

Bionikai megoldások gerincvelősérültek mozgás-rehabilitációjában és sportjában – Funkcionális Elektromos Izomingerléssel végzett kerékpározás

Bionic solutions in movement-rehabilitation and sports in the case of people with spinal cord injury

Katona Péter¹, Mravcsik Mariann^{2,3}, Botzheim Lilla^{2,3}, Klauber András⁴, Cserháti Péter^{4,6}, Laczkó József^{3,5,7}

¹Testnevelési Egyetem, Kineziológia Tanszék, Budapest

²Pécsi Tudományegyetem, Természettudományi Kar, Biológiai és Sportbiológiai Doktori Iskola, Pécs

³Wigner Fizikai Kutatóközpont, Budapest

⁴Országos Orvosi Rehabilitációs Intézet, Budapest

⁵Pécsi Tudományegyetem, Természettudományi Kar, Informatika és Biorobotika Tanszék, Pécs

⁶Pécsi Tudományegyetem, Általános Orvostudományi Kar, Fizikális és Rehabilitációs Medicina Önálló Tanszék, Pécs

⁷Pázmány Péter Katolikus Egyetem, Informatika Technológiai és Bionikai Kar, Budapest

E-mail: laczkoj@gamma.ttk.pte.hu

Összefoglalás

A gerincvelősérülés egy olyan nagyon súlyos sérülés, ami többnyire fiatalokat érint, és aminek következménye a motoros és a szenzoros funkciók, illetve képességek elvesztése. A sérülés után ezek a fiatalok általában mozgásszegény életmódot élnek, hiszen bénult végtagjaikat nem tudják akaratlagosan, aktív izomerő kifejtésével mozgatni. A mozgásszegény életmód elsősorban abból adódik, hogy a bénulás következtében például kerekesszékekbe kényszerülnek, amely a fizikai aktivitás lehetőségét jelentősen beszűkíti, és a mindennapi élet megkövetelte mozgás is igen erőfeszítésbe kerül.

A mozgásszegény életmódnak számos káros következménye van a sérültek általános egészségi állapotára nézve. Ezért rendkívül fontos, hogy lehetővé tegyünk az aktív izomerő kifejtését a bénult végtagokban. Az idegrendszeri sérülés következtében mozgási képességeiket részben elvesztett emberek számára történő korszerű rehabilitációs kezelések olyan szabályozott gyakorlatokon alapulnak, amelyeket robotikai, bionikai módszerek és funkcionális elektromos izomingerlés (FES) tesz lehetővé. A gerincvelősérült emberek számára a mozgás, a sport rendkívül fontos, annak érdekében, hogy általános fiziológiai állapotukat megőrizzék, javítsák és hosszú ideig megőrizzék.

Paraplég emberek nem képesek alsó végtagjaikban aktív, akaratlagos erő kifejtésére, ezért az aktív izomerőt és ezáltal az alsó végtagjaikkal végzett sporttevékenységet csak funkcionális elektromos izomingerléssel érhetik el. A FES nem csak az izmok erősítését, hanem konkrét hasznos mozgási feladatok végrehajtását szolgálja. Ebben a közleményben a funkcionális elektromos ingerlés segítségével létrehozott kerékpározó mozgásról írunk. Ezt kerékpár ergométeren is végezhetik a gerincvelősérültek, valamint arra alkalmas triciklin is. A kerékpározó mozgás elősegítésére multidiszciplináris tudományos kutatások szükségesek. A triciklin végzett FES kerékpározásban már nemzetközi versenyeket is rendeznek.

Kulcsszavak: funkcionális elektromos ingerlés (FES), rehabilitáció, kerékpározás

Abstract

Spinal cord injury is a very severe injury, which mostly affects young people and its consequence is the loss of sensory and motor functions. After the injury, these people usually have a physically inactive lifestyle, since they are unable to voluntarily generate active muscle forces. This affects their general physiological state and wellbeing unfavorably. Thus, it is essential to make them able to generate active

muscle forces. Recent rehabilitation treatments of persons after a lesion on the central nervous system are based on controlled intensive exercise of functions that are assisted by robotic, bionic methods or functional electrical stimulation (FES). Sport is absolutely important for preserving and improving the general physiological state and condition of people with spinal cord injury. However, because for instance people with paraplegia are unable to exert active muscle forces voluntarily, the generation of active muscle force and performing sport activity with their lower limbs is possible only by functional electrical stimulation. FES serves not only the strengthening of muscles, but also the performance of particular motor tasks. In this paper we write about bicycling movements, controlled by FES. This can be made on stationary cycle ergometers and on tricycles. For promoting this activity, multidisciplinary scientific research is required. Using appropriate tricycles, international tricycling competitions are regularly organized.

Keywords: functional electrical stimulation (FES), rehabilitation, cycling

Bevezetés

Világszerte évente 250-500 ezer új gerincvelősérültet regisztrálnak (WHO, 2013). Az Amerikai Egyesült Államokban összesen 250-350 ezer gerincvelősérült ember él és évente kb. 17 000 új esetet regisztrálnak (Miami Project, 2019; Chen és mtsai, 2016). Az Európai Unióban alacsonyabb ez a szám, Magyarországról nincs pontos adat, de kb. 10-12 ezerre tehető a gerincvelősérültek száma és évente kb. 300-500 új eset fordul elő.

A gerincvelő sérülésének számos oka lehet. Nagy része traumás eredetű, leggyakoribb okok közé soroljuk a közúti balesetet, a sportbalesetet, a magas helyről történő leesést vagy a külső erőszak okozta sérülést. A férfi sérültek aránya magasabb (WHO, 2013), míg Magyarországon megközelítőleg 3:1 ez az arány.

A sérülés következtében a gerincvelőben haladó idegpályák megszakadnak és ennek lesz a következménye, hogy az akaratlagos izomkontrakció megszűnik. A gerincvelő-sérülés egy nagyon súlyos sérülés, ami a motoros, vegetatív és érző funkciók kiesésével jár. A sérülés magassága és típusa határozza meg a bénulás mértékét és a különböző izmok és izomcsoportok érintettségét. Megkülönböztetünk a gerincvelősérülés magassága szerint a nyaki szakaszt érintő, mind a négy végtagra kiterjedő (tetra-), illetve a hátiágyéki-keresztcsonti szakaszt érintő, az alsó végtagokra terjedő (para-) bénulást, ami lehet teljes (-plégia), illetve részleges (-parézis) bénulás attól függően, hogy a sérülés a gerincvelő teljes, vagy nem teljes harántmetszetét érinti.

A sérülés következtében létrejövő bénulás és következményes mozgásszegény életmód negatív hatással van a kardiovaszkuláris, a teljes mozgató, az emésztő, a kiválasztó és a légző szervrendszer működésére, és növeli egyes anyagcsere betegségek kialakulásának kockázatát. A bénulás izomsorvadáshoz, izomgörcsök kialakulásához, az ízületek mozgáshatárának beszűküléséhez, elmerevedéséhez, csonttritkuláshoz vezet. A bénult izmok nem képesek akaratlagos mozgást végezni, kontrakciót végrehajtani, melynek következtében megkezdődik az izomsorvadás. Az aktív izommunka és a terhelés hiánya együttesen a csontok ásványianyag tartalmának és sűrűségének csökkenéséhez, osteoporózishoz vezetnek. Leginkább a combcsont és a sípcsont érintett a csonttritkulásban, a csontsűrűség 50%-kal, de akár 70%-kal is csökkenhet (Eser és mtsai, 2003). A gerincvelő sérültek többsége mozgásszegény életmódot él, ami könnyen vezet elhízáshoz és a cukorbetegség kialakulásához.

A sérültek nagy része fiatal, akik várhatóan évtizedekig élnek gerincvelősérültként, bénult végtagokkal. Fogycsökkenésük azonban megakadályozza, gátolja őket abban, hogy részt vegyenek számos önellátási és társadalmi tevékenységben, aktivitásban. Egy gerincvelősérült ember mindennapi élete és a külső segítség adása a legszükségesebb tevékenységeik elvégzéséhez igen komoly anyagi megterhelést igényel mind a családjától, mind a társadalomtól. A gerincvelősérülés globális gyakorisága változik földrajzi régióként, szociális, gazdasági és kulturális tényezőktől, egészségpolitikától függően. A sportrendkívüli fontosságú annak érdekében, hogy általános fiziológiai állapotukat, erőnlétüket javítsák és hosszú ideig megfelelően megőrizték az érintettek. A parapleg bennulak nem képesek alsó végtag izmaikkal aktív, akaratlagos erő kifejtésére, az aktív izomerőt, és az alsó végtagjaikkal végzett sporttevékenységet csak funkcionális elektromos izomingerléssel érhetik el.

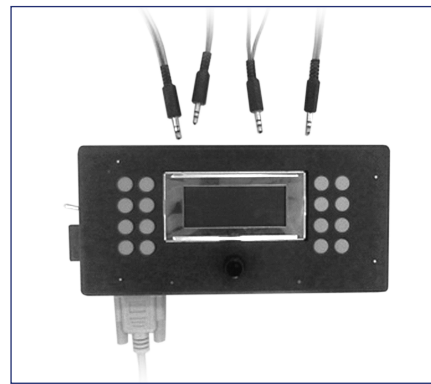
Funkcionális elektromos stimuláció (FES) segítségével, az izmok aktivitásának mesterséges szabályozásával részlegesen pótolható az elveszett motoros funkció. Itt nagyon fontos kiemelni, hogy a cél, egy mozgási feladat végrehajtása. Ez egy olyan rehabilitációs technológia, amelynek során egy izomingerlő készülékből, vezetékeken és a bőrfelszínre helyezett ingerlő elektródákon keresztül elektromos impulzus sorozatokat juttathatunk az izmokhoz. Ezáltal a bénult izmok összehangoltan aktív erőt fejthetnek ki, összehúzódásra készíthetők valamilyen mozgási funkció, a fiziológiához hasonló mozgási feladat végrehajtása érdekében. Lényeges, hogy itt az izmok elektromos ingerlése nem csak az izmok erősítését, hanem valamilyen mozgási feladat, mozgási funkció végrehajtását célozza. Kérdés, hogy milyen



1/a



1/b



1/c

1. ábra. 1/a Motomed Viva2 ergométer, 1/b BerkelBike tricikli, funkcionális elektromos ingerlést lehetővé tevő kontrollerrel, 1/c nyolc-csatornás izomingerlő készülék

Figure 1. 1/a Motomed Viva 2 ergometer, 1/b BerkelBike tricycle, equipped with a controller for functional electrical stimulation. 1/c eight-channel muscle stimulator (controller)

ingerlési minták (az izmok ingerlésének milyen időzítései) teszik lehetővé a feladat végrehajtását. Ebben a közleményünkben a funkcionális elektromos ingerlés segítségével létrehozott kerékpározó mozgásról írunk, annak módszeréről és hatásairól. Ezt a technológiát és edzésmódszert évtizedekkel ezelőtt kezdték el modellezni, kifejleszteni és alkalmazni (Pollack és mtsai, 1989; Laczko és mtsai, 1991; Hooker és mtsai, 1992; Schutte és mtsai, 1993; Janssen és mtsai, 1998; Wilder és mtsai, 2002; Szecsi és mtsai, 2004; Berkelmans, 2008) és új mérnöki, matematikai és informatikai módszerek bevonásával ma is sok fejlesztés tárgya (Metani és mtsai, 2016; Mazzoleni és mtsai, 2017; Duffel és mtsai, 2019; Alashram, 2020). Ilyen edzéseket Magyarországon a 2000-es évek elején kezdtünk a MÁV Kórház Rehabilitációs Osztályán és a Magyar Testnevelési Egyetemen (Szecsi és mtsai, 2005a, 2005b; Laczko és mtsai, 2008, 2011, 2012, 2016; Pilissy és mtsai, 2008; Katona és mtsai, 2011, 2013; Mravcsik és mtsai, 2015, 2016, 2017, 2018, 2019) és jelenleg rendszeresen végzünk hetente két alkalommal az Országos Orvosi Rehabilitációs Intézet (OORI) Gerincvelősérültek Rehabilitációs Osztályán.

Anyag és módszerek

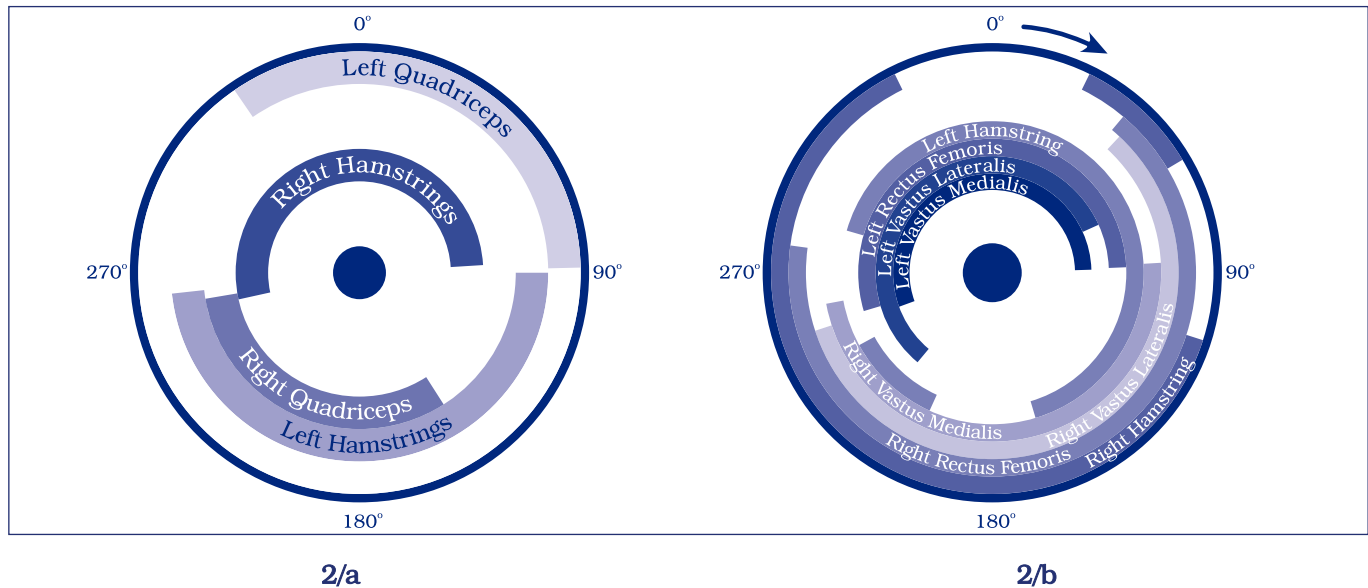
FES-hez használható elektromos izomingerlő készülékek egyrészt a kereskedelmi forgalomban is megtalálhatók, másrészt tudományos kutatási célra speciálisan is fejleszthetők. A FES kerékpározás végezhető kerékpár ergométeren és triciklin is (1a-b. ábra). A kerékpár hajtókarjának (pedálkar) szöghelyzetét mérő szöghelyzetérzékelő csatlakoztatható egy izomingerlő készülékhez (1c. ábra) és a pillanatnyi hajtókar-szög függvényében küldi az elektromos ingernt (impulzus sorozatokat) a készülék vezeték-

ken keresztül az izmokhoz. Magyarországon a Pázmány Péter Katolikus Egyetem Információs Technológiai és Bionikai Karán (PPKE ITK) fejlesztettek ki 8-csatornás izomingerlő készüléket (1c. ábra). Saját kutatásainkban főleg ezt a készüléket alkalmaztuk, valamint az Országos Orvosi Rehabilitációs Intézetben rehabilitációs tréningek esetén a Motomed Viva2 ergométert (1a. ábra), illetve a Testnevelési Egyetemen is hasonló ergométert használtunk. Az elmúlt időszakig éveken keresztül használtuk ezeket az eszközöket és csak nemrégiben sikerült a Pécsi Tudományegyetem GINOP pályázatának keretében frissíteni eszközparkunkat új ergométerekkel.

Kerékpárgométeren végzett edzések parapleg személyeknél

Az ergométeren végzett edzéseket főleg a térdhajlító és térdfesztető hamstrings és quadriceps izmok ingerlésével végeztük. Alapvető fontosságú, hogy ezekhez az izmokhoz a megfelelő időpontban érkezzenek az elektromos impulzusok. Tudnunk kell, hogy az ergométer vagy a tricikli hajtókar irányának függvényében, mikor kell ingerelni a hamstrings és quadriceps izmokat. Ennek érdekében mértek izomaktivitási (EMG) adatokat egészséges fiatalok szobakerékpáron való kerékpározásakor és elemezték ezeket az adatokat (Pilissy és mtsai, 2008; Katona és mtsai, 2014; Vally és Laczko, 2015). Ennek alapján definiáltak olyan izomingerlési mintázatokat, amelyekben az izmok ingerlése a kerékpár hajtókar irányának a függvénye. Ilyen ingerlési mintákat átlagoltak és ezeket az átlagolt ingerlési mintázatokat használták fel a gerincvelősérült személyek izmainak ingerlésére. Példaként, az izmok ingerlésének a hajtókar-szögtől való függését reprezentálja a 2. ábra.

A tréning menete az előre meghatározott mérési protokoll szerint 5 perces bemelegítésből, 20 perces



2. ábra. Izomingerlési minták. A hajtókar szöghelyzetét akkor tekintettük 0 foknak, amikor a hajtókar függőlegesen felfelé mutatott (a pedál a legmagasabb pozícióban van). Ehhez a pozícióhoz képest egy teljes kör alatt mutatják az ábrák azokat a hajtókarszög-intervallumokat, amelyekben az egyes izmokat stimuláljuk. A baloldali ábrán (2/a) reprezentált stimulációs minta esetén mindkét lábon a hamstrings és a quadriceps izmok ingerlésével jöhetett létre a kerékpározó mozgás, a jobboldali ábrán (2/b) mutatott esetben pedig mindkét lábon négy izmot ingereltünk a megjelölt hajtókarszög tartományokban, nevezetesen a hamstrings mellett a quadriceps három ágát külön-külön, azaz a vastus medialis, vastus lateralis és rectus femorist külön-külön elektródapárral hoztuk működésbe.

Figure 2. Muscle stimulation patterns. The angular position of the crank's ergometer is considered 0 degree, when the crank is directed vertically upward (the pedal is in the highest position). The diagrams represent the angular intervals in which the individual muscles are stimulated. In the case of 2/a the hamstrings and quadriceps muscle groups are stimulated in both legs. In the case of 2/b, four muscles are stimulated, beside the hamstrings, the vastus medialis, vastus lateralis and rectus femoris.

stimulációból és 5 perces levezetésből állt. A tréning időtartama így körülbelül 30 perc volt, ám a páciensek állapotától függően, indokolt esetben ez változhatott.

A bemelegítés és a levezetés során az ergométert passzív üzemmódban alkalmaztuk a térd és csípőízületek átmozgatására, ezekben a fázisokban nem volt izomstimuláció.

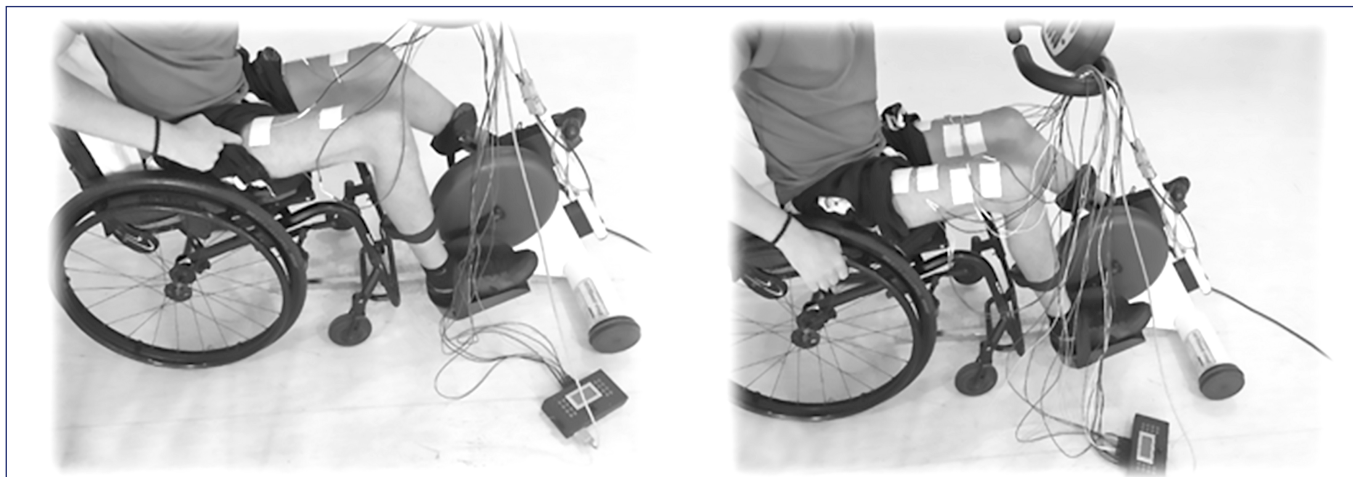
A stimulációs edzésfázis során az áramerősséget fokozatosan emeltük. Az áramerősség fokozásával egyre erősebb izomkontrakció jött létre a stimulált izmokban. Egyénileg és tréningenként is változó bizonyos áramerősség elérése esetén az ingerelt izmok átveszik az aktív hajtást és az ergométer passzív motorhajtása kikapcsol. A stimulációs fázisban (kb. 20 perc) aktív hajtás jön létre, tehát a bénult izmok saját erejükkel hajtják az ergométer hajtókarját (3. ábra). Ennek felbecsülhetetlen pszichés előnye van. Bár a páciens tudja, hogy nem a saját agyával vezérli a mozgást, hanem egy külső elektromos eszköz vezérli azt, de saját aktív izomerejével hozza azt létre, ami FES nélkül nem lenne lehetséges.

Az egyes edzések alkalmával mértük a pulzus és vérnyomás értékeket az edzés megkezdése előtt, az

edzés közben 3 alkalommal (7-8 percenként) és közvetlenül az edzés befejezése után. Mértük a leadott mechanikai teljesítményt és energiát is (Mravcsik és mtsai, 2015). Az átlagos artériás nyomást (mean arterial pressure – MAP) a mért szisztolés (SBP) és diasztolés (DBP) nyomásból számítottuk a következő formulával:

Spiroergometriás esetvizsgálat

A Testnevelési Egyetemen meglévő együttműködés keretében alkalmunk volt a FES-edzések során a helyben megtalálható spiroergométer segítségével különböző terhelésélettani paramétereket vizsgálni (Katona és mtsai, 2013, 2015). A terheléses vizsgálatot Schiller CS 200 Spiro-Ergo berendezéssel (az edzés előtt karergométerrel, majd az edzés közben a Schiller ERG 911 S/L ergométeren) végeztük, erre szereltünk fel egy pedálszög-érzékelőt. Ez adta a bemenő jelet egy több-csatornás elektromos ingerlő készüléknek, ami a pedálszög függvényében adja az elektromos jelet az egyes csatornákra. Ez utóbbi készülék a Pázmány Péter Katolikus Egyetem Információs Technológiai és Bionikai Kar fejlesztésében készült (PE-11 TENS).



3. ábra. A baloldali képen felületi elektródák láthatók a quadriceps izomcsoporton, hasonlóképpen elektródák vannak helyezve a hamstring izmoknak megfelelő helyre. Az elektródákhoz vezetékek érkezik az ingerlést szabályozó kontrollerből, ami az ábrák jobb alsó részén láthatók. Ebbe a kontrollerbe érkezik az információ, ami megadja az ergométer hajtókarjának aktuális szög helyzetét (irányát) egy bemenő vezetéken. Ettől a szög helyzettől függ, hogy éppen melyik izmokhoz küld impulzusokat a kontroller. A jobboldali kép azt az esetet reprezentálja, amikor a quadriceps izom 3 ágát külön-külön ingereljük egy-egy elektródapárral

Figure 3. Surface electrodes are placed above the quadriceps and hamstrings muscles. Cables are attached to the electrodes which deliver electrical signals from a controller, that is shown at the lower right part of the figures. This controller receives information (through an input cable) that gives the actual position (direction) of the crank of the ergometer. Depending on this crank position the controller sends electrical impulses to the appropriate muscles at the appropriate time. The figure at the right side represents that case in which 3 parts of the quadriceps is stimulated separately

Triciklizó mozgás és verseny gerincvelősérültek számára, funkcionális elektromos stimulációval

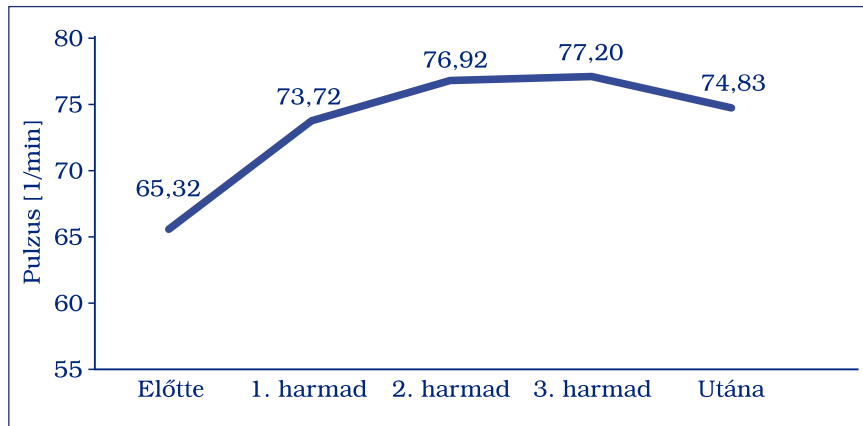
A Cybathlon egy olyan nemzetközi szervezésű verseny, ahol mozgáskorlátozott emberek versenyezhetnek modern technikai eszközök segítségével. Hat különböző versenykategóriában lehet nevezni, motoros exoskeleton verseny, motoros karprotézis verseny és láb protézis verseny, agy-számítógép interfész (BCI) verseny, motoros kerekesszék verseny és FES kerékpár verseny (Coste és mtsai 2017). Mint mindegyik kategóriának, a FES kerékpár versenynek is szigorúan szabályozott részvételi feltételei vannak. A legfontosabb, hogy csak olyan parapleg, gerincvelősérült személyek versenyezhetnek, akiknek nincs motoros funkciójuk az alsó végtagjukban, és a tricikli csak motor nélküli, úgynevezett passzív kerékpár lehet. A kihívás az izmok megfelelő stimulálása, hogy a versenyzők nagy sebességet érjenek el a kerékpáron anélkül, hogy túlságosan kimerülnek.



4. ábra. A BerkelBike triciklin „triciklizik” egy parapleg gerincvelősérült, bénult lábaival, Funkcionális Elektromos Stimuláció (FES) segítségével, hajtja a triciklit. Az alsó végtag izmai (quadriceps, hamstring and gluteus maximus) FES hatására fejtenek ki aktív izomerőt

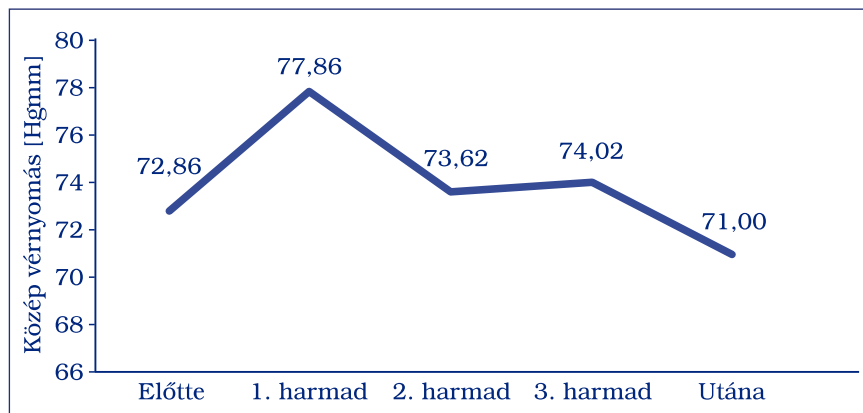
Figure 4. A person with paraplegia is “tricycling” on a BerkelBike tricycle. He propels the tricycle with his paralyzed limb using functional electrical muscle stimulation (FES). His leg muscles (quadriceps, hamstrings and gluteus maximus) exert active forces controlled by FES

A tréningek során használt fent említett ergométerek mellett rendelkezésünkre áll egy BerkelBike tricikli is, amely megfelel a Cybathlon verseny feltételei-



5. ábra. Egy gerincvelősérült pulzusának változása az edzés folyamán, az edzés megkezdésekor, az edzés közben háromszor (7-8 percenként) és az edzés végén

Figure 5. Change of heart rate during a FES-cycling training of a spinal cord injured individual



6. ábra. Egy gerincvelősérült artériás középvérnyomásának változása a megkezdésekor, az edzés közben háromszor (7-8 percenként) és az edzés végén

Figure 6. Change of mean arterial blood pressure during a FES-cycling training of a spinal cord injured individual

nek. Ez egy motor nélküli tricikli, amelyet egyszerre lehet karral és lábbal is hajtani. A kerékpárral lehet haladni, vagy lehet álló helyzetben rögzíteni is, például tréning esetén (4. ábra). A BerkelBike triciklit kiegészítették egy FES vezérlőegységgel (kontrollerrel). A vezérlőegység távolról programozható egy számítógépes szoftver segítségével, a vezérlőegység vezeték nélkül, bluetooth-on keresztül kommunikál a számítógéppel. Mivel a páciensek nem tudják akaratlagosan mozgatni az alsó végtagjukat, ezért csak az izomstimuláció segítségével képesek lábbal kerékpározni.

Egy tréning során a páciens először a karjával hajtja a kerékpárt. A karral való tekeréshez a kormányt kell forgatni. Ha a páciens karral teker, mozgatja az alsó pedálokat is, így bemelegíti a lábait is. Az edzés során folyamatosan növeljük az áramerősséget, míg a lábával is képes lesz meghajtani a ke-

rékpárt. Ha csak lábbal hajtja a pedálokat, akkor a felső (kézi) hajtókar nem forog. Így pontosan látható, hogy mikor lesz megfelelő a FES ingerlés ahhoz, hogy a páciens képes legyen csak a lábával hajtani a triciklit.

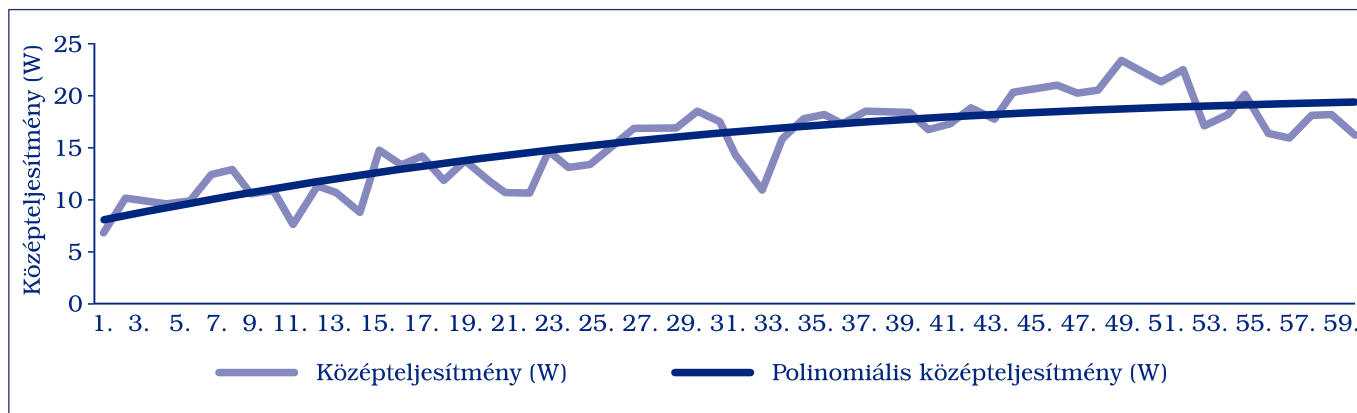
Jelenleg olyan egyénre szabott ingerlési mintázaton dolgozunk, amellyel a kerékpárt használó mozgáskorlátozott személy már hosszabb ideig tud a lábával kerékpározni, kézi segítség nélkül. Ehhez meg kell találni azt az optimális mintázatot, amely elég intenzív ahhoz, hogy a bénult izmok mozogjanak, ugyanakkor az izomfáradás a lehető legkisebb mértékű legyen.

Eredmények

FES edzések hatása kerékpárerőgépteremen végzett edzések esetén parapleg személyeknél

A gerincvelő sérült betegeknél annak ellenére, hogy azonos magasságban van a sérülése, nem tekinthetjük őket egyformának. Egyenként mindenki különbözik, a sérülés bekövetkezése előtt eltérő mértékben végeztek fizikai aktivitást, más módon sérültek, eltérő ideig tartott a felépülés, a rehabilitáció. Ezek a tényezők mind befolyásolhatják mostani teljesítőképességüket. A sérülés következtében nem csak a szenzoros és a motoros idegrendszer funkciói károsodhatnak az érintett területen, hanem a

vegetatív idegrendszer is. Ez a teljes test esetében hatással van a pulzusra és a vérnyomásra, hiszen a beidegzést vesztett testrészek az erek aktív keresztmetszet szabályozó képessége is károsodhat. A FES kerékpározás befolyásolja a légzés és a vérkeringés különböző paramétereit, de a különböző személyek eltérő mértékben reagálhatnak a FES edzésekre. Adatainkból az látszik, hogy a pulzusértékek az edzés közepéig általában emelkednek, azonban az edzés további részén már csökkenés figyelhető meg (Mravcsik és mtsai, 2016; Mravcsik és mtsai, 2019). Egészséges emberek esetén akut terhelés hatására a szisztolés vérnyomás érték nő, a diasztolés érték nem változik, vagy kis mértékben csökken. Gerincsérültek esetén, adataink alapján a FES edzés az artériás középnyomás értékét emeli, az edzés után pedig visszaáll közel az edzést megelőző szintre.



7. ábra. Egy vizsgálati személy középteljesítményének változása egy év alatt
Figure 7. Change of power output of one participant during one year

A trendet figyelembe véve, összefoglalva elmondhatjuk, hogy a FES kerékpározás a betegek pulzus és vérnyomás értékeire nézve is hatással van, a kardiovaszkuláris változások követik a szervezet ért terhelés mértékét, a szervezet alkalmazkodik ahhoz, akár csak egy egészséges ember esetén, azonban az értékek emelkedése kisebb mértékű, ami gerincvelősérült embereknél természetesen nem is várható el.

Az **5. ábra** reprezentálja, hogy a FES-sel végzett kerékpározó edzés megkezdése után a pulzus emelkedik, majd az edzés után kis mértékben csökken.

A **6. ábra** bemutatja, hogy az edzés megkezdése után az artériás középvernyomás értéke emelkedik, majd az edzés második harmadában már csökken és ez a csökkenés tovább folytatódik az edzés után is.

A **7. ábra** az egy év alatt egy személy által elvégzett 60 edzés során rögzített edzésenkénti középteljesítményt mutatja, a 60 edzést elvégezni körülbelül egy év alatt lehetett.

Spiroergometriai esetvizsgálat eredménye

A vizsgálati személy sérülése következtében várható csökkent légzőrendszeri teljesítmény alig volt tapasztalható (IVC 90%, FEV1 104%, FEV1/IVC 114%, PEF 115%, elvárt értékek százalékában). A vita maxima kar-ergometriás mérés eredményei alapján szintén elmondható, hogy állapotához képest a páciens jól terhelhető (VO₂max 82%, VO₂max/kg 62%, HRmax 118%/176/, O₂ pulzus a maximális terheléskor 69%, VE 98%, elvárt értékek százalékai). FES-edzés alatt nehézségekbe ütköztünk, egyrészt az elektromos stimuláció miatt EKG mérésre nem kerülhetett sor, másrészt az edzéshez még a jelen tapasztalatok alapján kell kialakítani az edzési protokollt. Ami azonban megfigyelhető, hogy a tejsav 7 mmol/l koncentrációt mutatott FES-edzés közben, ami már anaerob terhelést jelez, a pulzus pedig 105 ütés/percre emelkedett (70%-a a várt maximumnak). Ennek alapján elmondhatjuk, hogy vizsgálati szemé-

lyünk, aki sérülése előtt aktív sportoló volt, kiválóan megfelel a módszer alkalmazásához és az edzés hatásainak vizsgálatához. A FES-edzés olyan fizikai terhelést okoz, amellyel egy egyébként (bénulás következtében) passzív testrészt edzhető és izomzata a sérülés után is fejleszhető.

Tricikliző mozgás és verseny gerincvelősérültek számára

A Cybathlon 2016 tricikliző versenyre való felkészülésről részletesen beszámoltak (Tong és mtsai, 2017) és feltöltöttek egy YouTube videót, ami elérhető a következő webcímen: <https://www.youtube.com/watch?v=4rG1tlicrWk>. Ezen a versenyen 16 csapat vett részt a világ különböző országaiból. Minden csapatban a versenyző mellett a technikai feltételeket kidolgozó munkatársak (mérnökök, informatikusok) és a versenyzőt felkészítő munkatársak (gyógytornászok, kineziológusok) vettek részt. Ez a verseny kitűnő példa bionikai megoldások alkalmazására a mozgás-rehabilitációban.

Megbeszélés és következtetések

Súlyos gerincvelősérülés következtében a végtagok mozgását szabályozó idegrendszeri parancsok nem jutnak el a központi idegrendszerből az izmokhoz, azonban mesterséges, funkcionális elektromos izomingerléssel aktív erő kifejtésre készíthetők az izmok, a konkrét mozgási feladatok végrehajtása érdekében. Általában ez a típusú mozgás-rehabilitáció, korszerű bionikai módszerekkel kiegészítve a mozgás-sérült személyek elvesztett mozgási képességeinek helyettesítését eredményezi. Ilyen mozgásszervi rehabilitációs tréningben résztvevő személyek általános fiziológiai állapota és fizikai teljesítménye jelentős mértékben javulhat. Ezen kívül ezek a tanulmányokban bemutatott korszerű bionikai módszerek speciális esetekben aktív sporttevékenységre, versenysportban való részvételre is új lehetőségeket adnak.

Köszönetnyilvánítás

A kutatás a TAMOP-4.2.1, B-11/2/KMR-2011-0002, a GINOP-2.3.3-15-2016-00032, GINOP-2.3.2-15-2016-00022 pályázat és a Wigner Fizikai Kutatóközpont szakmai támogatásával készült. Köszönetünket fejezzük ki Tóth Miklósnak az izomstimuláló készülék kifejlesztésében nyújtott hathatós támogatásáért és a Magyar Sporttudományi Társaságnak munkánk támogatásáért.

Felhasznált irodalom

- Alashram, A.R., Annino, G., Mercuri, N.B. (2020): Changes in spasticity following functional electrical stimulation cycling in patients with spinal cord injury: A systematic review. *The Journal of Spinal Cord Medicine*, 1-14.
- Berkelmans, R. (2008): FES cycling. *Journal of Automatic Control*, **18**: 2. 73-76.
- Chen, Y., He, Y., DeVivo, M.J. (2016): Changing demographics and injury profile of new traumatic spinal cord injuries in the United States, 1972–2014. *Archives of Physical Medicine and Rehabilitation*, **97**: 1610-1619.
- Coste, C.A., Bergeron, V., Berkelmans, R., Martins, E.F., Fornusek, C., Jetsada, A., Hunt, K.J., Tong, R., Triolo, R., Wolf, P. (2017): Comparison of strategies and performance of functional electrical stimulation cycling in spinal cord injury pilots for competition in the first ever CYBATHLON. *European Journal of Translational Myology*, **27**: 4. 251-254.
- Duffell, L.D., Paddison, S., Alahmary, A.F., Donaldson, N., Burrige, J. (2019): The effects of FES cycling combined with virtual reality racing biofeedback on voluntary function after incomplete SCI: A pilot study. *Journal of NeuroEngineering and Rehabilitation*, **16**: 149.
- Eser, P., de Bruin, E.D., Telle, I., Lechner, H.E., Knecht, H., Stussi, E. (2003): Effect of electrical stimulation-induced cycling on bone mineral density in spinal cord-injured patients. *European Journal of Clinical Investigation*, **33**: 412-419.
- Hooker, S.P., Figoni, S.F., Rodgers, M.M., Glaser, R.M., Mathews, T., Suryaprasad, A.G., Gupta, S.C. (1992): Physiologic effects of electrical stimulation leg cycle exercise training in spinal cord injured persons. *Archives of Physical Medicine and Rehabilitation*, **73**: 5. 470-476.
- Janssen, T.W.J., Glaser, R.M., Shuster, D.B. (1998): Clinical efficacy of electrical stimulation in paraplegic cycling: effects on health, fitness and function. *Topics in Spinal Cord Injury Rehabilitation*, **3**: 3. 33-49.
- Katona P., Klauber A., Laczkó J. (2011): Gerinc-sérültek Funkcionális Elektromos Stimulációs edzésének tapasztalatai. *Magyar Sporttudományi Szemle*, **46**: 44-45.
- Katona P., Laczkó J., Protzner A., Ramocsa G., Klauber A., Tóth M. (2013): Terheléses vizsgálat eredményei gerincvelő sérült személy FES kerékpározó edzése során. *Magyar Sporttudományi Szemle*, **54**: 33-34.
- Katona, P., Pilissy, T., Tihanyi, A., Laczko, J. (2014): The combined effect of cycling cadence and crank resistance on hamstrings and quadriceps muscle activities during cycling. *Acta Physiologica Hungarica*, **101**: 4. 505-516.
- Katona, P., Uto, K., Trajer, E., Bosnyak, E., Protzner, A., Laczko, J., Toth, M. (2015): The effect of FES-assisted cycling on the cardiopulmonary system of CNS injured individuals. In: *Program Book of the Progress in Motor Control X. Conference*, Budapest, Hungary, 158.
- Laczko, J., Klauber, A., Molnar, L. (1991): Application of a mathematical brain theory in rehabilitation of spinalcord injured patients. In: Freilinger, G., Deutinger, M. (eds.): *Third Vienna Muscle Symp.* Blackwell-MZV, Vienna, Austria. 309-312.
- Laczko, J., Pilissy, T., Klauber, A. (2008): Neuro-mechanical factors in controlling cycling movements of spinal cord injured patients through functional electrical stimulation. In: *Proc. of the 12th International Conference on Cognitive and Neural Systems*. Boston MA, 104.
- Laczko, J. (2011): Modeling of human movements, Neuroprostheses. *Clinical Neuroscience/Ideggyógyászati Szemle*. **64**: 7-8. 162-167.
- Laczko, J., Katona, P., Waszlavik, E., Klauber, A. (2012): Dependence of cycling performance on training time and stimulation frequency during FES driven cycling. In: *IFESS 2012, 17th Annual Meeting*. International Functional Electrical Stimulation Society, 448-451.
- Laczko, J., Mravcsik, M., Katona, P. (2016): Control of cycling limb movements: Aspect for rehabilitation. *Advances in Experimental Medicine and Biology*, **V**: p 957. 273-289.
- Mazzoleni, S., Battini, E., Rustici, A., Stampacchia, G. (2017): An integrated gait rehabilitation training based on Functional Electrical Stimulation cycling and overground robotic exoskeleton in complete spinal cord injury patients: preliminary results. In: *2017 International Conference on Rehabilitation Robotics (ICORR)*. IEEE, London, UK, 289-293.
- Metani, A., Popović-Maneski, L., Mateo, S., Lemahieu, L., Bergeron, V. (2016): Functional electrical stimulation cycling strategies tested during preparation for the First Cybathlon Competition – a practical report from team ENS

- de Lyon. *European Journal of Translational Myology*, **27**: 4. 279-288.
- Miami project: Statistics of Miami project 2019. from <https://www.themiamiproject.org/resources/statistics/>.
- Mravcsik, M., Klauber, A., Laczko, J. (2015): Power output of spinal cord injured individuals during functional electrical stimulation driven bicycling lower limb movement. In: *Program Book of the Progress in Motor Control X. Conference*, Budapest, Hungary, 126.
- Mravcsik, M., Klauber, A., Laczko, J. (2016): FES driven lower limb cycling by four and eight channel stimulations – a comparison in a case study. In: *Proceedings Book of the 12th Vienna International Workshop on Functional Electrical Stimulation*. Vienna, Austria, 89-93.
- Mravcsik, M., Kaluber, A., Laczko, J. (2017): FES driven cycling: increased crank resistance in the case of lower level of injury – comparison of case studies. In: *Conference proceedings of the IFESS 2017*, London, UK, 87.
- Mravcsik, M., Kast, C., Vargas Luna, J.L., Aramphianlert, W., Hofer, C., Malik, Sz., Putz, M., Mayr, W., Laczko, J. (2018): FES driven cycling by denervated muscles. In: *Program Book of the 22th Annual Conference of the Functional Electrical Stimulation Society*. Nottwil, Switzerland, 134-136.
- Mravcsik, M., Klauber, A., Putz, M., Kast, C., Mayr, W., Laczko, J. (2019): Tricycling by FES of quadriceps muscles leads to increased cycling speed over series of trainings of persons with flaccid paraplegia. In: *Proceedings of the 13th Vienna FES Workshop*. Vienna, Austria, 133-135.
- Pilissy, T., Klauber, A., Fazekas, G., Laczko, J., Szecsi, J. (2008): Improving functional electrical stimulation driven cycling by proper synchronization of the muscles. *Clinical Neuroscience/ Ideggyógyászati Szemle*, **61**: 5-6. 162-167.
- Pollack, S.F., Axen, K., Spielholz, N., Levin, N., Haas, F., Ragnarsson, K.T. (1989): Aerobic training effects of electrically induced lower extremity exercises in spinal cord injured people. *Archives of Physical Medicine and Rehabilitation*, **70**: 214-219.
- Schutte, L.M., Rodgers, M.M., Zajac, F.E., Glaser, R.M. (1993): Improving the efficacy of electrical stimulation-induced leg cycle ergometry. An analysis based on a dynamic musculoskeletal model. *IEEE Transactions on Rehabilitation Engineering*, **1**: 109-125.
- Szecsi, J., Fiegel, M., Krafczyk, S., Straube, A., Quintern, J., Brandt, T. (2004): The electrical stimulation bicycle: a neuroprosthesis for the everyday use of paraplegic patients. *MMW Fortschritte der Medizin*, **146**: 26. 37-8, 40-1.
- Szécsei J., Fincziczki Á., Laczkó J., Straube A. (2005a): Elektrostimuláció segítségével hajtott tricikli: neuroprotézis harántsérült páciensek mindennapos használatára. *Rehabilitáció*, **15**: 1. 9-14.
- Szécsei J., Laczkó J., Klauber A. (2005b): Funkcionális elektrostimuláció segítségével hajtott tricikli és ergométer harántsérültek számára: a technikai környezet individuális illesztése a pácienshez. In: *Előadás összefoglalók: Orvosi Rehabilitáció és Fizikális Medicina Magyarországi Társasága XXIV. Vándorgyűlése*, 48-50.
- Tong, R.K.Z., Wang, X., Leung, K.W.C., Lee, G.T.Y., Lau, C.C.Z., Wai, H.W., Pang, P.M.K., Leung, J.H.C. (2017): How to prepare a person with complete spinal cord injury to use surface electrodes for FES trike cycling. In: *Proceedings of the 2017 International Conference on Rehabilitation Robotics (ICORR)*, London, UK, 801-805.
- Valy, A., Laczko, J. (2015): Timing control in cycling against different resistances. In: *Program Book of the Progress in Motor Control X. Conference*, Budapest, Hungary, 160.
- Wilder, R.P., Jones, E.V., Wind, T.C., Edlich, R.F. (2002): Functional electrical stimulation cycle ergometer exercise for spinal cord injured patients. *Journal of Long-Term Effects of Medical Implants*, **12**: 3. 161-174.
- WHO, Statistics of the World Health Organization (2013): from: <https://www.who.int/news-room/fact-sheets/detail/spinal-cord-injury>.