

UPORABA FUNKCIONALNE ELEKTRIČNE STIMULACIJE PRI KOLESARJENJU OSEB PO POŠKODBI HRBTENJAČE

THE USE OF FUNCTIONAL ELECTRICAL STIMULATION FOR CYCLING IN PATIENTS AFTER SPINAL CORD INJURY

Barbara Kočar, dipl. fiziot., Pavla Obreza, dipl. fiziot., univ. dipl. soc. ped.
Univerzitetni rehabilitacijski inštitut Republike Slovenije – Soča, Ljubljana

Povzetek

Kolesarjenje s funkcionalno električno stimulacijo (FES) se uporablja v rehabilitaciji več kot 30 let. Veliko avtorjev v literaturi poroča o fizioloških prilagoditvah pri osebah po poškodbi hrbtenjače, možganski kapi in cerebralni paralizii po kolesarjenju s FES. Želeli smo pregledati članke s tega področja in povzeti principe kolesarjenja s FES ter njegove pozitivne učinke na metabolizem pri bolnikih s poškodbo hrbtenjače. Namen FES je stimulacija velikih mišičnih skupin paraliziranih spodnjih udov in vzpostavitev cikličnega gibanja nog. Pri FES-kolesarjenju preko računalnika s površinskimi elektrodami stimuliramo mišice quadriceps, fleksorje kolen in gluteus maximus. Avtorji številnih študij poročajo o ugodnih učinkih kolesarjenja s FES, kot so povečanje mišične mase, izboljšanje krvnega pretoka, zmanjšanje preležanin, zmanjšanje mineralne izgube kostne gostote in izboljšanje samopodobe.

Ključne besede:

kolesarjenje; funkcionalna električna stimulacija; okvara hrbtenjače; pregled literature

Abstract

Cycling with FES has been used in rehabilitation for over 30 years. Its purpose is to stimulate large muscle groups of the paralysed lower limbs to create a cyclic movement of the legs. In FES-cycling the quadriceps, hamstrings and gluteus maximus are stimulated with surface electrodes through a computer. Many studies report on the physiological adjustments after cycling with FES in individuals after spinal cord injury, stroke and cerebral palsy. Many studies have reported beneficial effects of FES cycling, such as increasing muscle mass, better blood flow, reduction of pressure ulcers, improved self-image and reduction of bone mineral density loss.

Key words:

cycling; functional electrical stimulation; spinal cord impairment; review of literature

Poslano: 19. 10. 2014

Sprejeto: 4. 8. 2015

Naslov za dopisovanje/Address for correspondence (BK): ko.barbara@gmail.com

UVOD

Osebe po okvari hrbtenjače deloma ali popolnoma izgubijo nadzor nad hotenim gibanjem mišic, ki so oživčene z živci pod ravnijo okvare hrbtenjače. Pri osebah po okvari hrbtenjače se zmanjša mišična masa, pogosto se zniža tudi stopnja kardiorespiratorne pripravljenosti. To vodi v bolezni, ki so povezane z nedejavnostjo,

kot so hiperlipidemija, debelost, diabetes, bolezni srca in ožilja (1), demineralizacija kosti in preležanine (2, 3). Zadnjih nekaj let je bolezen srčno-žilnega sistema eden vodilnih vzrokov umrljivosti pri kroničnih bolnikih po okvari hrbtenjače (4). Redna telesna vadba ima pomembno vlogo pri zmanjševanju dejavnikov in zapletov, ki ogrožajo zdravje, kot so hiperlipidemija, osteoporozna, vnetja dihal in razjede na koži zaradi pritiska (5).

V zadnjih letih so se razvile različne tehnike funkcionalne električne stimulacije (FES) za stojo, hojo in kolesarjenje, ki omogočajo učinkovitejšo izvedbo teh dejavnosti, pa tudi izboljšanje telesne kondicije oseb po okvari hrbtenjače s paraplegijo (6). Pri FES za vzdraženje tkiva uporabljamo električni tok, pri čemer želimo izboljšati funkcijo mišic. Stojimo lahko dosežemo s FES in sočasno aktivacijo obeh mišic quadriceps in mišic gluteus maximus za izteg kolen in kolkov, kar omogoči osebi, da vstane iz sedečega položaja in se presede na drugo površino (7). Za izboljšanje funkcije hoje so Kralj in sodelavci s FES peronealnega živca dosegli fleksijsko umaknitveno refleksno reakcijo kolka, kolena in gležnja. Ta odgovor na FES privede do zadostnega zamaha spodnjih udov med hojo (7).

Sistem kolesarjenja s FES je bolj zapleten kot stoja in hoja z uporabo FES, zato je potrebna uporaba računalnika, ki nadzira posamezno stimulacijo mišičnih skupin, da zagotovi ciklično gibanje nog. Kolesarjenje s FES se v rehabilitaciji uporablja pogosto (6). Avtorji številnih študij poročajo o ugodnih fizioloških prilagoditvah po redni vadbi, ki se kažejo v povečani mišični moči, večji vzdržljivosti, povečani gostoti kosti, zmanjšanju spastičnosti in izboljšanju funkcije srca in dihanja. Koristi se kažejo tudi na psihološkem področju (6, 8, 9).

V članku smo želeli prikazati osnovne principe kolesarjenja s FES in pripraviti pregled učinkov kolesarjenja s FES na presnovo.

Glavne značilnosti kolesarjenja s FES

Za kolesarjenje s FES potrebujemo računalnik, ki nadzira serijo posameznih stimulacij mišičnih skupin paraliziranih mišic, da zagotovi ciklično gibanje nog, kot kaže Slika 1.



Slika 1. Kolesarjenje s FES.

Običajno v ustreznem zaporedju stimuliramo mišice, ki iztegujejo in krčijo kolena ter glutealne mišice, saj želimo ohraniti navor v sklepu v spodnjih udih pri vožnji. Stopnjo stimulacije mišičnih skupin nadzira računalnik. Ta določa količino navora in hitrost vrtenja pedal (6). Možno je stimulirati tudi mišice meč. Njihov prispevek pri moči potiskanja pedal je skoraj nič, vendar pa se tako izboljša kroženje krvi v distalnem delu spodnjih udov (10).

Fiziološki in terapevtski učinki

Vpliv na žilni sistem, delovanje srca in dihanje

Pri kolesarjenju s FES je Haapala s sodelavci uporabil frekvenco 50 vrtljajev na minuto (rpm) (11). Vendar je za doseglo najboljšega rezultata in zmanjšanja utrujenosti potrebno določiti ustrezne parametre stimulacije. Optimalna rešitev so različne kombinacije parametrov, kot kaže Tabela 1 (10, 12). Vsak posameznik ima svojo optimalno kombinacijo parametrov, saj na čas stimulacije ne vpliva le drža, temveč tudi položaj posameznika v vozičku. Pomemben je predvsem kot v kolku (8).

Tabela 1. Parametri kolesarjenja s FES (10, 12).

Parametri kolesarjenja s FES	Vrednosti
Št. kanalov	8
Čas ogrevanja/ohlajanja	5min/ 5min
Frekvenca el. toka	50 Hz
Maksimalni tok	120-300 mA
Trajanje dražljaja	0,1-1 ms
Oblika dražljaja	pravokotni, sinusni, trikotni
Polariteta	monofazni ali bifazni
Trajanje vlakov dražljajev	začetno povečanje jakosti dražljajev, počasno znižanje jakosti dražljajev, začetni dvojni dražljaj
Frekvenca vrtenja (rpm)	10 do 60
Čas	start-stop moment posamezne mišične skupine
Predpriprava	100-150 ms

Fornusek s sodelavci je v študijo vključil osem telesno nedejavnih oseb po poškodbi hrbtenjače, pri katerih so merili obseg sredine stegna (13). Trening je trajal šest tednov, trikrat tedensko po 30 min/dan. Pri tem je bila ena noga naključno stimulirana za frekvenco vrtenja 10 rpm, 30 minut na dan, druga noga pa za frekvenco 50 rpm, 30 minut na dan. Ugotovili so, da sta se obseg stegna in mišična moč bolj povečala pri vadbi z nizko frekvenco vrtljajev ($6,6 \% \pm 1,2 \%$) kot pa pri vadbi z visoko frekvenco vrtljajev ($3,6 \% \pm 0,8$) (13). Kot pomembna dejavnika kolesarjenja s FES, ki vplivata na izid programa predvsem na srčno-žilno funkcijo, sta se pokazala tudi čas trajanja in intenzivnost vadbe. Nekatere študije namreč kažejo, da mora biti oseba po poškodbi hrbtenjače v program kolesarjenja s FES vključena vsaj dva do štiri tedne, da pride do žilnih prilagoditev, kot so povečan prečni presek arterije in izboljšan pretok krvi v spodnjih udih (14-16). Avtorji drugih študij navajajo, da je potrebno šest do osem tednov vadbe, da lahko vzdržujemo terapevtski učinek (17-19, 21).

Kolesarjenje s FES se je izkazalo učinkovito pri izboljšanju nekaterih kazalcev srčno-žilnih funkcij, kot kaže Tabela 2 (6). Gerrits in sodelavci so po šesttedenskem programu vadbe opazili

spremembe v gostoti kapilar in povečanje pretoka skozi arterije (a. femoralis in a. carotis communis), pri čemer je bil premer žilnih sten normalen (17).

Ena najpomembnejših prednosti kolesarjenja s FES je izboljšanje srčno-dihalne funkcije (5, 10, 22-25). Ob vadbi se poveča srčni utrip, utripni volumen srca in minutni volumen srca (5, 22-26). Avtorji nekaterih študij poročajo o pomembnem povečanju forsirane vitalne kapacitete, forsiranega izdihanega volumna v prvi sekundi (FEV1) in kapacitete forsiranega vdiha (FIC) (27, 28). Mohr in sodelavci so pri preiskovancih po 12 mesecih FES kolesarjenja v študiji našli povečan vnos kisika (VO₂) z 1,20 litra na 1,43 litra (5). Hooker in sodelavci (25) ter Raymond in sodelavci (26) so ugotovili višji VO₂ max pri osebah po poškodbi hrbtenjače po 19 tednih kolesarjenja s FES. S tako vadbo lahko torej dosežemo VO₂ max 50-60 % pričakovanih vrednosti za zdravo populacijo (25). Hooker in sodelavci so poročali, da so pri osebah po poškodbi hrbtenjače, ki pred tem niso bile vključene v vadbo, lahko dosegli 23-odstotno povišanje VO₂ max, po tem ko so bile vključene v program kolesarjenja s FES 2- do 3-krat na teden, v trajanju 12 do 16 tednov (30).

Tabela 2. Fiziološki učinki kolesarjenja s FES na srčno-žilni in srčno-dihalni sistem (6).

	Pred kolesarjenjem s FES	Po kolesarjenju s FES
Fiziološke značilnosti bolnika po okvari hrbtenjače	↓ premer kanala arterije	↑ prečni presek arterije in gostota kapilar
	↓ kapilarizacija	↑ aerobna kapaciteta in ventilacija
	↓ krvni obtok v nogah	↑ volumen priliva krvi v noge
	↓ oksidativna kapaciteta v mišicah nog	↑ vnos kisika
		↑ mase levega prekata srca,
		↑ diastoličnega volumna levega prekata in lipoproteina z visoko gostoto (HDL)

Poleg fizioloških učinkov ima kolesarjenje s FES tudi psihološke učinke. Med dejavnostjo se sprošča beta-endorfin, ki pri vadeči osebi sproži dobro počutje. Poleg tega so Sipsky in sodelavci (8) ugotovili, da je večina od 52 preiskovancev po poškodbi hrbtenjače v študiji o učinkih kolesarjenja s FES poročala o izboljšani samopodobi. Njihova samopodoba je ostala izboljšana v obdobju od 1,5 meseca in celo do 2,5 let.

Vpliv na kostno gostoto

V prvih dveh letih po okvari hrbtenjače se gostota kosti izrazito zmanjša. Kostna masa v proksimalnem delu golenice znaša približno 50 % normalnih vrednosti, v stegenici pa 55 % (30). Najbolj se spremeni zgradba trabekularnega dela dolgih kosti. Gostota trabekularnega dela spodnjega dela golenice je zmanjšana za kar 73 % (20). Tudi pri spremljanju kostne gostote se je pokazalo, da ima kolesarjenje s FES pozitiven vpliv. Frotzler je s sodelavci v študiji o učinkih kolesarjenja s FES ugotovil, da sta se po programu, ki je trajal 12 mesecev (povprečno 3,7 ± 0,6 serij na teden), pomembno povečali tako trabekularna kot tudi skupna kostna masa spodnjega dela stegenice (23).

Glaser sicer navaja, da kolesarjenje s FES ne popravi vseh sprememb v kostni masi, vendar pa naj bi s pravočasnim začetkom vadbe zaustavili izgubo kostne mase (31).

Vpliv na mišično maso

Zaradi nedejavnosti je upad mišične mase še hitrejši kot izguba kostne mase (11). Študije kažejo, da nekaj tednov kolesarjenja s FES ne vpliva le na povečano trofičnost mišic, temveč se poveča tudi volumen (33), moč (34, 35) in vzdržljivost stimulirane mišice (36-38). Ragnarsson meni, da je glede na te rezultate atrofija mišic do neke mere lahko reverzibilna (39). Mohr in sodelavci so v študijo vključili 10 oseb po poškodbi hrbtenjače (5). S FES so v obdobju enega leta kolesarili, 3 x 30 minut na teden. Preko površinskih elektrod so stimulirali mišice quadriceps, mišice fleksorjev kolen in mišice gluteus maximus. Ob zaključku vadbe so ugotovili, da se je opravljeno delo mišice povečalo od 4 KJ na 17 KJ (p<0,05). Za 12 % (p<0,05) se je povečala mišična masa. Analiza mišičnih vlaken je pokazala, da se po okvari hrbtenjače poveča delež mišičnih vlaken tipa II (hitra-glikolitična) v primerjavi z deležem mišičnih vlaken tipa I (počasna-oksidativna) (40-42). Po enem letu vadbe z FES so Mohr in sodelavci (5) ter Ragnarsson (39) našli ponovno spremenjeno razmerje mišičnih vlaken v korist mišičnih vlaken tipa I.

Vpliv na spastičnost

V nekaterih študijah, v katere so sicer vključili manjše skupine preiskovancev po okvari hrbtenjače, so ugotovili, da kolesarjenje s FES zmanjša spastičnost (21, 23, 41, 42). Vendar pa dolgotrajni vpliv še ni povsem pojasnjen. Jansen s sodelavci je namreč ugotovil, da se spastičnost po kolesarjenju s FES lahko zmanjša, vendar je spastičnost, ki se pojavi kasneje, mnogo bolj izražena, morda zaradi izboljšane mišične moči (43).

Vpliv na pasivni obseg giba v sklepih spodnjih udov

Bremner s sodelavci (44) in Glaser (32) poročajo o izboljšanju obsega giba v sklepih spodnjih udov po kolesarjenju s FES, kar je ugodno vplivalo tudi na sposobnost premeščanja in izvajanje vsakodnevnih dejavnosti.

RAZPRAVA

Cilj prispevka je bil pregledati literaturo o vplivu kolesarjenja s pomočjo FES pri ljudeh po okvari hrbtenjače. Učinke tega načina kolesarjenja so avtorji študij našli pri vplivu na mišično-skeletni

sistem, srčno-žilni sistem in druge fiziološke funkcije (6, 45). Zmanjšana aerobna sposobnost oseb po okvari hrbtenjače prispeva k povečani ogroženosti za srčno-žilne bolezni. Tveganje je odvisno od ravni in obsežnosti okvare hrbtenjače, še posebej pri osebah z okvaro nad šestim prsnim vretencem. Zaradi motenega delovanja simpatičnega živčevja, s pridruženno zmanjšano močjo mišic v spodnjih udih, se zmanjša pritok venozne krvi in s tem tudi odtok krvi iz srca (46). Kombinacija kolesarjenja s FES s hkratnim vrtenjem ročnega kolesa ali električna stimulacija za izometrično kontrakcijo mišic spodnjih udov, s hkratnim vrtenjem ročnega kolesa, poveča porabo kisika in prispeva k razvoju večje aerobne zmogljivosti (47). Ker je za doseglo aerobne vadbe potrebno dolgotrajno kolesarjenje s FES, Idsø (48) predlaga optimalni stimulacijski vzorec, ki je dosežen z maksimalno stimulacijsko intenziteto in odgovarjajočim krajšim stimulacijskim intervalom (48). Priporočena tedenska poraba od 1000 do 2200 kalorij med vadbo vpliva na zmanjšanje ogroženosti za srčno-žilne bolezni in je dosežena s 4- do 8-urnim kolesarjenjem s FES (49). Učinek je večji, če je intenziteta vadbe povečana, vendar se s prenehanjem vadbe spet zmanjšuje (45). Pri osem-kanalnem stimulatorju je poleg mišic za iztegovanje kolka, mišic za krčenje in mišic za iztegovanje kolena bolje stimulirati plantarne namesto dorzalnih fleksorjev stopal. Stimulacija plantarnih fleksorjev izboljša pretok krvi in poveča se metabolni odgovor (50).

Težava kolesarjenja s FES je, da sta učinkovitost in delo le-tega zelo nizka. Hunt (51) predlaga izhodišča za nadaljnje raziskovalno delo na tem področju in na podlagi tega tudi izboljšanje programov vadbe. Predlagana izhodišča so: meritev in ocena celokupne moči; razmerja med metabolno in mehansko energijo glede na značilnosti stimulacije, dopolnjeno z mehanskimi meritvami odvedene moči; statično generirane moči in vzdržljivosti (51). Dva dejavnika vplivata na izvedbo kolesarjenja: neugodna oziroma nepravilna biomehanika (nezadostna aktivacija mišičnih skupin, neprimerno časovno zaporedje aktivacije mišic, pomanjkljiva antagonistično-sinergistična kontrola sklepa) in nefiziološka aktivacija mišičnih vlaken (51). Izboljšanje bi lahko dosegli z nadomestnimi strategijami električne stimulacije, boljšimi časovnimi parametri, z električno stimulacijo dodatnih mišičnih skupin (10 kanalov) ter z razvojem optimalnih stimulacijskih protokolov za krepitev tistih mišic, ki izvajajo kolesarjenje s FES (51). Mišica, ki je najbolj aktivna med kolesarjenjem in tudi v študijah najpogosteje opazovana, je sprednja stegenska mišica vastus lateralis (52). V primerjalni študiji med "trenirano mišico" pri osebah s paraplegijo in "netrenirano mišico" pri zdravih, so ugotovili, da je po enem letu vadbe (petkrat na teden po eno uro) mišica osebe s paraplegijo v primerjavi z zdravo netrenirano mišico dosegla 88 % prečnega preseka, 34 % navora – sile in le 13 % moči, oziroma odvedene energije (53). Ker te spremenljivke niso v povezavi, sklepajo, da je moč mišice odvisna od drugih dejavnikov kot sila mišice (53). Utrujenje mišice se zmanjša po treh mesecih vadbe. Progresivno izboljšanje po devetih mesecih vadbe pripisujejo oksidativnim in glikolitičnim encimom ter transformaciji mišičnih vlaken (54). V študiji Duffel-ove (54) so osebe po okvari hrbtenjače po enem letu kolesarjenja s FES dosegle med 9 do 36 W odvedene moči, Mohr (55) pa poroča o vrednostih med 6 in 42 W (54, 55). Po okvari hrbtenjače se v mišici začnejo dogajati fiziološke, histološke in morfološke spremembe, ki se

odražajo kot mišična atrofija, slab odgovor mišice na električno stimulacijo, zmanjšanje oksidativnih encimov, utrujenje mišice in transformacija mišičnih vlaken tipa I v tip II (56, 57). Vključitev v program kolesarjenja s FES v akutni fazi zmanjša te spremembe in bolj ohranja mišično moč (58). Prečni presek trenirane mišice v akutni fazi je bil po 13 tednih kolesarjenja s FES kar za 63 % večji v primerjavi s prečnim presekom netrenirane mišice (58).

ZAKLJUČEK

Kolesarjenje s FES lahko pomembno vpliva na povečanje mišične mase, zmanjšanje izgube mineralne kostne gostote, izboljšanje srčno-dihalnih funkcij in bolnikove samopodobe. Kot del redne telesne dejavnosti pri bolnikih po okvari hrbtenjače lahko igra pomembno vlogo pri zmanjševanju dejavnikov in zapletov, ki ogrožajo zdravje.

Literatura:

1. Myers J, Lee M, Kiratli J. Cardiovascular disease in spinal cord injury: an overview of prevalence, risk, evaluation and management. *Am J Phys Med Rehabil.* 2007; 86 (2): 142–52.
2. Bauman WA, Spungen AM, Raza M, Rothstein J, Zhang RL, Zhong YG, et al. Coronary artery disease: metabolic risk factors and latent disease in individuals with paraplegia. *Mt Sinai J Med.* 1992; 59 (2): 163–8.
3. Bloomfield SA, Mysiw WJ, Jackson RD. Bone mass and endocrine adaptations to training in spinal cord injured individuals. *Bone.* 1996; 19 (1): 61–8.
4. National Spinal Cord Injury Statistical Center. The 2009 annual statistical report for the Spinal Cord Injury Model System. Birmingham: National Spinal Cord Injury Statistical Center; 2009: 7–8. Dostopno na <https://www.nscisc.uab.edu/PublicDocuments/reports/pdf/2009%20NSCISC%20Annual%20Statistical%20Report%20-%20Complete%20Public%20Version.pdf> (citirano 28. 10. 2015).
5. Mohr T, Andersen JL, Biering-Soprensen F, Galbo H, Bangsbo J, Wagner A, Kjaer M. Long-term adaptation to electrically induced cycle training in severe spinal cord injured individuals. *Spinal Cord.* 1997; 35 (1): 1–16.
6. Peng CW, Chen SC, Lai CH, Chen CJ, Chen CC, Mizrahi J, Handa Y. Review: Clinical benefits of functional electrical stimulation cycling exercise for subjects with central neurological impairments. *J Med Biol Eng.* 2011; 31 (1): 1–11.
7. Kralj A. Review of lower extremity functional electrical stimulation (FES) research in paraplegics subjects. V: Kralj A, Bajd T. *Functional electrical stimulation: standing and walking after spinal cord injury.* Boca Raton: CRC Press. 1989: 1–15.
8. Sipsky ML, Delisa JA, Schweer S. Functional electrical stimulation bicycle ergometry: patient perception. *Am J Phys Med Rehabil.* 1989; 68 (3): 147–9.

9. Davis GM, Hamzaid NA, Fornusek C. Cardiorespiratory, metabolic and biomechanical responses during functional electrical stimulation leg exercise: health and fitness benefits. *Artif Organs*. 2008; 32 (8): 625–9.
10. Berkelmans R. FES cycling. *J Autom Control*. 2008; 18 (2): 73–6.
11. Haapala S, Faghri PD, Adams DJ. Leg joint output during progressive resistance FES-LCE cycling in SCI subjects: developing an index of fatigue. *J Neuroeng Rehabil*. 2008; 5 (14).
12. Reichenfeller W, Hackl H, Hufgard J, Gestaltner K, Gfoehler M. Effects of FES cycling training on spasticity in spinal cord injured subjects. *World Academy of Science, Engineering and Technology, International Science Index* 74, 7 (2), 237–40.
13. Fornusek C, Davis GM. Maximizing muscle force via low-cadence FES cycling. *J Rehabil Med*. 2004; 36 (5): 232–7.
14. Thijssen DH, Heesterbeek P, van Kuppevelt DJ, Duysens J, Hopman MT. Local vascular adaptations after hybrid training in spinal cord-injured subjects. *Med Sci Sports Exerc*. 2005; 37 (7): 1112–8.
15. de Groot P, Crozier J, Rakobowchuk M, Hopman M, MacDonald M. Electrical stimulation alters FMD and arterial compliance in extremely inactive legs. *Med Sci Sports Exerc*. 2005; 37 (8): 1356–64.
16. Thijssen DH, Ellenkamp R, Smits P, Hopman MT. Rapid vascular adaptations to training and detraining in persons with spinal cord injury. *Arch Phys Med Rehabil*. 2006; 87 (4): 474–81.
17. Gerrits HL, de Haan A, Sargeant AJ, van Langen H, Hopman MT. Peripheral vascular changes after electrically stimulated cycle training in people with spinal cord injury. *Arch Phys Med Rehabil*. 2001; 82 (6): 832–9.
18. Krause P, Szecsi J, Straube A. Changes in spastic muscle tone increase in patients with spinal cord injury using functional electrical stimulation and passive leg movements. *Clin Rehabil*. 2008; 22 (7): 627–34.
19. Olive JL, Dudley GA, McCully KK. Vascular remodeling after spinal cord injury. *Med Sci Sports Exerc*. 2003; 35 (6): 901–7.
20. Eser P, Frotzler A, Zehnder Y, Wick L, Knecht H, Denoth J, et al. Relationship between duration of paralysis and bone structure: a pQCT study of spinal cord injured individuals. *Bone*. 2004; 34 (5): 869–80.
21. Mujika I, Padilla SW. Muscular characteristics of detraining in humans. *Med Sci Sports Exerc*. 2001; 33 (8): 1297–303.
22. Petrofsky JS, Stacy R. The effect of training on endurance and the cardiovascular responses of individuals with paraplegia during dynamic exercise induced by functional electrical stimulation. *Eur J Appl Physiol Occup Physiol*. 1992; 64 (6): 487–92.
23. Frotzler A, Coupaud S, Perret C, Kakebeeke TH, Hunt KJ, Donaldson NN, Eser P. High-volume partially reverses bone loss in people with chronic spinal cord injury. *Bone*. 2008; 43 (1): 167–76.
24. Figoni SF, Rodgers MM, Glaser RM, Feghri PD, Ezenwa BN, Mathews T, Suryaprasad AG, Gupta SC. Physiologic responses of paraplegics and quadriplegics to passive and active leg cycle ergometry. *J Am Paraplegia Soc*. 1990; 13 (3): 33–9.
25. Hooker SP, Scremin AM, Mutton DL, Kunkel CF, Cagle G. Peak and submaximal physiologic responses following electrical stimulation leg cycle ergometer training. *J Rehabil Res Dev*. 1995; 32 (4): 361–6.
26. Raymond J, Davis GM, Fahey A, Climstein M, Sutton JR. Oxygen uptake and heart rate responses during arm vs combined arm/electrically stimulated leg exercise in people with paraplegia. *Spinal Cord*. 1997; 35 (10): 680–5.
27. Glaser RM, Figoni SF, Hooker SP, Rodgers MM, Ezenwa BN, Suryaprasad AG, et al. Efficiency of FNS leg cycle ergometry. In: Kim Y, Spelman FA, eds. *Images of the twenty-first century. Annual International Conference of the IEEE Engineering in Medicine and Biology Society: proceedings, Seattle, 9-12 November 1989. Washington: IEEE Engineering in Medicine and Biology Society. 1989: 961–3.*
28. Phillips CA, Danopoulos D, Kezdi P, Hendershot D. Muscular, respiratory and cardiovascular responses of quadriplegic persons to an FES bicycle ergometer conditioning program. *Int J Rehabil Res*. 1989; 12 (2): 147–57.
29. Glaser RM, Figoni SF, Ponichtera-Mulcare JA, Collins SR, Levin KA, Gupta SC, Suryaprasad AG. Use of lower-limb FNS to improve arm exercise performance of SCI individuals. In: Binion M, ed. *Engineering the ADA: from vision to reality with technology. RESNA '93 Annual Conference: proceedings, June 12-17, 1993, Las Vegas. Washington: RESNA, 1993: 416–8.*
30. Hooker SP, Figoni SF, Rodgers MM, Glaser RM, Mathews T, Suryaprasad AG, Gupta SC. Metabolic and hemodynamic responses to concurrent voluntary arm crank and electrical stimulation leg cycle exercise in quadriplegics. *J Rehabil Res Dev*. 1992; 29 (3): 1–11.
31. Mohr T, Podenphant J, Biering-Sorensen F, Galbo H, Thamsborg G, Kjaer M. Increased bone mineral density after prolonged electrically induced cycle training of paralyzed limbs in spinal cord injured man. *Calcif Tissue Int*. 1997; 61 (1): 22–5.
32. Glaser RM. Functional neuromuscular stimulation: exercise conditioning of spinal cord injured patients. *Int J Sports Med*. 1994; 15 (3): 142–8.
33. Skoeld C, Lonn L, Harms-Ringdahl K, Hultling C, Levi R, Nash M, Seiger A. Effects of functional electrical stimulation training for six months on body composition and spasticity in motor complete tetraplegic spinal cord-injured individuals. *J Rehabil Med*. 2002; 34 (1): 25–32.

34. Belanger M, Stein RB, Wheeler G, Gordon T, Leduc B. Electrical stimulation: can it increase muscle strength and reverse osteopenia in spinal cord injured individuals? *Arch Phys Med Rehabil.* 2000; 81 (8): 1090–8.
35. Scremin AM, Kurta L, Gentili A, Wiseman B, Perell K, Kunkel C, Scremin OU. Increasing muscle mass in spinal cord injured persons with a functional electrical stimulation exercise program. *Arch Phys Med Rehabil.* 1999; 80 (12): 1531–6.
36. Gerrits HL, de Haan A, Sargeant AJ, Dallmeijer A, Hopman MT. Altered contractile properties of the quadriceps muscle in people with spinal cord injury following functional electrical stimulated cycle training. *Spinal Cord.* 2000; 38 (4): 214–23.
37. Gerrits HL, de Haan A, Hopman MT, van Der Woude LH, Jones DA, Sargeant AJ. Contractile properties of the quadriceps muscle in individuals with spinal cord injury. *Muscle Nerve.* 1999; 22 (9): 1249–56.
38. Stein RB. Functional electrical stimulation after spinal cord injury. *J Neurotrauma.* 1999; 16 (8): 713–7.
39. Ragnarsson KT. Physiologic effects of functional electrical stimulation-induced exercises in spinal cord-injured individuals. *Clin Orthop Relat Res.* 1988; 233: 53–63.
40. Baldi JC, Jackson RD, Moraille R, Mysiw WJ. Muscle atrophy is prevented in patients with acute spinal cord injury using functional electrical stimulation. *Spinal Cord.* 1998; 36 (7): 463–9.
41. Burnham R, Martin T, Stein R, Bell G, Maclean I, Steadward R. Skeletal muscle fiber type transformation following spinal cord injury. *Spinal Cord.* 1997; 35 (2): 86–91.
42. Castro MJ, Apple DF, Staron RS, Campos GER, Dudley GA. Influence of complete spinal cord injury on skeletal muscle within 6 months of injury. *J Appl Physiol* (1985). 1999; 86 (1): 350–8.
43. Jansen TWJ, Glaser RM, Shuster DB. Clinical efficacy of electrical stimulation exercise training: effects on health, fitness and function. *Top Spinal Cord Inj Rehabil.* 1998; 3 (1): 33–49.
44. Bremner LA, Sloan KE, Day RE, Scull ER, Ackland T. A clinical exercise system for paraplegics using functional electrical stimulation. *Paraplegia.* 1992; 30 (9): 647–55.
45. Cassidy B, Nunnerley J, Freeman C, Nichols JN, Sinnott KA. The effectiveness of FES bikes for people with spinal cord injury. Wellington: Rehabilitation Teaching and Research Unit, University of Otago; 2012. Dostopno na http://www.acc.co.nz/PRD_EXT_CSMP/groups/external_communications/documents/reports_results/wpc116654.pdf (citirano 28. 10. 2015).
46. Myers J, Lee M, Kiratli J. Cardiovascular disease in spinal cord injury: an overview of prevalence, risk, evaluation, and management. *Am J Phys Med Rehabil.* 2007; 86 (2): 142–52.
47. Brurok B, Tørhaug T, Karlsen T, Leivseth G, Helgerund J, Hoff J. Effect of lower extremity functional electrical stimulation pulsed isometric contractions on arm cycling peak oxygen uptake in spinal cord injured individuals. *J Rehabil Med.* 2013; 45 (3): 254–9.
48. Idsø ES, Johansen TA, Hunt KJ. Finding the metabolically optimal stimulation pattern for FES-cycling. In: Wood D, TP, ed. What FES might people need? 9th Annual Conference of the International Functional Electrical Stimulation Society, Bournemouth, UK, 2004.
49. Perret C, Berry H, Hunt KJ, Donaldson N, Kakebeeke TH. Feasibility of functional electrical stimulated cycling in subject with spinal cord injury: an energetics assessment. *J Rehabil Med.* 2010; 42 (9): 873–5.
50. Fornusek C, Davis GM, Baek I. Stimulation of shank muscles during functional electrical stimulation cycling increases ankle excursion in individuals with spinal cord injury. *Arch Phys Med Rehabil.* 2012; 93 (11): 1930–6.
51. Hunt KJ, Fang J, Saengsuwan J, Grob J, Laubacher M. On the efficiency of FES cycling: a framework and systematic review. *Technol Health Care.* 2012; 20 (5): 395–422.
52. Ericson MO, Nisell R, Arborelius UP, Ekholm J. Muscular activity during ergometer cycling. *Scand J Rehab Med.* 1985; 17 (2): 53–61.
53. Duffel DL, Donaldson Nde N, Newham DJ. Power output during functional electrically stimulated cycling in trained spinal cord injured people. *Neuromodulation.* 2010; 13 (1): 50–7.
54. Duffell LD, Donaldson Nde N, Perkins TA, Rushton DN, Hunt KJ, Kakebeeke TH, Newham DJ. Long-term intensive electrically stimulated cycling by spinal cord-injured people: effect on muscle properties and their relation to power output. *Muscle Nerve.* 2008; 28 (4): 1304–11.
55. Mohr T, Andersen JL, Biering-Sørensen F, Galbo H, Bangsbo J, Wagner A, Kjaer M. Long-term adaptation to electrically induced cycle training in severe spinal cord injured individuals. *Spinal Cord.* 1997; 35 (1): 1–16.
56. Baldi JC, Jackson RD, Moraille R, Mysiw WJ. Muscle atrophy is prevented in patients with acute spinal cord injury using functional electrical stimulation. *Spinal Cord.* 1998; 36 (7): 463–9.
57. Burnham R, Martin T, Stein R, Bell G, MacLean I, Steadward R. Skeletal muscle fiber type transformation following spinal cord injury. *Spinal Cord.* 1997; 35 (2): 86–91.
58. Demchak TJ, Linderman JK, Mysiw WJ, Jackson R, Suun J, Devor ST. Effect of functional electrical stimulation cycle ergometry training on lower limb musculature in acute SCI individuals. 2005. *J Sports Sci Med.* 2005; 4 (3): 263–71.