišli pri poskusih na živalih. Ugotavljamo tudi pomanjkanje podatkov o spremljanju indikatorjev metaboličnih procesov iz periferne krvi, povezanih z aktivnostjo progastega mišičja, sproženo s pomočjo ŽMES, ki bi bili dostopni z rutinskimi laboratorijskimi testi.

Osvetlitve zgoraj opisanih odprtih vprašanj smo se lotili v naši študiji. Poleg dveh različnih načinov krepitve mišic z

ŽMES in vadbe aktivnega hotenega krčenja ter spremljanja učinkov s pomočjo meritev sprememb maksimalnega hotenega navora izometrične kontrakcije smo pred dvotedensko vadbo in po njej določili tudi ravni izbranih biokemičnih parametrov iz periferne krvi.

PREISKOVANCI IN METODE DELA

Pri dveh skupinah s po desetimi, naključno izbranimi zdravimi osebami smo izvajali postopke krepitve progatega mišičja z ŽMES, pri drugi skupini pa tudi s slušno-vidno biološko povratno zanko (SVBPZ). Učinke smo ugotavljali z merjenjem maksimalnega izvedljivega navora izometrične kontrakcije (MINIK). Pri prvi skupini smo naredili tudi nekatere biokemične preiskave krvi pred programom vadbe z električno stimulacijo in po njej.

Preiskovanci

Preiskovanci so bile naključno izbrane odrasle zdrave osebe brez resnejših vnetnih, metaboličnih ali drugih obolenj ter brez okvar sklepno-kostnega in živčno-mišičnega sistema na spodnjih udih, pri katerih v zadnji polovici leta niso uporabili nobene od oblik elektroterapije. Vsi so bili seznanjeni z namenom študije in so podpisali izjavo o svobodni in zavestni privolitvi za sodelovanje v raziskavi. Preiskovanci so bili razdeljeni v dve študijski skupini.

V prvo skupino (A) smo vključili 10 oseb, 5 moških in 5 žensk, starih od 25 do 67 let (povprečna starost moških 41,8 let; žensk 35,2 let; vseh skupaj 38,5 let; SD 12,6 let). Preiskovanci iz te študijske skupine so izpolnili tudi Lestvico telesne aktivnosti. V drugo skupino (B) je bilo vključenih 10 žensk, starih od 23 do 49 let (povprečna starost je bila 33,6 let; SD 10,0 let).

Poskusne osebe so izvajale vadbo z ŽMES 10 dni v štiri-najst dnevnem obdobju krepitve ekstenzornih mišic kolen. Skupina A jo je izvajala obojestransko. Skupina B je vadbo z ŽMES izvajala na dominantni strani, na nedominantni strani pa je izvajala aktivne mišične kontrakcije z maksimalnim naporom po metodi SVBPZ. Pri vseh osebah iz obeh skupin smo en dan pred začetkom vadbe z električno stimulacijo in en dan po končani vadbi ugotavljali mišično moč ekstenzornih mišic kolen z določanjem maksimalnega izvedljivega navora izometrične kontrakcije (MINIK) pri hoteni ekstenziji kolen.

Pri skupini A smo določali tudi osnovne biokemične parametre in elektrolite iz periferne krvi preiskovancev. Pred začetkom vadbe z ŽMES (istega dne) in dan po končani vadbi smo preiskovancem odvzeli periferno kri za tovrstne preiskave seruma.

Lestvica telesne aktivnosti

Z Lestvico telesne aktivnosti (LTA) ocenjujemo stopnjo telesne aktivnosti in ugotavljamo, koliko so bili preiskovanci telesno aktivni v zadnjih štirih tednih, in sicer:

- 1) malo ali nič;
- 2) izvajam lažjo ali zmerno telesno aktivnost, vendar ne vsak teden;
- 3) izvajam lažjo telesno aktivnost vsak teden;
- 4) vsak teden izvajam zmerno telesno aktivnost, ki traja manj kot 30 minut na dan, ali pa izvajam lažjo telesno aktivnost petkrat na teden;
- 5) vsak teden izvajam težjo telesno aktivnost, ki traja manj kot 20 minut na dan, ali pa izvajam zmerno telesno aktivnost trikrat na teden;
- 6) izvajam najmanj 30-minutno zmerno telesno aktivnost najmanj petkrat na teden;
- 7) izvajam najmanj 20-minutno težjo telesno aktivnost najmanj trikrat na teden.

Električna stimulacija

Pri preiskovancih iz obeh skupin smo z ŽMES stimulirali ekstenzorne mišice kolen (m. quadriceps femoris). Postopke ŽMES oziroma SVBPZ smo izvajali enkrat dnevno, 10 terapevtskih dni v obdobju dveh tednov. Že pri izboru preiskovancev smo upoštevali vse kontraindikacije za nizkofrekvenčno električno stimulacijo (25, 26), pri izvedbi pa potrebne previdnostne ukrepe (27).

Pri skupini A smo uporabili dvokanalni električni stimulator FEDA-PO-32 (proizvajalec Soča-oprema, Ljubljana, Slovenija) z napetostnim izhodom. Stimulator proizvaja monofazne pravokotne električne impulze, s širino 0,3 ms in s frekvenco 20 Hz. Jakost električne stimulacije smo nastavljali individualno in je bila pri različnih preiskovancih od 6 do 8 V (RMS); to je zadoščalo za izvajanje lahne kontrakcije stimuliranega mišičja. Uporabili smo samolepilne pravokotne površinske elektrode »Valutrode Lite« (Neurostimulation Electrodes), model VL4595, velike 4,5 × 9,5 cm (Axelgaard Manufacturing, ZDA). Elektrodni par je bil pritrjen na sprednji strani stegna, ena elektroda na meji med zgornjo in srednjo, druga elektroda pa na meji med srednjo in spodnjo tretjino stegna. Električna stimulacija je bila ciklična: 7 sekund stimulacije izmenjaje s sedmimi sekundami odmora recipročno glede na stran. Živčno-mišična električna stimulacija je trajala 20 minut dnevno, kar pomeni, da so poskusne osebe izvedle na eni strani 85 električno induciranih 7-sekundnih kontrakcij dnevno, v desetih dneh stimulacije pa skupaj 850. Preiskovane osebe so električno stimulacijo izvajale leže na hrbtu z rahlo podloženimi koleni (skrčenimi pod kotom približno 30°); šlo je za izotonično kontrakcijo.

V skupini B so preiskovanke izvajale ŽMES ekstenzornih mišic kolen z uporabo modificiranega električnega stimu-

latorja AM-10 (proizvajalec ZRI Ljubljana, Slovenija) z napetostnim izhodom, monofaznimi pravokotnimi impulzi, s širino 0,3 ms in s frekvenco 25 Hz. Jakost električne stimulacije smo nastavljali individualno in je bila pri različnih preiskovankah od 8 do 10 V (RMS); s tem smo izvajali zmerno kontrakcijo stimuliranega mišičja. Preiskovanci so električno stimulacijo izvajali leže na hrbtu, pri tem pa je bil stimulirani spodnji ud stabilno nameščen, koleno pa skrčeno pod kotom 30°, tako da so bili zagotovljeni izometrični pogoji. Paketu (vlaku) električnih impulzov, ki je trajal 5,5 sekunde, je sledil 24,5 sekundni odmor. Uporabili smo pravokotne površinske elektrode, ovite z mokro gazo, velike 55×105 mm. Elektrode smo nameščali tako, kot je opisano pri skupini A. Posamezen postopek ŽMES je trajal 10 minut, kar pomeni, da so preiskovanke izvedle 20 električno induciranih 5,5-sekundnih kontrakcij dnevno, v 10 dneh pa skupaj 200 kontrakcij.

Na nedominantni strani so preiskovanci izvajali kratke hitre maksimalne izometrične kontrakcije z ekstenzijo kolena s pomočjo SVBPZ, ki so trajale od 5-6 sekund. Prižiganje kontrolne lučke je bilo signal za trajanje in zaporedje izvajanja kontrakcij, dvakrat na minuto, vsak postopek je prav tako trajal 10 minut.

Dinamometrične meritve mišične moči

Dinamometrične meritve mišične moči smo pri skupini A izvajali z aparatom Biodex v Službi za raziskave URI-Soča, pri skupini B pa s prototipom Fakultete za elektrotehniko v Ljubljani z enakimi merilnimi lastnostmi. Preiskovanec je sedel v preiskovalnem stolu, kolena je imel stabilno nameščena v položaju 60° fleksije. Merili smo izometrični navor ekstenzornih mišic kolen pri hoteni kontrakciji, ki je trajala 5 s, z odmorom 20 s, pri treh ponovitvah. Meritve smo izvedli najprej na dominantni, nato na nedominantni strani. Izračunali smo povprečni MINIK ekstenzornih mišic kolen, izražen v Nm.

Laboratorijski testi krvi

Pri skupini A smo izvedli naslednje rutinske laboratorijske teste:

- biokemične preiskave seruma (glukoza, sečnina, kreatinin, kreatin-kinaza, kortizol, CRP);
- elektroliti seruma (natrij, kalij, kalcij, klor).

Periferno kri za preiskave smo preiskovancem vzeli iz kubitane vene zjutraj na tešče istega dne, ko so začeli s programom krepitev mišic z električno stimulacijo (ena epruveta BD Vacutainer Plastic Serum tube 6 ml).

Enake vzorce krvi smo preiskovancem vzeli za enake teste po končanem programu električne stimulacije (po 10 postopkih) zjutraj na tešče naslednji dan po končani vadbi.

Statistična analiza

Za vse analizirane spremenljivke smo izračunali opisne statistike. Učinek programa živčno-mišične električne stimulacije (ŽMES) oziroma slušno-vidne biološke povratne zanke (SVBPZ) na maksimalno izvedljivi navor izometrične kontrakcije (MINIK) smo v obeh skupinah preizkusili s testom *t* za odvisne vzorce. Razliko med skupinama pri učinku električne stimulacije na MINIK smo preizkusili z enosmerno analizo kovariance (ANCOVA), pri kateri je bila odvisna spremenljivka izmerjena vrednost po končanem programu električne stimulacije, eksperimentalni dejavnik skupina, kovariati pa starost in izmerjena vrednost pred začetkom programa električne stimulacije. Razliko pri povečanju mišične moči med dominantno in nedominantno nogo (kar je v skupini B razlika v učinku programa ŽMES in SVBPZ) smo v vsaki skupini preizkusili s testom *t* za odvisne vzorce. Spremembe pri laboratorijskih testih krvi v skupini A smo za izmerjene vrednosti preizkusili z eksaktnim Wilcoxonovim testom predznačenih rangov. Povezave izmerjenih parametrov s starostjo in STA smo ocenili s Pearsonovim korelacijskim koeficientom. Razlik med spoloma zaradi omejitev vzorca in eksperimentalnega načrta nismo analizirali.

Vse statistične analize smo izvedli s programskim paketom SPSS za okolje Windows (SPSS Inc., Chicago, IL, ZDA). Mejo statistične značilnosti smo postavili pri $p = 0,05$; pri laboratorijskih testih krvi pri obeh skupinah smo upoštevali Bonferronijev popravek za multipla testiranja.

REZULTATI

Značilnosti skupin

Povprečna starost se med skupinama ni statistično značilno razlikovala ($p = 0,348$). Ocena po LTA pri preiskovancih skupine A je bila v povprečju 5,4 (razpon od 3 do 7); pri moških 5,8 (razpon od 3 do 7); pri ženskah pa 5,0 (razpon od 4 do 6). Preiskovanci v obdobju vadbe z ŽMES niso spreminjali svojih navad pri telesni aktivnosti.

Meritve izometričnega navora ekstenzornih mišic kolen

Rezultate meritev maksimalnega izvedljivega navora izometrične kontrakcije (MINIK) ekstenzornih mišic kolen pred začetkom programa ŽMES oziroma SVBPZ in dan po končanem programu smo povzeli v tabeli 1. V obeh skupinah je bilo povprečno povečanje MINIK na dominantni in na nedominantni nogi visoko statistično značilno ($p < 0,001$ za vse štiri teste *t*). Povečanje se je med skupinama pri obeh nogah statistično značilno razlikovalo ($p < 0,001$ za učinek skupine v modelu ANCOVA) in je bilo približno pet- do desetkrat večje v skupini B. V skupini B je bilo povečanje povprečnega

MINIK statistično značilno večje na nedominantni nogi v primerjavi z dominantno nogo, torej večje po vadbi hotene kontrakcije s SVBPZ kot pa po programu ŽMES ($p = 0,050$

za test t). V skupini A med obema nogama preiskovancev ni bilo statistično značilne razlike v povprečnem povečanju MINIK ($p = 0,948$ za test t).

Tabela 1: Opisne statistike za maksimalni izvedljivi navor izometrične kontrakcije (MINIK) ekstenzornih mišic kolen pred začetkom programa vadbe z živčno-mišično električno stimulacijo (ŽMES) oziroma slušno-vidno biološko povratno zanko (SVBPZ) in dan po končanem programu.

		dominatna noga				nedominatna noga			
MINIK (Nm)		pred	po	po - pred	po / pred	pred	po	po - pred	po / pred
Skupina	Vadba	ŽMES				ŽMES			
A	min.	117	127	-8	0,97	134	137	-12	0,92
	maks.	328	344	24	1,09	339	347	19	1,09
	mediana	219,5	221,0	1,5	1,01	210,0	223,0	8,0	1,03
	povprečje	220,4	224,6	4,2	1,02	218,6	222,6	4,0	1,01
	st. odklon	80,0	83,36	9,4	0,04	74,7	79,76	10,2	0,05
Skupina	Vadba	ŽMES				SVBPZ			
B	min.	95	130	0	1,00	100	150	0	1,00
	maks.	175	180	45	1,47	175	200	70	1,60
	mediana	140,0	170,0	30,0	1,25	140,0	190,0	50,0	1,37
	povprečje	134,0	163,5	29,5	1,24	138,5	183,5	45,0	1,35
	st. odklon	27,1	17,96	14,2	0,14	25,7	19,16	20,0	0,18

Laboratorijski testi krvi

Vrednosti biokemičnih preiskav seruma (glukoza, sečnina, kreatinin, kreatin-kinaza, kortizol, CRP) smo povzeli v tabeli 2, vrednosti elektrolitov v serumu pa v tabeli 3. Rezultati biokemičnih preiskav seruma nakazujejo povečanje vrednosti po vadbi le pri kreatin-kinazi, vendar niti to ni bilo

statistično značilno. Vrednosti CRP (v tabeli niso navedene) so bile pri vseh preiskovancih pred vadbo in po njej nespremenjene in v mejah normalnih vrednosti (tj. pod 5 mg/L). Tudi pri stanju elektrolitov ni bilo razlik pred vadbo in po njej, niti pri izmerjenih vrednostih niti pri deležu normalnih vrednosti.

Tabela 2: Rezultati biokemičnih preiskav seruma v skupini A pred začetkom programa in dan po končanem programu.

	glukoza (mmol/L)		kreatin-kinaza (μkat/L)		sečnina (mmol/L)		kreatinin (mmol/L)		kortizol (mmol/L)	
	pred	po	pred	po	pred	po	pred	po	pred	po
min.	4,0	4,0	1,10	1,31	3,0	3,9	49,0	55,0	235	324
maks.	5,6	5,9	7,50	12,81	6,9	7,7	107,0	103,0	889	1044
mediana	5,0	4,8	2,41	4,00	5,2	5,1	72,0	75,5	450	442
povprečje	4,9	4,9	3,10	4,83	5,1	5,2	76,3	78,8	479	510
st. odklon	0,6	0,5	2,32	3,75	1,3	1,2	18,6	17,0	187	236
p	1,000		0,965		1,000		1,000		1,000	
vrednosti v normalnem razponu	10/10	10/10	5/10	4/10	10/10	9/10	9/10	10/10	9/10	9/10

Tabela 3: Rezultati vrednosti elektrolitov v serumu v skupini A pred začetkom programa in dan po končanem programu.

	K (mmol/L)		Na (mmol/L)		Ca (mmol/L)		Cl (mmol/L)	
	pred	po	pred	po	pred	po	pred	po
min.	4,0	4,1	134	139	2,2	2,3	15	95
maks.	4,7	5,1	142	142	2,5	2,5	106	103
mediana	4,2	4,3	141	140	2,4	2,4	102	102
povprečje	4,3	4,5	139	140	2,4	2,4	93	101
st. odklon	0,3	0,4	3	1	0,1	0,1	28	2
p	1,000		1,000		1,000		1,000	
vrednosti v normalnem razponu	6/6	6/6	5/6	6/6	9/9	9/9	9/10	10/10

Povezave izmerjenih parametrov s starostjo in telesno aktivnostjo

Med povezavami izmerjenih parametrov s starostjo in ocenami po LTA so bile (mejno) statistično značilne ali vsaj blizu temu le naslednje:

- pozitivna korelacija MINIK pred in po programu ter povečanja MINIK po programu na dominantni nogi ($r = 0,608$ $p = 0,062$; $r = 0,637$ $p = 0,048$; $r = 0,465$ $p = 0,176$) in na nedominantni nogi z LTA ($r = 0,617$ $p = 0,057$; $r = 0,651$ $p = 0,042$; $r = 0,571$ $p = 0,085$);
- pozitivna korelacija kreatin-kinaze v serumu z LTA pred programom ($r = 0,625$ $p = 0,053$; po programu omembe vredne korelacije ni bilo opaziti);
- pozitivna korelacija glukoze v serumu pred in po programu s starostjo ($r = 0,611$ $p = 0,061$; $r = 0,526$ $p = 0,118$);
- pozitivna korelacija sečnine v serumu pred in po programu s starostjo ($r = 0,652$ $p = 0,042$; $r = 0,608$ $p = 0,062$).

RAZPRAVLJANJE

Številni raziskovalci so preučevali učinke ŽMES na krepitev progastega mišičja. Večina je za ta namen izbrala štiriglavo stegensko mišico (m. quadriceps femoris). To je pretežno fazična mišica, pri kateri se ob določenih pogojih razmerna hitro razvije atrofija in zato se zmanjša mišična moč. Metodologija eksperimentalnih postopkov različnih avtorjev se med seboj močno razlikuje, zato tudi sklepi in priporočila o uporabi ŽMES niso enotni. V večini tovrstnih raziskav so preučevali krepitev mišic pri zdravih ljudeh, druge pa so izvedli pri pacientih z inaktivnostno atrofijo, katere posledica je oslabelelost mišic zaradi raznih stanj po poškodbah in boleznih. V našem prispevku se opiramo predvsem na študije, ki so jih naredili na štiriglavi stegenski mišici (m. quadriceps femoris) pri osebah z normalno inervacijo, ne pa pri stanjih delne ali popolne denervacije ali pri okvarah centralnega živčevja, saj je bila naša študija izvedena pri zdravih ljudeh, preiskovanci pa niso imeli nobenih okvar živčno-mišičnega oziroma sklepno-kostnega sistema.

Po vadbi z živčno-mišično električno stimulacijo (ŽMES) je bila med skupinama A in B očitna razlika pri povečanju maksimalnega izvedljivega navora izometrične kontrakcije (MINIK), saj smo pri skupini B ugotovili znatno povečanje mišične moči v primerjavi s skupino A. Očitno je, da na učinkovitost ŽMES pri krepitvi mišic lahko vplivajo številni dejavniki. Zastavili pa smo si vprašanje, katere so tiste oblike ŽMES, ki bistveno vplivajo na to, da bi želene učinke dosegli. Najprej je treba preveriti različne parametre električnega toka, ki jih lahko uporabljamo v ta namen.

Doslej nimamo otipljivih dokazov, da bi oblika električnih impulzov vplivala na končni učinek pri krepitvi mišic (9). Druga težava je občutek, ki ga različne oblike impulzov

povzročajo osebam med stimulacijo, saj je zanje lahko tudi neprijetna ali celo boleča. Sicer pa naj bi z nizkofrekvenčnimi izbruhi modulirana stimulacija, z izmeničnim tokom z nosilno frekvenco 2,5 kHz, paciente manj motila kot običajna pulzna stimulacija (28). Glede na učinek polov je pri dolgotrajni stimulaciji ustreznejše, če namesto monofaznih uporabljamo bifazno nabojsko uravnotežene impulze. V naši študiji so preiskovanci v obeh skupinah pri stimulaciji uporabljali impulze enake oblike.

Pri trajanju posamičnih impulzov je seveda nujno izbrati čas, ki je zadosten, da v mišici vzbudi akcijski potencial, ki potem sproži mišično kontrakcijo. Kaže, da je trajanje impulza blizu kronaksije ustrezno in večina avtorjev se v praksi dejansko drži tega načela. Od tega stališča sicer odstopajo oblike električne stimulacije z visoko nosilno frekvenco, ki pa je modulirana z bistveno nižjimi paketi (vlakci) impulzov (22). V svoji študiji o krepitvi štiriglave stegenske mišice (m. quadriceps femoris) pri zdravih osebah sta Stefanovska in Vodovnik (9) primerjala učinke električne stimulacije z uporabo dveh vrst stimulacijskih impulzov ali stimuliranja: pravokotnih, monofazičnih, ki so trajali 0,3 ms, z nizko frekvenco ponavljanja (25 Hz); in sinusoidnih visokofrekvenčnih (2,5 kHz) z modulacijsko frekvenco 25 Hz, pri čemer sta opazila, da so bili nizkofrekvenčni pravokotni impulzi pri krepitvi mišice bolj učinkoviti. Zato smo tudi v naši študiji uporabili širino impulza 0,3 ms pri obeh skupinah preiskovancev.

Pri izboru frekvence električnih impulzov je treba upoštevati naravno frekvenco prižiganja motoričnih nevronov, ki je potrebna za vzdrževanje tetanične kontrakcije, pri kateri ima med drugim pomembno vlogo časovno seštevanje (temporalna sumacija) – stimulacijska frekvenca pa naj bi bila znotraj fizioloških obsegov (29). Pri hoteni zmerni kontrakciji (do približno 50 % maksimalne moči) prevladuje obseg frekvenc od 11-21 na sekundo (30). Pri električni stimulaciji, pri kateri gre za sinhrono aktivacijo motoričnih enot stimuliranih mišic, časovnega seštevanja ni mogoče pričakovati, treba je upoštevati predvsem fuzijo kontrakcij – frekvenca stimulacijskih impulzov za krepitev mišic naj bi bila blizu fuzijske frekvence (9). Pri približno 20 Hz že nastopa nekompletna tetanična kontrakcija (31), kontrakcija pa se izboljša (je vse bolj gladka) pri višjih stimulacijskih frekvencah, vendar z njimi narašča tudi mišično utrujanje. Tako se nam zdi izbira frekvence približno od 20-25 Hz za krepitev mišic najbolj primerna. Ob tem pa je treba omeniti, da po svetu sicer za krepitev mišic večinoma uporabljajo višje frekvence, največkrat 50 Hz. Določene razlike pri izbiri frekvence za proženje so tudi med različnimi mišicami, odvisno od tega, ali v njej prevladujejo »počasna« mišična vlakna tipa I ali »hitra« mišična vlakna tipa II. Vendar je večina mišic mešanega tipa in zato je izbor frekvenc med 20 in 25 Hz razumen kompromis.

Ugotovili so namreč, da spremembe hitrosti kontrakcije mišic povzročata v določeni meri tudi sistematična vadba.

V eksperimentalni fiziologiji hitrost kontrakcije definirajo kot obratno vrednost časa, potrebne za doseganje maksimalne izometrične kontrakcije pri posamičnem draženju. Pri tem ima dominantno vlogo tip aktivnosti alfa motoričnega nevrona, ki vpliva na trajanje in hitrost kontrakcije pripadajočih mišičnih vlaken. Pri poskusih na živalih so ugotovili, da se pod vplivom električnega draženja z zelo nizko frekvenco (tonični vzorec stimulacije) spreminjajo lastnosti morfoloških, fizioloških in biokemičnih značilnosti hitrih mišičnih vlaken tipa II v počasna vlakna tipa I. Težje dosežemo spreminjanje počasne mišice v hitrejšo, za kar je sicer potrebno draženje z višjo frekvenco (fazični vzorec), pri čemer je bistvenega pomena izbira stimulacijskih parametrov (32).

Pri krepitvi mišic z električno stimulacijo je pomembna amplituda električnih impulzov, od katere je odvisen obseg prostorskega rekrutiranja motoričnih enot. Zanimivo je, da v literaturi, ki obravnava klinično aplikacijo ŽMES za krepitev progastega mišičja, največkrat opisujejo uporabo jakosti stimulacije do ravni »maksimalne tolerance«. Drugi določajo jakost v odstotkih doseganja maksimalne izometrične kontrakcije, od 5 % pa do več kot 80 % (33). Glede na to, da za ŽMES danes priporočajo predvsem električne stimulatorje s tokovnim izhodom, amplitudo električnih impulzov izražajo v enotah za električni tok (mA). Od jakosti stimulacije je odvisno, koliko mišičnih vlaken se dejansko aktivira. Očitno je, da največje izboljšanje lahko dosežemo le tedaj, če nam uspe, da je v stanju kontrakcije čim večje število vlaken. To seveda lahko povzročamo z dvigovanjem amplitude dražljajev, pri tem pa smo omejeni. Električna stimulacija kot umeten način terapevtskega ukrepanja namreč ne sme biti boleča, kar še zlasti velja za aplikacijo pri pacientih. Sicer lahko sprožimo neželene učinke, zaradi katerih bi morali dodatno ukrepati. Zato je primerno, da amplitudo stimulacije nastavimo pod bolečinski prag, zaradi česar pa jo moramo individualno prilagoditi pri vsaki osebi.

Ta načela smo upoštevali tudi v naši študiji. Poudariti moramo, da so se preiskovanci med seboj zelo razlikovali po občutljivosti za bolečino. Tako pri skupini A kot pri skupini B smo preiskovancem naravnali amplitudo stimulacije pod prag, pri katerem bi le-ti začutili bolečino. Vendar je bila jakost stimulacije pri skupini B v povprečju nekoliko višja kot pri skupini A, kar je bilo videti tudi v ugotovljenih rezultatih. Verjetno bi z dvigovanjem amplitude stimulacije dosegli učinkovitejšo krepitev mišic, kar je opisano na primer pri vadbi športnikov (34), vendar tega nismo želeli, saj bi lahko bila električna stimulacija za preiskovance neprijetna. Po drugi strani pa treba poudariti, da so preiskovanci v skupini B izvajali vadbo z električno stimulacijo v izometričnih pogojih, ki je preiskovanci v skupini A niso izvajali.

Naslednje vprašanje zadeva trajanje paketa (vlakna) impulzov in razmerje med njim in odmorom – govorimo o režimu obremenitev. Intervali odmora med kontrakcijami so potrebni za izplavljanje metabolitov in dopolnitev energetskih

rezerv mišice, kar zmanjšuje možnost za utrujanje mišic. Po izvedeni kontrakciji mora za te procese mišica največ dve minuti počivati, da bi nato lahko vzdrževala največjo raven kontrakcije (8). V praksi uporabljajo različna razmerja zaporedja kontrakcije in odmora; eno od pogosteje uporabljanih je razmerje 10 sekund stimulacije in s tem kontrakcije in 50 sekund odmora oziroma mirovanja (8, 9, 34). V naši študiji se je razmerje 5,5 s kontrakcije in 24,5 s odmora pri skupini B izkazalo kot ustrežnejše od razmerja 7 s / 7 s pri skupini A. Drugačna izbira režima obremenitev je bila tudi največja razlika pri parametrih stimulacije med skupinama A in B. Zato sklepamo, da lahko boljši rezultat pri krepitvi mišic pri skupini B pripišemo tudi daljšemu odmoru med stimulacijskimi paketi (vlakni) kot pri skupini A. Ocenjujemo, da je prav ta razlika poleg amplitude ključnega pomena pri razlagi ugotovljenih rezultatov.

Pomembno pa je tudi trajanje posameznega postopka, pogostnost postopkov in trajanje celotnega programa. Eden od začetnikov uvedbe vadbe za krepitev mišic z električno stimulacijo meni, da se mišična moč povečuje s povečevanjem števila postopkov, vendar le do približno 20 postopkov v enem programu, potem pa se učinek vadbe zmanjša (34). Pri tem navaja, da enak učinek dosežemo, če posameznik vadbo izvaja vsak dan ali vsak drugi dan, vendar pri enakem številu postopkov. Stimulacijska vadba v takšnem zaporedju se tudi nam zdi povsem primerna, predvsem iz praktičnih razlogov, nismo namreč zagovorniki izvajanja vadbe dvakrat dnevno. V naši študiji so preiskovanci vadbo z ŽMES izvajali pet dni v tednu zaporedoma, nato so imeli dva dni odmor in spet pet dni vadbe, skupaj deset postopkov. Med skupinama A in B pri tem ni bilo razlike, pač pa je bila bistvena razlika v trajanju posameznega postopka, saj je ta pri skupini B trajal le pol toliko časa kot pri skupini A.

Pri krepitvi progastega mišičja je namreč potrebno upoštevati utrudljivost mišice, ki nastopa pri določenih pogojih vadbe. Poleg tega ne gre prezreti možnosti utrujanja tudi pri testiranju mišične moči. Na utrujanje mišic pri uporabi ŽMES vplivajo med drugim seveda tudi stimulacijski parametri, zlasti amplituda, frekvenca in vzorec stimulacije. Pri vzdržljivosti in utrudljivosti mišic gre za izredno zapleteno prepletanje različnih dejavnikov, ki v okviru motoričnih enot vključujejo električno vzdružljivost, sinaptični prenos, energetski metabolizem in kontraktilni mehanizem mišičnih vlaken. Pomembno pa je seveda tudi posameznikovo stanje srčnožilnega in dihalnega sistema organizma.

Pri preiskovancih skupine A smo poskušali ugotoviti, ali so dan po končani dvotedenski vadbi z ŽMES morebiti v njihovi periferni krvi spremembe ravnih najbolj zastopanih elektrolitov in osnovnih biokemičnih parametrov, ki so na razne načine povezani z mišičnim metabolizmom. Pri elektrolitih v serumu (natrij, kalij, kalcij, klor) niti pred vadbo z električno stimulacijo niti po njej nismo opazili skoraj nobenih odstopanj od normalnih vrednosti, prav tako pa se vrednosti niso statistično značilno spremenile. Biokemične

preiskave seruma so pokazale normalne vrednosti glukoze, sečnine, kreatina, kortizola in CRP tako pred vadbo kot tudi po njej. Izjema so bile vrednosti kreatin-kinaze, ki so bile že pred vadbo z ŽMES pri polovici preiskovancev nekoliko višje, še bolj pa po vadbi, vendar sprememba ni bila statistično značilna, višje vrednosti pa so bile še vedno razmeroma nizke v primerjavi z ravni, ki jo dosežemo po intenzivnem telesnem naporu. Preiskovanci skupine A so imeli dokaj visoke ocene po LTA, kar pomeni, da so bili pred vadbo z ŽMES, med njo in po njej tudi sicer nadpovprečno telesno aktivni. Ne glede na to menimo, da ŽMES v razmerju 7 sekund stimulacije in 7 sekund odmora povečuje možnost povišanja tega encima, ki je povezan z mišičnim delom. To spet potrjuje naše prepričanje, da je režim obremenitev z daljšim odmorom primernejši.

Pri odnosa med oceno po LTA in maksimalnim izvedljivim navorom izometrične kontrakcije (MINIK) pred programom krepitve in po njem je pozitivna korelacija zanimiva in ne preseneča. Prav tako je pričakovana pozitivna korelacija med serumsko kreatin-kinazo in oceno po LTA pri telesno aktivnejših osebah že pred programom krepitve mišic. Enako lahko rečemo tudi o povezavi višjih ravni glukoze in sečnine v serumu s starostjo preiskovancev.

Pri učinkovitosti metod za krepitev progastega mišičja vse-skozi poudarjajo vprašanje primerljivosti vadbe z električno stimulacijo in izvajanjem določenih oblik terapevtskih vaj. Tudi to vprašanje je predmet študij številnih avtorjev. Glede tega je značilna študija o učinkih krepitve ekstenzornih mišic kolen pri zdravih ljudeh, ki sta jo objavila Currier in Mann (7). Preiskovance sta razdelila v štiri skupine: prva je izvajala le izometrične kontrakcije, druga le električno stimulacijo, tretja je hkrati izvajala izometrične vaje in električno stimulacijo, kontrolna skupina pa ni imela poskusne vadbe. Ugotovila sta povečanje navora maksimalne izometrične kontrakcije pri vseh treh poskusnih skupinah, ne pa tudi pri kontrolni, pri čemer se povečanje med poskusnimi skupinami ni statistično značilno razlikovalo.

V skupini B smo primerjali učinke vadbe z ŽMES in vadbe aktivnih kontrakcij z maksimalnim naporom s SVBPZ, ki predstavlja prilagojene terapevtske vaje. Vadba s hotenim naporom s pomočjo SVBPZ je bila učinkovitejša kot električna stimulacija, čeprav je bila slednja prav tako učinkovita pri povečanju grobe mišične moči. McMiken in sod. so v podobni študiji pri zdravih ljudeh prav tako ugotovili povečanje moči, tako v skupini po vadbi z električno stimulacijo kot tudi v skupini po izometričnih vajah, pri čemer med njima ni bilo statistično značilne razlike, praktično uporabnost električne stimulacije pri rehabilitaciji pacientov pa vidijo pri tistih, ki niso zmožni vzdrževati učinkovite hotene kontrakcije (35). Učinkovitost električne stimulacije pri krepitvi mišic je v svoji predhodni raziskavi potrdila tudi Bajukova (36), ki sicer ugotavlja, da je hotena mišična kontrakcija najbolj učinkovita metoda za povečevanje moči in vzdržljivosti mišic, vendar pri fizioterapiji in športni medicini lahko

električno stimulacijo uporabljamo kot dopolnilno metodo. Takšno stališče lahko potrdimo tudi po ugotovitvah iz naše študije.

ZAKLJUČKI

Čeprav uporaba ŽMES v določeni meri prispeva h krepitvi normalno oživčenega progastega mišičja, ugotavljamo, da smo v klinični praksi pri uporabi tega terapevtskega postopka omejeni, zlasti glede jakosti stimulacije, ki jo moramo prilagoditi tolerančnemu pragu vsakega posameznega pacienta. Poleg izbire drugih standardnih parametrov električnih impulzov je potrebno upoštevati ugodno razmerje med fazo stimulacije in fazo odmora, ki naj bo nekajkrat daljša, da si stimulirana mišica v časovnem intervalu med paketi (vlaki) impulzov opomore. Pravilno izbrana električna stimulacija je torej dopolnilna metoda pri krepitvi progastih mišic, poglobljena metoda pa so še vedno ustrezno izbrane in odmerjene terapevtske vaje.

Literatura:

1. Vodovnik L, Valenčič V, Strojnik P, Klun B, Štefančič M, Jelnicar T. Improvement of some abnormal motor functions by electrical stimulation. *Med Prog Technol* 1982; 9(2-3): 141-7.
2. 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): 329-35.
3. Karba R, Vodovnik L, Prešern-Štrukelj M, Klešnik M. Promoted healing of chronic wounds due to electrical stimulation. *Wounds* 1991; 3: 16-23.
4. Hettinger T und Mueller EA. Muskelleistung und Muskeltraining. [Muscle capacity and muscle training]. *Arbeitsphysiologie* 1953; 15(2): 111-26.
5. Russek AS, Hofkosh J. Isometric exercises for physical fitness. New York: Institute of Rehabilitation Medicine, 1964.
6. Liberson WT. Brief isometric exercises. In: Basmajian JV, ed. *Therapeutic exercise*. 4th ed. Baltimore, London: Williams & Wilkins, 1979: 236-56.
7. Currier DP, Mann R. Muscular strength development by electrical stimulation in healthy individuals. *Phys Ther* 1983; 63(6): 915-21.
8. Selkowitz DM. Improvement in isometric strength of the quadriceps femoris muscle after training with electrical stimulation. *Phys Ther* 1985; 65(2): 186-96.

9. Stefanovska A, Vodovnik L. Change in muscle force following electrical stimulation. Dependence on stimulation waveform and frequency. *Scand J Rehabil Med* 1985; 17(3): 141-6.
10. Rankin RR, Stokes MJ. Fatigue effects of rest intervals during electrical stimulation of the human quadriceps muscle. *Clin Rehabil* 1992; 6: 195-201.
11. Laufer Y, Ries JD, Leininger PM, Alon G. Quadriceps femoris muscle torques and fatigue generated by neuromuscular electrical stimulation with three different waveforms. *Phys Ther* 2001; 81(7): 1307-16.
12. Parker MG, Bennett MJ, Hieb MA, Hollar AC, Roe AA. Strength response in human femoris muscle during 2 neuromuscular electrical stimulation programs. *J Orthop Sports Phys Ther* 2003; 33(12): 719-26.
13. Lyons CL, Robb JB, Irrgang JJ, Fitzgerald GK. Differences in quadriceps femoris muscle torque when using a clinical electrical stimulator versus a portable electrical stimulator. *Phys Ther* 2005; 85(1): 44-51.
14. Chou LW, Ding J, Wexler AS, Binder-Macleod SA. Predicting optimal electrical stimulation for repetitive human muscle activation. *J Electromyogr Kinesiol* 2005; 15(3): 300-9.
15. Scott WB, Causey JB, Marshall TL. Comparison of maximum tolerated muscle torques produced by 2 pulse durations. *Phys Ther* 2009; 89(8): 851-7.
16. 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): 660-3.
17. Callaghan MJ, Oldham JA, Winstanley J. A comparison of two types of electrical stimulation of the quadriceps in the treatment of patellofemoral pain syndrome. A pilot study. *Clin Rehabil* 2001; 15(6): 637-46.
18. Fitzgerald GK, Piva SR, Irrgang JJ. A modified neuromuscular electrical stimulation protocol for quadriceps strength training following anterior cruciate ligament reconstruction. *J Orthop Sports Phys Ther* 2003; 33(9): 492-501.
19. 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.
20. Turk R, Kralj A, Bajd T, Štefančič M, Benko H. The alternation of paraplegic patients muscle properties due to electrical stimulation exercising. *Paraplegia* 1980; 18(6): 386-91.
21. Rabischong E, Ohanna F. Effects of functional electrical stimulation (FES) on evoked muscular output in paraplegic quadriceps muscle. *Paraplegia* 1992; 30(7): 467-73.
22. Kots JM. Elektrostimulacionaja trenirovka normalnih mišic v medicine i sporte. In: Električeskaja stimulacija tkanei i organov, Kaunas 1975: 274-7.
23. Jelnikar T, Štefančič M, Stefanovska A. Mogučnosti povečanja snage oslabljenog mišića kvadriceps femoris pomoću električne stimulacije. In: 7. Fizijatrijski dani Jugoslavije: zbornik radova, Kanjiža, 13.-15. juni 1985. Kanjiža: Centar za rehabilitaciju i rekreaciju, 1985: 396-99.
24. Kolenc A, Stefanovska A, Vodovnik L, Štefančič M, Jelnikar T. Krepitev atrofirane mišice kvadriceps s pomočjo električne stimulacije. *Med Razgl* 1990; 29(1): 73-84.
25. Kitchen S. Neuromuscular and muscular electrical stimulation. In: Kitchen S, Bazin S, eds. Clayton's electrotherapy. London [etc.]: Saunders, cop. 1996: 276-86.
26. Shapiro S. Electrical currents. In: Cameron MH. Physical agents in rehabilitation: from research to practice. 2nd ed. St. Louis: Saunders, cop. 2003: 219-40.
27. Kralj A, Bajd T. Safety measures in applying electrical stimulators. In: Bajd T. Functional electrical stimulation of extremities. Ljubljana: J. Stefan Institute, 1983: 123-5, 132.
28. Ward AR, Robertson VJ, Ioannou H. The effect of duty cycle and frequency on muscle torque production using kilohertz frequency range alternating current. *Med Eng Phys* 2004; 26(7): 569-79.
29. Mizrahi J. Fatigue in muscles activated by functional electrical stimulation. *Crit Rev Phys Rehabil Med* 1997; 9(2): 93-129.
30. Person RS, Kudina LP. Discharge frequency and discharge pattern of human motor units during voluntary contraction of muscle. *Electroencephalogr Clin Neurophysiol* 1972; 32(5): 471-83.
31. Giese AC. Cell physiology. 3rd ed. Philadelphia [etc.]: Saunders, 1968.
32. Karba R, Stefanovska A. Plastičnost skeletnih mišic – strukturno-funkcionalne spremembe po električni stimulaciji. *Med Razgl* 1989; 28(2): 185-96.

33. Callaghan MJ, Oldham JA. A critical review of electrical stimulation of the quadriceps muscles. *Crit Rev Phys Rehabil Med* 1997; 9: 301-14.
34. Koc J. Fiziološki aspekti razvoja snage sportista. *Trenerska tribina* 1973/74; 8: 1-12.
35. McMiken DF, Todd-Smith M, Thompson C. Strengthening of human quadriceps muscles by cutaneous electrical stimulation. *Scand J Rehabil Med* 1983; 15(1): 25-8.
36. Bajuk S. Vpliv električne stimulacije na moč zdrave mišice quadriceps femoris. Diplomsko delo. Ljubljana: Univerza v Ljubljani, Visoka šola za zdravstvo, Oddelek za fizioterapijo, 2001.