

ODZIV SESTAVE TELESA, MIŠIČNE TOGOSTI IN RAVNOTEŽJA PO 35-DNEVNI ODSOTNOSTI GIBANJA PRI MLADIH IN ZDRAVIH PREISKOVANCIH

CHANGES IN BODY COMPOSITION, MUSCLE STIFFNESS AND POSTURAL STABILITY OCCURRING IN HEALTHY YOUNG MEN SUBMITTED TO A 35-DAY BED REST

Boštjan Šimunič¹, Joern Rittweger³, Gregor Cankar¹, Mihaela Jurdana¹, Tadeja Volmut¹, Tina Šetina¹, Igor B. Mekjavič², Rado Pišot¹

Prispelo: 31. 1. 2008 – Sprejeto: 16. 4. 2008

Izvirni znanstveni članek
UDK 796.01:612

Izvleček

Uvod: Problemi sedečega načina sodobnega življenja se kažejo v fizioloških odzivih, tako pri starejših kot tudi pri mlajših ljudeh. Cilj raziskave je bil ugotoviti odziv morfoloških in skeletno-mišičnih značilnosti ter izgubo funkcionalnih sposobnosti ohranjanja ravnotežja po 35-dnevni popolni gibalni nedejavnosti in zagotovljeni uravnoteženi prehrani glede na njeno sestavo in preiskovančevo telesno težo.

Metode: Deset moških preiskovancev (starih $24,3 \pm 2,6$ let) je v bolnišničnem okolju preležalo 35 dni v vodoravnem položaju. Fiziološke odzive telesa smo vrednotili z merjenji telesne, maščobne in mišične mase, mineralne vsebnosti sprednje golenske kosti, togosti trebuha dveh funkcionalno različnih glav antigravitacijske mišice in sposobnost ohranjanja ravnotežja.

Rezultati: Preiskovanci so v povprečju značilno izgubili 0,97 % ($P=0,001$) telesne teže, 4,1 % ($P=0,009$) mišične mase in 1,7 % ($P=0,000$) mineralne gostote tibialne kosti ter pridobili 1,4 % ($P<0,000$) maščobne mase. Mišična togost se je značilno zmanjšala od 8. dne ležanja ($P=0,006$) dalje pri distalni in že od 1. dneva ($P=0,007$) dalje pri proksimalni glavi notranje stegenske mišice ter se 14. dan po zaključku BR vrnila v izhodiščno stanje le pri distalni glavi. Po zaključku BR in dan kasneje smo ugotovili značilno izgubo ohranjanja ravnotežja za 9,5 % ($P=0,006$), in 17,4 % ($P=0,000$), medtem ko 14. dan po zaključku ležanja ni bilo več značilnih razlik.

Zaključek: Povzamemo lahko, da z uravnoteženo prehrano lahko omejimo izgubo telesne teže in pridobivanje maščobne mase, vendar ne moremo zmanjšati izgube mišične mase ter mineralne vsebnosti tibialne kosti. Ugotovili smo, da se mišična togost zmanjšuje v dveh časovno zakasnenih procesih. Sposobnost ohranjanja ravnotežja je zmanjšana v vsaj prvih 24 urah po zaključku ležanja.

Ključne besede: popolna gibalna nedejavnost, okoljska fiziologija, tenziomiografija, ravnotežje, morfologija, kostna mineralna vsebnost, mišična togost

Original scientific article
UDC 796.01:612

Abstract

Introduction: Sedentary lifestyle causes morphological in physiological changes in both elderly and young people. Horizontal bed rest (BR) is one of the most widely used models for studying the effects of spaceflight, physical inactivity and sedentarism on human body. Our aim was to determine morphological and musculoskeletal changes, and changes in functional balance occurring as a result of total 35-day physical inactivity in persons eating nutritionally well balanced diet adjusted to individual body weight.

¹Univerza na Primorskem, Znanstveno-raziskovalno središče Koper, Inštitut za kineziološke raziskave, Garibaldijeva 1, 6000 Koper

²Inštitut Jožef Stefan, Odsek za avtomatiko, biokibernetiko in robotiko, Jamova cesta 39, 1000 Ljubljana

³Institute for Biomedical Research into Human Movement and Health, Manchester Metropolitan University, Hassall Road, Alsager, ST7 2HL, Velika Britanija

Kontaktni naslov: e-pošta: bostjan.simunic@zrs.upr.si

Methods: Ten healthy young males (age 24.3 ± 2.6 years) were submitted to a 35-day horizontal bed rest in strict hospital environment. Body mass, fat mass, muscle mass, tibial bone mineral content, muscle belly stiffness and postural stability were monitored prior to, during and after bed rest.

Results: Body mass dropped by 1 % ($P=0.001$), muscle mass by 4.1 % ($P=0.009$) and tibial bone mineral content by 1.7 % ($P=0.001$), whereas fat mass increased by 1.4 % ($P=0.001$). There was a significant decrease in belly muscle stiffness: in the distal head of the vastus medialis muscle it declined from the eighth day of bed rest ($P=0.006$), and in the proximal head from the very first day of inactivity ($P=0.007$). After the recovery phase, muscle stiffness returned to baseline levels in the distal head of the vastus medialis only. Postural stability deteriorated by 9.5 % ($P=0.000$) immediately after bed rest and by 17.4 % ($P=0.000$) at the first day of recovery. Fourteen days following the period of bed rest no significant postural stability loss was observed.

Conclusions: Maintaining nearly neutral energy balance reduces body mass drop and fat mass gain, yet fails to preserve muscle mass or decrease tibial bone loss. The observed decrease in muscle belly stiffness varies among different muscles and occurs during two different phases of cessation and regaining of physical activity. Stance stability tests have proved an effective tool for evaluating postural stability in healthy young men submitted to bed rest.

Key words: physical inactivity, environmental physiology, tensiomyography, balance, morphology, bone mineral content, muscle stiffness.

1 Uvod

Veliko ljudi se danes sooča s težavami sedečega načina življenja. Pomanjkanje gibalne/športne dejavnosti in neuravnotežena prehrana vodita do pozitivne energijske bilance, kar se kaže kot skladiščenje maščob v človeškem telesu. Zato obstaja velika verjetnost za pojav poškodb ter bolezni skeletno-mišičnega sistema. V sodobni znanosti se znanstveniki veliko ukvarjajo z okoljskim zdravjem in okoljsko fiziologijo, veliko raziskav je usmerjenih v proučevanje vpliva, ki ga ima gibalno nedejavni življenjski slog na organizem človeka. Študije simulirane breztežnosti, znane tudi pod imenom *Bed Rest*, in njihov vpliv na človeško telo so se res začele zaradi pridobivanja pomembnih informacij o vplivih katerim je in bo izpostavljen posameznik pri potovanju v vesolje (1-7). Kmalu pa je bilo ugotovljeno, da lahko raziskovalne ugotovitve s pridom uporabimo tudi pri študijah vpliva dolgotrajne pooperativne imobilizacije (8-11), posrednega dolgotrajnega vpliva sedečega sloga življenja in procesov staranja (9,10). Pristop znanstvenikov k obravnavi teh problemov je različen.

Vpliv simulirane breztežnosti na človeško telo lahko izvedemo z raziskavo, ko preiskovanci kratkotrajno ali dolgotrajno ležijo v vodoravnem položaju. To raziskavo imenujemo *Bed rest* (BR). Dosedanje raziskave BR so pokazale, da se odzivi človeškega telesa kažejo v izgubi kostne mase (1,12), mišične mase (1,3,13), spremembi sestave telesa (13-15) in izgubah funkcionalnih sposobnosti mišic (6,7,16-18) ter srčno-žilnega sistema (2), pomembne posledice

pa pusti tudi pri ohranjanju oz. vzpostavljanju ravnotežja (19).

Z dolgotrajnim bivanjem v vesolju (od 4 do 14 mesecev) človeško telo izgubi mesečno od 0,4 do 2 % kostne mineralne gostote, 0,6 % mišične mase in pridobi 1,8 % maščobne mase (1,20). Podobne rezultate so dobili tudi v 120 dni trajajoči študiji BR, ko so ugotovili mesečno izgubo kostne mineralne gostote 0,4 % in mesečno pridobivanje maščobne mase za 1,8 % (1). V drugi raziskavi, v kateri so za 21 dni imobilizirali eno nogo, so ugotovili, da se kostna mineralna gostota značilno zmanjša že po 21 dneh in ostane zmanjšana vsaj še 90 dni po zaključeni imobilizaciji (8). Postopki za preprečevanje izgub mišične mase in kostne mineralne gostote so bili predlagani že zelo kmalu, vendar rezultati niso bili povsem uspešni. Prav tako jih še niso uporabili v vesoljskih plovilih (21-23). V raziskavi 20-dnevnega BR so ugotovili, da se je v skupini, ki je izvajala vadbo, obseg mišice *quadriceps femoris*, zmanjšal za 7,8 %, medtem ko se je v skupini, ki je z vadbo poskušala preprečiti izgubo mišične mase, obseg prav tako zmanjšal, vendar le za 3,8 % (15). Do podobnih ugotovitev so prišli tudi drugi: ugotovili so pojavnost značilnih sprememb sestave telesa že po 14-dnevni raziskavi BR (24); v 120-dnevnem BR je v skupini, ki ni izvajala vadbe, moč mišične skupine *triceps surae* zmanjšala za 36 %, medtem ko se je pri skupini, ki je vadila, moč zmanjšala le za 3 % (16); v 42-dnevni raziskavi BR so ugotovili, da se je povprečna telesna masa preiskovancev zmanjšala za 2,5 kg, mišična masa za 2,7 kg, odstotek maščobne mase pa se je povečal za 1,8 % (14). Glede na del telesa ugotavljajo,

da se med 42-dnevnim BR telesna masa prerazporedi, mišična masa spodnjih udov se zmanjša za 2 kg, medtem ko se mišična masa zgornjih celo poveča za 0,1 kg (15). Vendar rezultati niso vedno enotni, saj med 42-dnevnim BR niso ugotovili značilnih spremembe maščobne mase telesa (25) kot tudi ne zgornjega dela telesa (13).

Intrinzične spremembe skeletne mišice se izražajo v odzivih na celični ravni (3,26-28), arhitekturnih spremembah (4,14,16,29) kot tudi v mehanskih odzivih (18,29). Uporabljene metode niso dopuščale meritev med potekom BR. Zato zaenkrat še ni podatkov o časovnem sledenju nastopa oz. razvoja mišične atrofije. Pri tem gre poudariti uporabnost mehanomiografskih metod, ki odkrivajo mehanske vibracije trebuha skeletne mišice (30-32) in kot take dopuščajo meritev togosti trebuha skeletne mišice (29). Ugotovljeno je bilo, da je amplituda mehanomiografskega odziva obratno sorazmerno povezana z mišično togostjo (33), kar pomeni, da odziv mišice z višjo mehanomiografsko amplitudo govori o zmanjšani mišični togosti. V naši predhodni raziskavi je bilo pokazano, da je višja amplituda mehanomiografskega odziva trebuha mišice obratnosorazmerno povezana tudi z izgubo premera trebuha mišice, izmerjenega z ultrazvokom (29).

Sposobnost ohranjanja ravnotežja je lastnost človeka, ki zajema tako slušni, vidni kot mišični aparat (34). S staranjem, prisotnostjo različnih bolezni in dolgotrajno gibalno/športno nedejavnostjo se zmanjša motorična sposobnost človeka, predvsem mišična moč telesa, kar prispeva k poslabšanju sposobnosti ohranjanja ravnotežja (35,36). Problemi ohranjanja ravnotežja pa se ne pojavljajo samo pri starejših ljudeh, saj so lahko ti prisotni tudi pri zdravih mladih ljudeh, ki so dolgotrajno gibalno nedejavni (19). Po 90-dnevni raziskavi BR smo poročali o prisotnosti težav z ohranjanjem ravnotežja tudi pri mladih preiskovancih, vendar takrat še nismo imeli možnosti izmeriti ta pojav (7). Znano je, da se ob gibalni nedejavnosti izgubi mišična masa (1,3,13-15) kot tudi mišične motorične sposobnosti (6,7,16-18), kar poveča verjetnost padca tudi pri mladih ljudeh. Večina dosedanjih raziskav proučuje statično in dinamično ohranjanje ravnotežja le na starejših zdravih ljudeh in starejših ljudeh z različnimi živčno-mišičnimi ter srčno-žilnimi boleznimi (35,36).

Naša hipoteza je bila, da se po 35-dnevni odsotnosti gibanja zgodijo povratne spremembe v telesni sestavi, mišični funkciji in koordinaciji ravnotežja ter da so spremembe telesne sestave manjše ob uravnoteženi prehrani.

2 Metode in preiskovanci

2.1 Preiskovanci

Za tovrstno preiskavo smo izbrali deset moških brez živčno-mišičnih in srčno-žilnih obolenj ter poškodb, povprečne starosti $24,3 \pm 2,6$ let (\pm S.D.). Preiskovanci so ležali 35 dni v vodoravnem položaju, kar imenujemo tudi horizontalni *bed rest* (BR). Pred samim potekom preiskave smo zabeležili njihovo telesno težo ($72,8 \pm 10,5$ kg), telesno višino ($179,5 \pm 8,0$ cm) in indeks telesne mase ($22,5 \pm 2,9$ kg m⁻²).

Raziskavo je odobrila Komisija Republike Slovenije za medicinsko etiko in tako je bila izvedena v skladu z načeli Helsinško-Tokijske deklaracije. Vsi preiskovanci so bili prej podrobno obveščeni o poteku raziskave in stopnji tveganja. Na osnovi osebnega razgovora in zdravniškega pregleda so bili uvrščeni v raziskavo, na katero so pristali s podpisom privolitve.

2.2 Protokol raziskave

Raziskava je potekala pod vodstvom Inštituta za Kineziološke raziskave, Znanstveno-Raziskovalnega središča Univerze na Primorskem v sodelovanju z Inštitutom Jožef Stefan v bolnišničnih prostorih Ortopedske bolnišnice Valdoltra v Sloveniji.

Vse dnevne dejavnosti so preiskovanci izvajali v ležečem položaju. Telesna dejavnost je bila strogo prepovedana v celotnem 35-dnevnem obdobju BR. Preiskovanci so imeli organizirano pasivno razgibanje sklepov in masažo 3-krat tedensko pod vodstvom fizioterapevta. Vse dejavnosti preiskovancev smo nadzirali z video nadzorom. Prehrana je bila na začetku uravnotežena po sestavi in količini glede na izračun bazalnega metabolizma (+20 %) preiskovancev. Med raziskavo smo izračune ponavljali v tedenskih presledkih, da bi ohranjali nespremenjeno telesno težo in maščobno maso.

Prva telesna dejavnost preiskovancev po zaključku BR je bil test ortostatične tolerance. Pri tem smo preiskovancem merili srčni utrip in krvni tlak ter simptome sinkope v intervalu 10-minutnega pokončnega položaja. V primeru slabosti, vrtoglavice, izgube vida, potenja, nenadnega padca krvnega tlaka ali frekvence srčnega utripa smo ortostatični test prekinili prej kot v 10 minutah pokončnega položaja.

Na Sliki 1 je prikazan časovni potek vseh fizioloških meritev, ki smo jih izvajali 3 dni pred (BR-3) in en dan (BR-1) pred začetkom BR, na dan začetka BR, po prvem dnevu BR (BR1), drugem (BR2), četrtem (BR4),

sedmem (BR7), osmem (BR8), štirinajstem (BR14), šestnajstem (BR16), enaindvajsetem (BR21), osemindvajsetem (BR28), petintridesetem (BR35), en dan po zaključku BR (REC1) in štirinajst dni po BR (REC14).

2.3 Meritve morfoloških značilnosti

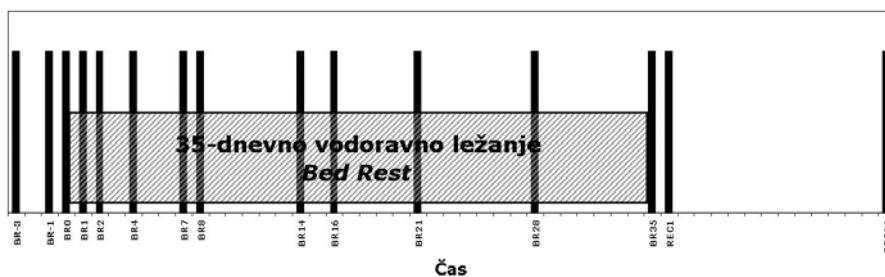
V raziskavi smo spremljali spremembe morfoloških parametrov skozi celotno raziskavo. Na osnovi teh meritev smo vodili individualni izračun uravnotežene prehrane, s katero smo hoteli preprečiti izgubo telesne mase med celotnim potekom raziskave. V meritve smo vključili:

- Meritev telesne mase (v kg), ki smo jo izmerili z uporabo klasične merilne tehnice –
- postelje. Meritev smo izvedli ob BR0, BR7, BR14, BR21, BR28 in BR35.

- Odstotek maščobne mase (v %) in količino mišične mase (v kg), smo izmerili s štiri- točkovnim bioimpedančnim merilnikom (Maltron BioScan 916S, UK) ob BR0, BR7, BR14, BR21, BR28 in BR35. Po navodilih proizvajalca smo postavili po dve elektrodi na nart stopala in dve na hrbtno stran dlani roke.

2.4 Meritev mineralne vsebnosti golenske kosti

Odstotek izgube mineralne vsebnosti tibialne kosti (Δ TBMC v %) smo izračunali na osnovi meritev periferne kvantitativne računalniške tomografije (pQCT XCT 2000, Stratec Medizintechnik, Pforzheim, Germany), ki smo jo izvedli ob BR-3, BR-1 (povprečje obeh za BR0) in ob BR35. Meritev smo izvajali z uporabo rentgenskih žarkov (*Dual energy X-ray absorptiometry – DEXA*) (38). Med ležanjem smo z napravo preiskovancem pregledovali sprednjo golensko kost na



BR-3	BR-1	BR0	BR1	BR2	BR4	BR7	BR8	BR14	BR16	BR21	BR28	BR35	REC1	REC14
TBMC	TBMC	Začetek	TMG	TMG	TMG	TT	TMG	TT	TMG	TT	TT	TT	ROM	TMG
TVP	ROM	TT				FM	FM		FM	FM	FM	FM	PTAN	ROM
ROM	PTAN	FM				MM	MM		MM	MM	MM	MM	TAN	PTAN
PTAN	TAN	MM											TBMC	TAN
TAN		TMG											TMG	
													Konec	
													OT	
													TVP	
													ROM	
													PTAN	
													TAN	

Dnevi pred BR (BR-3, BR-1), med BR (BR0 – BR35) in po BR (REC1 in REC14) ter prikaz izbranih meritev, katerih rezultati so prikazani v tem prispevku: merjenje tibialne vsebnosti kosti (TBMC), testi ravnotežja (TVP, ROM, PTAN in TAN), merjenje telesne mase (TT), odstotka maščobne mase (FM), mišične mase (MM), togosti trebuha mišice (TMG) in test ortostatične tolerance (OT).

Slika 1. Časovni prikaz fizioloških testiranj v raziskavi 35-dnevne popolne nedejavnosti mladih preiskovancev. Na dodani tabeli je razviden trenutek 'začetka' in 'konca' BR.

Figure 1. Time pattern of physiological testing of young men submitted to 35 days of bed rest. The table indicates the beginning and the end of BR.

desni nogi. Zagotovili smo varnostne ukrepe, da ni prišlo do obsevanja z rentgenski žarki ostalih.

2.5 Meritev togosti mišičnega trebuha

V letih od 1990 do danes je bila predstavljena tenziomiografska metoda (TMG) za odkrivanje hitrosti mišičnega krčenja in merjenje mišične togosti (39-44). Razvita je bila na ljubljanski Fakulteti za elektrotehniko in temelji na načelih bolj znanih mehanomiografskih metod (37-39) in metodi merjenja znotrajmišičnega pritiska (45-47), od katerih se razlikuje v načinu zajemanja informacije.

Intrinzične spremembe togosti trebuha skeletnih mišic smo spremljali z metodo TMG tako, da so preiskovanci udobno ležali na hrbtu in imeli, ob uporabi podporne blazine kolenski sklep pokrčen za 30 stopinj (0 stopinj je popolnoma iztegnjeno koleno). Metoda TMG spremlja mehanski odziv mišice na en električni dražljaj supramaksimalne amplitude in širine 1 milisekunde, ki je od električnega stimulatorja (TMG-ZD1, Furlan & Co. d.o.o.) pripeljan do mišice preko samolepilnih elektrod (PALS, Axelgaard). Elektrode in senzor so bile nameščene na merilne točke po priporočilih elektromiografske metode (48). Iz odziva v časovnem prostoru smo izločili maksimalno amplitudo (D_m v mm), ki nam je služila za mero mišične togosti. Čim višja je bila D_m , tem manjša je bila mišična togost oziroma atrofija (29,33). Spremljali smo odzive mišice iztegovalke kolena *vastus medialis* (VM), in sicer njena oba dela:

- *Vastus medialis obliquus* (VMO) distalni del mišice VM, ki je odgovoren za stabilizacijske funkcije kolenskega sklepa (49,50).
- *Vastus medialis longus* (VML) proksimalni del mišice VM, ki ima podobno funkcijo kot mišica *vastus lateralis*, to je generiranje mišične sile z namenom dinamičnih gibov kolenskega sklepa (odriv, tek, ...) (49,50).

Meritve obeh mišic smo izvajali ob BR0, BR1, BR2, BR4, BR8, BR16, BR35 in REC14.

2.6 Meritev sposobnosti ohranjanja ravnotežja

Ravnotežje preiskovancev smo testirali statično in dinamično. Statično z uporabo pritiskovne plošče (BXS, Soehnle Professional, GmbH), medtem ko dinamično z uporabo testa 'Vstani in pojdi' (*Timed Get up and go*) (51). Sposobnost ohranjanja statičnega ravnotežja smo testirali na osnovi šestih 10-sekundnih testov, pri katerih so merjenci morali stati na mestu ob minimalnem nihanju telesa. Spremljali smo parameter dolžine vektorja nihanja težišča telesa (DVNT v cm).

Preiskovanci so najprej zavzeli položaj pokončne drže telesa s stopali tesno skupaj (Rombergov test, ROM). Če so test ROM uspešno opravili, so zavzeli naslednji položaj, pri katerem so imeli poleg obeh stopal tesno skupaj še eno stopalo za pol dolžine pred drugim (Polovični tandem, PTAN). Po uspešno prestanem testu PTAN, so zavzeli položaj naslednjega testa, pri katerem so imeli eno stopalo pred drugim (Tandem, TAN), tako da so se prsti zadnjega stopala dotikali pete sprednjega stopala. Teste ROM, PTAN in TAN so preiskovanci najprej izvajali z odprtimi očmi ($_{oo}$), potem pa v istem vrstnem redu še z zaprtimi očmi ($_{oz}$). Meritev smo izvedli ob BR-3 in BR-1 (povprečje skupaj za BR0), BR35, REC1 ter REC14.

Sposobnost ohranjanja ravnotežja med dinamičnim testom 'Vstani in pojdi' smo izvedli tako, da je na začetku merjenec sedel na stolu v višini 39,2 cm (z oporami za roke). Po štartnem povelju je imel nalogo, da v lastno izbrani hitrosti hoje čim hitreje prehodi pot do tri metre oddaljenega stožca, ga obkroži, se vrne nazaj do stola in se nanj usede. Merili smo čas od štartnega povelja do dokončanja naloge (TVP v s). Dinamični test ravnotežja oziroma test mobilnosti je bil ob BR-3 (za BR0) in ob BR35.

2.7 Statistika

Vsi podatki so prikazani s povprečnimi vrednostmi \pm standardni odklon. Statistična značilnost sprememb je bila testirana z uporabo statističnega paketa SPSS 12.0 (SPSS Ltd.). Za dokazovanje značilnih časovnih učinkov smo uporabili poskuse s ponavljanimi meritvami (Repeated Measures ANOVA) kot tudi pri dokazovanju sprememb vseh posameznih testov od BR1 do BR35 oz REC14 glede na izhodiščno stanje BR0. Statistična značilnost je bila potrjena (in na slikah posebno označena) pri treh različnih stopnjah tveganja (* $P < 0,05$; \$ $P < 0,01$ in # $P < 0,001$).

3 Rezultati

Vseh deset preiskovancev je uspešno zaključilo BR ter po zaključeni raziskavi uspešno okrevalo. Sedem od desetih preiskovancev je takoj po zaključenem BR uspešno prestalo tudi test ortostatične tolerance, ostalim je po sedmih minutah kritično padel krvni tlak, zaradi česar smo morali test prekiniti. Neuspešno opravljen ortostatični test treh preiskovancev ni predstavljal nevarnosti za izvedbo naslednjega nabora testov (ROM, PTAN, TAN), saj ti niso zahtevali več kot 10-sekundno pokončno držo.

3.1 Telesna masa in sestava telesa

Ugotovili smo, da se je telesna masa statistično značilno zmanjšala ($P=0,001$), kar je prikazano na Sliki 2. Odstotek maščobne mase se v celotni raziskavi BR statistično značilno poveča ($P=0,000$) kot tudi količina mišične mase ($P=0,009$). Obdelava podatkov (Slika 2) glede na izhodiščno stanje BR0 prikazuje:

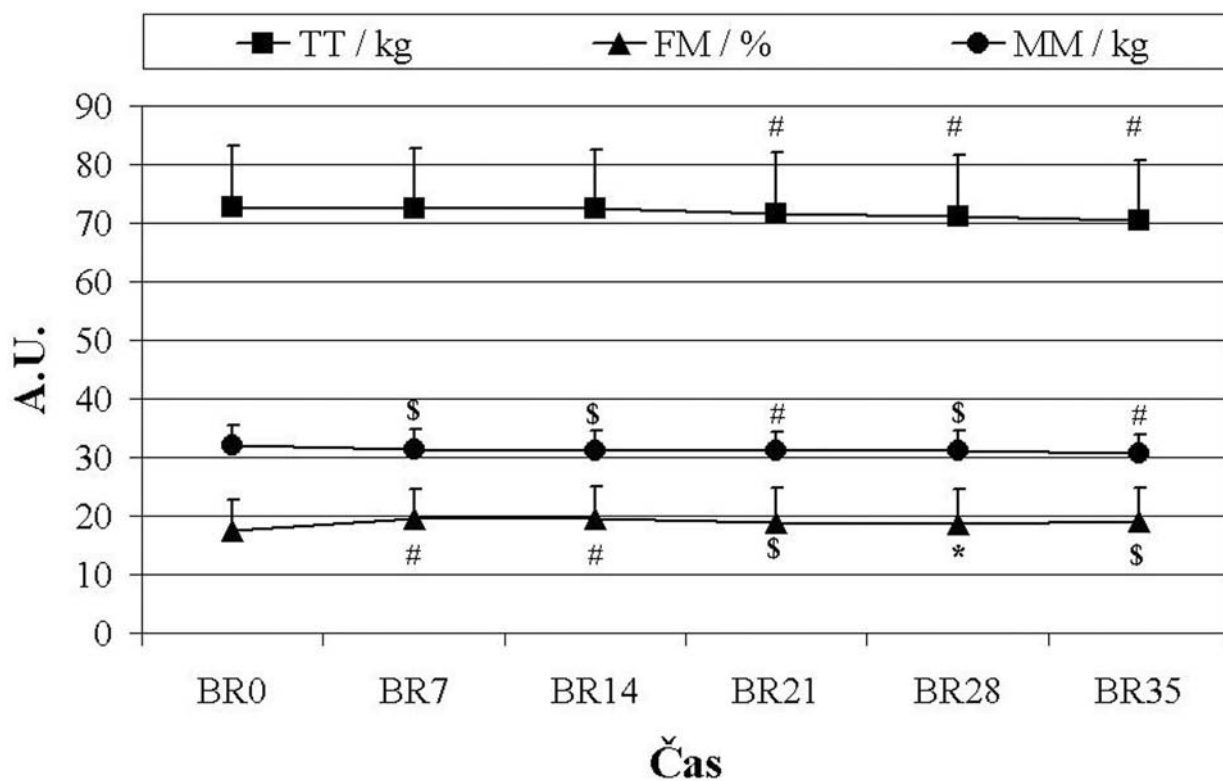
- Telesna masa se statistično značilno zniža šele ob BR21 (0,98 %, $P=0,000$) in ostane zmanjšana tudi ob BR28 (0,98 %, $P=0,000$) ter BR35 (0,97 %, $P=0,000$). Telesna masa upade značilno za 1 % ob BR21 in ostane do konca BR konstantna.
- Odstotek maščobne mase se statistično značilno poveča ob že ob BR7 (1,9 %, $P=0,000$) in ostane povečan tudi ob BR14 (1,9 %, $P=0,001$), BR21 (1,4

%, $P=0,001$), BR28 (1,0 %, $P=0,049$) ter BR35 (1,4 %, $P=0,007$). Spremembe pa niso več značilne, če jih opazujemo od trenutka BR7 do BR35 ($P=0,090$).

- Količina mišične se mase zniža že ob BR7 (2,0 %, $P=0,004$) ter ostane zmanjšana tudi ob BR14 (2,5 %, $P=0,002$), BR21 (2,7 %, $P=0,000$), BR28 (2,7 %, $P=0,001$) ter BR35 (4,1 %, $P=0,000$). Zmanjšanje mišične mase je statistično značilno še v zadnjem tednu – BR35 ($P=0,002$).

3.2 Mineralna vsebnost golenske kosti

TBMC se preiskovancem po BR zmanjša, in sicer za $1,66 \% \pm 0,87$ ($P=0,000$). Δ TBMC je pri štirih preiskovancih dosegla mejno vrednost, ki jo Mednarodna zdravstvena organizacija vrednoti za osteopenijo (52).



Statistični test tedenskih meritev (BR7-BR35) morfoloških značilnosti glede na izhodiščno stanje (BR0): * $P < 0,05$; \$ $P < 0,01$; # $P < 0,001$

Slika 2. Trend sprememb telesne mase (TT), odstotka maščobne mase (FM) in količine mišične mase (MM). Prikazane so povprečne vrednosti (s standardni odklon).

Figure 2. Trends in body mass (TT), fat mass (FM) and muscle mass (MM) changes. Mean values (with SD) are presented.

3.3 Mišična togost

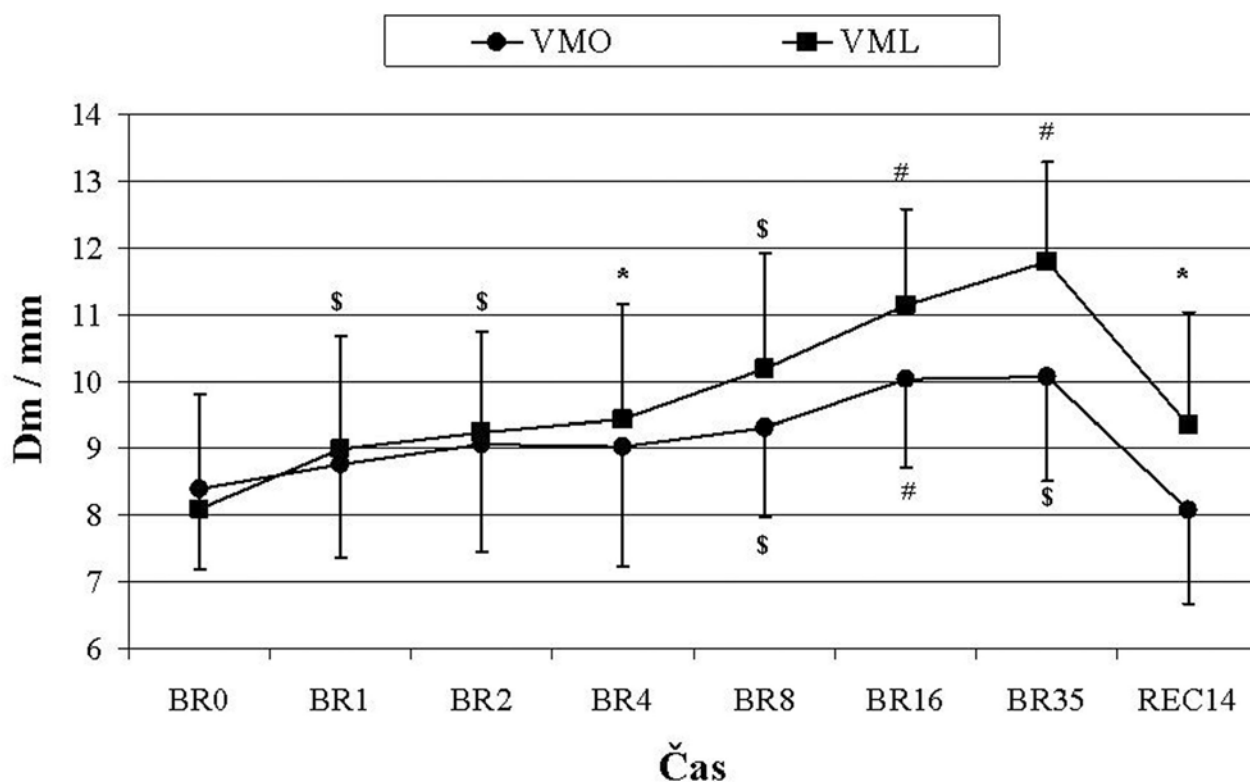
Na Sliki 3 je prikazan časovni trend sprememb Dm za mišici, VMO in VML. Glede na izhodiščno stanje se pri mišici:

- VMO Dm poveča ob BR8 (11 %, $P=0,006$), BR16 (19 %, $P=0,000$) in BR35 (20 %, $P=0,002$). Rezultat priča, da se Dm začne povečevati šele ob BR8, vendar se že ob REC14 povrne nazaj v izhodiščno stanje ($P=0,437$).
- VML Dm poveča ob BR1 (11 %, $P=0,007$), BR2 (14 %, $P=0,001$), BR4 (16 %, $P=0,017$), BR8 (26 %, $P=0,004$), BR16 (38 %, $P=0,000$), BR35 (46 %, $P=0,000$) in REC14 (15 %, $P=0,023$). Ta rezultat priča, da se Dm začne povečevati že ob BR1, doseže visoko povečanje in se ob REC14 še vedno ne povrne v izhodiščno stanje ($P=0,023$).

3.4 Ravnotežje

Na Sliki 4 smo prikazali, da se je časovni trend statičnih testov DVNT značilno spremenil v testih ROM_{OO} ($P=0,045$), $PTAN_{OZ}$ ($P=0,009$) in TAN_{OZ} ($P=0,020$). DVNT se je glede na BR0 značilno povečala tako ob BR35 (ROM_{OO} , $PTAN_{OZ}$ in TAN_{OZ}) kot tudi ob REC14 (ROM_{OO} , TAN_{OO} , ROM_{OZ} , $PTAN_{OZ}$ in TAN_{OZ}). Ob REC14 ni bilo značilnih sprememb DVNT, čeprav lahko vidimo, da so bile spremembe še vedno prisotne, a ne statistično značilne.

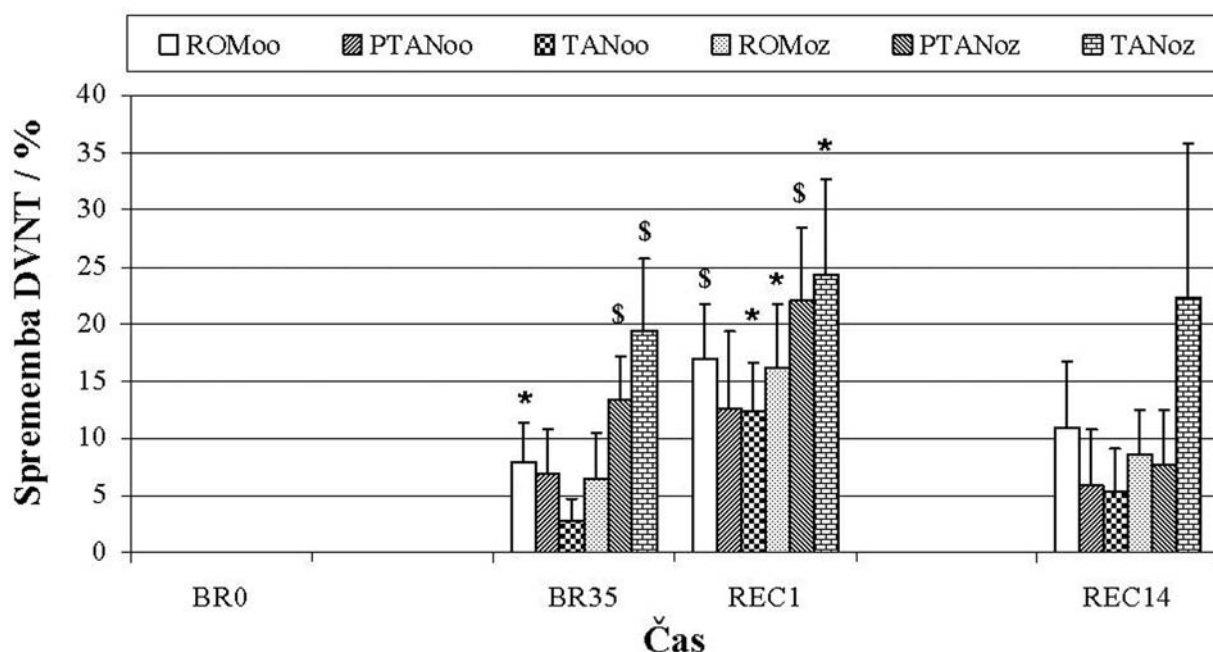
TVP dinamičnega testa ravnotežja 'Vstani in pojdi' se je statistično značilno povečal ob BR35 glede na BR0 ($P=0,000$). Povprečni TVP je bil ob BR0 6,21 sekunde, medtem ko ob BR35 8,84 sekunde. Eden od preiskovancev je ob BR35 dosegel več kot 12 sekund kar po priporočilih (53) velja za klinično diagnosticirano veliko verjetnost padca.



Statistični test glede na izhodiščno stanje ob BR0: * $P < 0,05$; \$ $P < 0,01$; # $P < 0,001$

Slika 3. Trend sprememb maksimalnega odmika (Dm) odziva TMG. Prikazane so povprečne vrednosti (s standardnim odklonom).

Figure 3. Trends in Dm response during the TMG test. Mean values (with SD) are presented



Statistični test glede na izhodiščno stanje ob BR0: * $P < 0,05$; \$ $P < 0,01$

Slika 4. Sprememba dolžine vektorja nihanja težišča telesa (DVNT) glede na BR0. Prikazani so rezultati treh statičnih testov (ROM, PTAN in TAN) pri izvedbi z odprtimi in zaprtimi očmi (oo in oz).

Figure 4. Changes in the length of oscillating gravity vector (DNVT) with respect to BR0; results of three statistical tests (ROM, PTAN and TAN); testing performed with the eyes open and closed (oo in oz).

4 Razpravljanje

V zadnjih šestih letih so ekipe domačih in tujih znanstvenikov uspešno izpeljale raziskovalni projekt *Vpliv simulirane breztežnosti na človeka*, v katerem so proučevali vpliv 35-dnevnega ležanja na človeško telo. Raziskave so bile multidisciplinarnega in mednarodnega značaja in so vsebovale več samostojnih raziskav. Z gradnjo mednarodne vesoljske postaje *Freedom* bo človeška prisotnost v vesolju vse pogostejše. Najdaljša bivanja astronautov v vesolju do sedaj so trajala približno leto dni, predvidena pa so do 2,5 let. Na podlagi izkušenj iz vesolja kot tudi zemeljskih poskusov se zavedamo, da breztežnost pusti na telesu določene spremembe, ki so ob daljšem bivanju v vesolju lahko škodljive. Te spremembe se zrcalijo v največji meri v glavnih organskih sistemih, ki so zadolženi za zoperstavljanje težnosti v mirovanju in toliko bolj v gibanju – skeletno-mišični, srčno-žilni, dihalni in živčni sistem. Trenutne raziskave na Zemlji so usmerjene k razumevanju vzrokov teh sprememb in k razvijanju

ukrepov, ki bi preprečili škodljive fiziološke odzive. Ker pa se podobne posledice kažejo tudi v primeru gibalne nedejavnosti posameznika (bolniki, sedeči način življenja, starostniki, ...) v specifični situaciji oz. stanju, tudi na zemlji, lahko vrednost raziskovanih ugotovitev usmerimo k dvigu kakovosti sodobnega življenja. Predstavljena raziskava je pokazala vpliv gibalne nedejavnosti mladih in zdravih moških na morfološke in funkcionalne parametre človeškega telesa. V pregledu rezultatov smo predstavili vpliv 35-dnevne simulirane breztežnosti (BR) na spremembe v telesni sestavi telesa z uporabo bioimpedančne metode; izgubo mineralne gostote kostne mase z uporabo rentgenskih žarkov; izgubo mišične togosti z uporabo tenziomiografske meritve in izgubo sposobnosti ohranjanja ravnotežja z uporabo statičnega testiranja na pritiskovni plošči ter dinamičnega testiranja. Podatki o mišični togosti in sposobnosti ohranjanja ravnotežja so prikazani tudi 14 dni po zaključku raziskave BR. Vseh deset preiskovancev, vključenih v raziskavo, je uspešno prestalo 35-dnevni horizontalni BR kot tudi 14-dnevno rehabilitacijo. Meritve vseh testov so bile

uspešno opravljene in rezultati statistično obdelani. Glede na to, da so bili obroki hrane po sestavinah in količinsko uravnoreženi, so preiskovanci morali pojediti celotne obroke brez dodatnih prehranskih dodatkov. Glede na to je rezultate naše raziskave zanimivo primerjati z rezultati drugih podobnih raziskav, ki kaloričnega vnosa prehrane niso spremljali.

Telesna masa preiskovancev je skozi celotno raziskavo statistično značilno upadla za 0,97 %, in to v celotni meri do BR21. Pridobivanje maščobne mase je sicer bilo v celotni študiji značilno za 1,4 %, vendar se že po prvem tednu BR ni več povečevalo. Z uravnavano prehrano pa nismo vplivali na izgubo mišične mase, ki je značilno upadla že prvi teden in je linearno upadala do konca BR, za 4,1 %. Če primerjamo naše rezultate z rezultati drugih raziskav, lahko potrdimo, da se največja dinamika sprememb zgodi v prvih tednih BR. Kasneje se umiri (telesna masa in odstotek maščobne mase) ali linearno strmo (mišična masa) nadaljuje. Naši preiskovanci so izgubili več mišične mase in pridobili manj maščobne mase ter izgubili manj telesne mase kot v drugih raziskavah (1,15). Razlog je v dejstvu, da odsotnost gibanja ni edini parameter izgubljanja mišične mase, temveč je potrebno upoštevati tudi stres, ki je ob tovrstnih poskusih vedno prisoten. Pomembno pa je dejstvo, da lahko tudi v primeru, ko gibalna dejavnost ni mogoča (poškodbe, ...), s primerno prehrano omilimo določene negativne posledice.

Ugotovljena Δ TBMC je bila 1,66 %. V primerjavi z dolgotrajnim bivanjem v vesolju lahko rečemo, da so naši preiskovanci izgubili bistveno več kostne mase. Razpon Δ TBMC naših preiskovancev, po 35-dneh BR, je bil od 0,7 % do 2,8 %, medtem ko po mesečnem bivanju v vesolju 0,4 % (1), kar nakazuje sorazmerno velik razpon rezultatov. Mednarodna zdravstvena organizacija tovrstne izgube v svojih standardih označuje za obolelost skeletnega sistema, sproženo z nedejavnostjo (52). Hkratna izguba kostne in mišične mase po kratkotrajni nedejavnosti predstavlja veliko ogroženost tudi mladih preiskovancev.

Mišična atrofija je tesno povezana z izgubo mišične mehanske togosti (54). Informacija o mišični togosti se preko vibracij in deformacije trebuha mišice prenese v mehanski odziv mišice, izmerjen z mehanomiografsko metodo (33). V podobni 35-dnevni BR študiji smo že pokazali, da je magnituda izgube mišične togosti linearno povezana z magnitudo izgube mišičnega premera (19). V sedanji raziskavi smo prvi ovrednotili dinamiko poteka izgube mišične togosti dveh funkcionalno različnih antigravitacijskih mišic. Mišici VMO in VML sta anatomsko zelo težko ločljivi (49) vendar obstajata ločeni motorični točki (49,50), kar

nakazuje različne načine in čase delovanja obeh mišic. Na mišici VMO, ki je odgovorna bolj za stabilizacijske funkcije kolenskega sklepa (49,50), smo izmerili sorazmerno majhno izgubo mišične togosti v prvih štirih dneh, potem se je stopnjevala in 14 dni po koncu BR popolnoma povrnila v izhodiščno stanje. Na mišici VML, odgovorni bolj za gibalne funkcije kolenskega sklepa (49,50), se je že prvi dan pokazala velika izguba mišične togosti, se potem stabilizirala, se po štirih dneh zopet povečala in se še 14. dan po BR ni vrnila v izhodiščno stanje. Na osnovi tega lahko predvidevamo, da izguba mišične togosti in verjetno tudi mišične atrofije poteka v dveh fazah in to različno za različne mišice. Obstajajo mišice, ki so po naravi bolj odporne proti izgubi mišične togosti in se jim tudi hitreje povrne togost v izhodiščno stanje. Izmerili pa smo tudi, da je v prvih dveh dneh velik gradient izgube mišične togosti, ki se potem pojavi še enkrat, po štirih oziroma osmih dneh. Dva časovno ločena procesa torej uravnavata izgubo mišične togosti, katera, pa bo potrebno za zanesljivejšo interpretacijo še dodatno raziskati. Do tedaj pa lahko le sumimo, da je prvi proces izguba medcelične tekočine in drugi proces degradacija mišičnih beljakovin.

Posebej smo med rezultati prikazali izgubo funkcionalnih sposobnosti mladih preiskovancev s stališča sposobnosti ohranjanja ravnotežja. Rezultati kažejo, da se je sposobnost ohranjanja ravnotežja DVNT značilno spremenila v prav vseh statičnih testih, ko je bil časovni trend značilno spremenjen v ROM_{OO} ($P=0,045$), $PTAN_{OZ}$ ($P=0,009$) in TAN_{OZ} ($P=0,020$). Naj poudarimo, da težave pri ohranjanju ravnotežja ne izginejo kmalu, ampak so značilne še 24 ur po zaključku BR, prisotne (a ne značilne) pa vsaj še 14 dni po zaključku BR. Poleg izgube sposobnosti ohranjanja ravnotežja v statičnem položaju se razlike kažejo tudi pri dinamičnem testu 'Vstani in pojdi'. TVP se je značilno povečal po BR. Glede na standarde Svetovne zdravstvene organizacije (53) je eden izmed desetih preiskovancev prekoračil čas klinično diagnosticirane velike verjetnosti padca. Ko smo vstavili naše rezultate v izračun indeksa EPESE, edinega klinično definiranega testa ravnotežja (34), smo ugotovili, da je kar 9 preiskovancev doseglo maksimalno 12 število točk in le eden 11 točk (19). To priča, da indeks EPESE ni dovolj selektiven test ravnotežja za mlade.

Rezultati pričujoče raziskave niso uporabni le za bodoče potnike v vesolje, temveč tudi za razumevanje fizioloških odzivov pri gibalni/športni nedejavnosti, hospitaliziranih in imobiliziranih bolnikih ter razumevanju določenih dolgotrajnih procesov staranja. Tovrstna simulacija je metodološko poleg imobilizacije zdravih

udov edini primerni način študije posledic gibalne/športne nedejavnosti na Zemlji. Sedanje vesoljske raziskave so ključnega pomena tudi za zdravstvo, še posebno za ortopedske klinike in rehabilitacijske ustanove, ki imajo opravka z nepomičnimi bolniki.

Pa vendar ne gre pozabiti, da tovrstne študije temeljijo na zaključkih, ugotovljenih na sorazmerno majhnem številu preiskovancev (N=10). Poleg nam znanih, povratnih zdravstvenih sprememb se zagotovo pojavljajo tudi pojavi, ki se pokažejo z zamudo. Slednjih se sicer zavedamo, vendar jih zaenkrat še ne znamo izločiti in spremljati, kar pa bo zagotovo mogoče s študijami v naslednjih letih dela oziroma študijah.

5 Zaključek

Raziskave okoljske fiziologije in moderne raziskave človekovega izpostavljanja breztežnosti so bile prvič predstavljene v Sloveniji leta 2000/2001, ko je v Ortopedski bolnišnici Valdoltra potekala prva tovrstna študija simulacije breztežnostnega prostora. Do danes smo izvedli že tretjo tovrstno študijo in v tem času prišli do pomembnih odkritij ne le za slovenski in evropski, temveč tudi za svetovni prostor.

Zaključki, ki izhajajo iz tega prispevka, so odgovorili na nekaj pomembnih vprašanj, pa tudi zastavili naše raziskovalno delo v prihodnje. Tako lahko povzamemo, da:

- z uravnoteženo prehrano nismo mogli zavreti izgube mišične mase in izgube mineralne vsebnosti kosti, temveč smo lahko omejili izgubo telesne mase in dosegli bistveno manjše povečanje maščobne mase preiskovancev kot ostale podobne študije;
- smo prvi ovrednotili izgubo sposobnosti ravnotežja mladih in zdravih preiskovancev ter predlagali nov postopek za spremljanje tega pomembnega dejavnika preživetja;
- smo prvi pokazali, da se lahko neinvazivno in selektivno spremlja izguba mišične togosti – in s tem mišična atrofija – s tenziomiografsko metodo, ki je slovenskega porekla;
- smo ovrednotili, da so določene mišice bolj odporne na mišično atrofijo in da lahko opazimo dva časovno ločena procesa, ki opredeljujeta stopnjo mišične atrofije;

Vsa spoznanja lahko z ustreznimi prilagoditvami uporabimo v različnih specifičnih situacijah, ko je človek zaradi različne vzroka izpostavljen trajni gibalni nedejavnosti. Z oblikovanjem ustreznih protokolov, ki upoštevajo raziskovalne ugotovitve, pa se negativnim posledicam lahko v veliki meri zoperstavimo, omilimo

njihov vpliv na človeški organizem ter posledično skrajšamo čas rehabilitacije in ponovnega vzpostavljanja prvotnega stanja.

Zahvala

Avtorji se zahvaljujejo Evropski vesoljski agenciji (*European Space Agency*), ki je deloma krila stroške raziskave. Posebna zahvala gre vodstvu in osebju Ortopedske bolnišnice Valdoltra, ki nam je omogočila in pomagala izvesti že tretje tovrstne raziskave v njenih prostorih. Zahvaljujemo se prof. Pietru E. di Pramperu (*University of Udine, Italy*), prof. Gianniju Biolu (*University of Trieste, Italy*), prof. Oli Eikenu (*Karolynska Institutet, Sweden*) in prof. Marku V. Narici (*Metropolitan University, UK*) za sodelovanje in podpiranje našega udejstvovanja na področju okoljske in vesoljske fiziologije. Posebej se zahvaljujemo celotni raziskovalni ekipi iz Slovenije in tujine, ki je prispevala k uspešni izvedbi študije. Na koncu se zahvaljujemo še vsem preiskovancem, da so se bili pripravljene udeležiti tako obsežne študije.

Literatura

1. Le Blanc A, Schneider V, Shackelford L, West S, Oganov V, Bakulin A, et al. Bone mineral and lean tissue loss after long duration space flight. *J Musculoskel Neuron Interact* 2000; 1(2):157-60.
2. Pavy-Le Traon A, Sigaudd D, Vasseur P, Maillat A, Fortrat JO, Hughson RL, et al. Cardiovascular responses to orthostatic tests after a 42-day head-down bed-rest. *Eur J Appl Physiol* 1998; 77: 50-9.
3. Trappe S, Trappe T, Gallagher P, Harber M, Alkner B, Tesch P. Human single muscle fiber function with 84 day bed-rest and resistance exercise. *J Physiol* 2004; 557(2): 501-13.
4. Blotner D, Salanova M, Püttmann B, Schiffl G, Felsenberg D, Buehring B, et al. Human skeletal muscle structure and function preserved by vibration muscle exercise following 55 days of bed rest. *Eur J Appl Physiol* 2006; 97: 261-71.
5. Mekjavic IB, Golja P, Tipton MJ, Eiken O. Human thermoregulatory function during exercise and immersion after 35 days of horizontal bed-rest and recovery. *Eur J Appl Physiol* 2005; 95: 163-71.
6. Adams GR, Caiozzo VJ, Baldwin KM. Skeletal muscle unweighting: spaceflight and ground-based models. *Eur J Appl Physiol* 2003; 95: 2185-201.
7. Rittweger J, Felsenberg D, Maganaris CN, Ferretti JL. Vertical jump performance after 90 days bed rest with and without flywheel resistive exercise, including a 180 days follow-up. *Eur J Appl Physiol* 2007; 100: 427-36.
8. Rittweger J, Winwood K, Seynnes O, De Boer M, Wilks D, Lea R, Rennie M, Narici MV. Bone loss from the human distal tibia epiphysis during 24 days of unilateral limb suspension. *J Physiol* 2006; 577: 331-7.
9. Pathare N, Walter GA, Stevens JE, Yang Z, Okerke E, Gibbs JD, et al. Changes in inorganic phosphate and force produc-

- tion in human skeletal muscle after cast immobilization. *J Appl Physiol* 2005; 98: 307–14.
10. Duchateau J, Hainaut K. Electrical and mechanical changes in immobilized human muscle. *J Appl Physiol* 1987; 62(6): 2168-73.
 11. Rittweger J, Winwood K, Seynnes O, De Boer M, Wilks D, Lea R, et al. Bone loss from the human distal tibia epiphysis during 24 days of unilateral limb suspension. *J Physiol* 2006; 577: 331-7.
 12. Hyeteok K, Iwasaki K, Miyake T, Shiozawa T, Nozaki S, Yajima K. Changes in bone turnover markers during 14-day 6° head-down bed rest. *J Bone Mineral Metab* 2003; 21: 311–5.
 13. Ritz P, Acheson KJ, Gachon P, Vico L, Bernard JJ, Alexandre C, et al. Energy and substrate metabolism during a 42-day bed-rest in a head-down tilt position in humans. *Eur J Appl Physiol* 1998; 78: 308–14.
 14. Le Blanc A, Lin C, Shackelford L, Sinityn V, Evans H, Belichenko O, et al. Muscle volume, MRI relaxation times (T2), and body composition after spaceflight. *J Appl Physiol* 2000; 89: 2158–64.
 15. Gretebeck RJ, Schoeller DA, Gibson EK, Lane HW. Energy expenditure during antiorthostatic bed rest (simulated microgravity). *J Appl Physiol* 1995; 78(6): 2207–11.
 16. Kawakami Y, Akima H, Kubo K, Muraoka Y, Hasegawa H, Kouzaki M, et al. Changes in muscle size, architecture, and neural activation after 20 days of bed rest with and without resistance exercise. *Eur J Appl Physiol* 2001; 84: 7–12.
 17. Koryak Y. Effect of 120 days of bed-rest with and without countermeasures on the mechanical properties of the triceps surae muscle in young women. *Eur J Appl Physiol* 1998; 78: 128–35.
 18. Kubo K, Akima H, Ushiyama J, Tabata I, Fukuoka H, Kanehisa H, et al. Effects of 20 days of bed rest on the viscoelastic properties of tendon structures in lower limb muscles. *Br J Sports Med* 2004; 38: 324–30.
 19. Šimunič B, Fortunat M, Volmut T, Narici MV, Eiken O, Pisot R, et al. Standing balance, gait, and the 'EPESE' test score before and after 5 weeks of bed rest in young healthy men. *J Gerontol* (v tisku).
 20. Lang T, Le Blanc A, Evans H, Lu Y, Genant H, Yu A. Cortical and trabecular bone mineral loss from the spine and hip in long-duration spaceflight. *J Bone Mineral Metab* 2004; 19: 1006-12.
 21. Alkner BA, Tesch PA. Efficacy of a gravity independent resistance exercise device as a countermeasure to muscle atrophy during 29-day bed rest. *Acta Physiol Scand* 2004; 181: 345-57.
 22. Bamman MM, Clarke MS, Feeback DL, Talmadge RJ, Stevens BR, Lieberman SA, et al. Impact of resistance exercise during bed rest on skeletal muscle sarcopenia and myosin isoform distribution. *J Appl Physiol* 1998; 84: 157-63.
 23. Ferrando AA, Tipton KD, Bamman MM, Wolfe RR. Resistance exercise maintains skeletal muscle protein synthesis during bed rest. *J Appl Physiol* 1997; 82: 807-10.
 24. Ferrando AA, Lane HW, Stuart CA, Davis-Street J, Wolfe RR. Prolonged bed rest decreases skeletal muscle and whole body protein synthesis. *Am J Physiol Endocrinol Metab* 1996; 270: 627-33.
 25. Blanc S, Normand S, Ritz P, Pachiaudi C, Vico L, Gharib C, et al. Energy and Water Metabolism, Body Composition, and Hormonal Changes Induced by 42 Days of Enforced Inactivity and Simulated Weightlessness. *J Clin Endocrinol Metab* 1998; 83(12): 4289–97.
 26. Fitts RH, Riley DR, Widrick JJ. Microgravity and skeletal muscle. *J Appl Physiol* 2000; 89: 823-39.
 27. Koryak Y. Contractile properties of the human triceps surae muscle during simulated weightlessness. *Eur J Appl Physiol* 1995; 70: 344-50.
 28. Widrick JJ, Knuth ST, Norenberg KM, Romatowski JG, Bain JL, Riley DA, Karhanek M, Trappe SW, Trappe TA, Costill DL, Fitts RH. Effect of a 17 day spaceflight on contractile properties of human soleus muscle fibres. *J Physiol* 1999; 516: 915-30.
 29. Pišot R, Narici MV, Šimunič B, De Boer M, Seynnes O, Jurdana M, et al. Whole muscle contractile parameters and thickness loss during 35-day bed-rest. *J Appl Physiol* 2008 (v tisku).
 30. Barry DT. Acoustic signals from frog skeletal muscle. *Biophys J* 1987; 769-73.
 31. Frangioni JV, Kwan-Gett TS, Dobrunz LE, McMahon TA. (1987). The mechanism of low-frequency sound production in muscle. *Biophys J* 1987; 51: 775-83.
 32. Orizio C. Muscle sound: bases for the introduction of a mechanomyographic signal in muscle studies. *Crit Rev Biomed Eng* 1993; 21: 201-43.
 33. Evetovich TK, Housh TJ, Stout JR, Johnson GO, Smith DB, Ebersole KT (1997). Mechanomyographic responses to concentric isokinetic muscle contractions. *Eur J Appl Occup Physiol* 1997; 75(2): 166-9.
 34. Guralnik JM, Simonsick EM, Ferrucci L, Glynn RJ, Berkman LF, Blazer DG et al. A short physical performance battery assessing lower extremity function: association with self-reported disability and prediction of mortality and nursing home admission. *J Gerontol* 1994; 49(2): 85-94.
 35. Brotherton SS, Williams HG, Gossard JL, Hussey JR, McClenaghan BA, Eleazer P. Are measures employed in the assessment of balance useful for detecting differences among groups that vary by age and disease state?. *J Geriatr Phys Ther* 2005; 28 (1); 14-9.
 36. Frisard MI, Fabre JM, Russell RD, King CM, DeLany JP, Wood RH et al. Physical activity level and physical functionality in nonagenarians compared to individuals aged 60-74 years. *J Gerontol A Biol Sci Med Sci* 2007; 62(7): 783-8.
 37. Clary S, Barnes C, Bemben D, Knehans A, Bemben M. Effects of ballates, step aerobics, and walking on balance in women aged 50-75 years. *J Sport Sci & Med* 2006; 5: 390-9.
 38. Genant HK, Engelke K, Fuerst T, Glüer CC, Grampp S, Harris ST, et al. Non invasive assessment of bone mineral and structure: state of the art. *J Bone Mineral Metab* 1996; 11:707–30.
 39. Valenčič V, Knez N. Measuring of skeletal muscle's dynamic properties. *Artif. Organs* 1997; 33(3): 240-2.
 40. Pišot R, Valenčič V, Šimunič B. Influence of biomechanical properties of particular skeletal muscles on child motor development. *Ann Ser Hist Nat* 2002; 12: 99-106.
 41. Dahmane R, Valenčič V, Knez N, Eržen I. Evaluation of the ability to make non-invasive estimation of muscle contractile properties on the basis of the muscle belly response. *Med Biol Eng Comput* 2000; 83: 51-5.
 42. Dahmane RG, Djordjevič S, Šimunič B, Valenčič V. Spatial fiber type distribution in normal human muscle histochemical and tensiomyographical evaluation. *J Biomech* 2005; 38(12): 2451-9.
 43. Dahmane R, Djordjevič S, Smerdu V. Adaptive potential of human biceps femoris muscle demonstrated by histochemical, immunohistochemical and mechanomyographical methods. *Med Bio Eng Comput* 2006; 44(11): 999-1006.
 44. Krížaj D, Šimunič B, Žagar T. Short-term repeatability of parameters extracted from radial displacement of muscle belly. *J Electromyogr Kinesiol* 2008 (v tisku).
 45. Hill AV. The pressure developed in muscle during contraction. *J Physiol* 1948; 107: 518-26.

46. Aratow M, Ballard RE, Crenshaw AG, Styf J, Watenpaugh DE, Kahan NJ, et al. Intramuscular pressure and electromyography as indexes of force during isokinetic exercise. *J Appl Physiol* 1993; 74: 2634–40.
47. Parker P, Körner L, Kadefors R. Estimation of muscle force from intramuscular total pressure. *Med Biol Eng Comput* 1984; 22: 453–7.
48. Delagi EF, Perotto A, Iazzetti J, Morrison D. The limbs. In: Charles C. Thomas (ed.) *Anatomic guide for the electromyographer*. Illinois, USA: Springfield, 1975: 61-9.
49. Toumi H, Poumarat G, Benjamin M, Best T, F'Guyer S, Fairclough et al. New insights into the function of the vastus medialis with clinical implications. *Med Sci Sports Exerc* 2007; 39(7): 1153-9.
50. Galtier B, Buillot M, Vanneville G. Anatomical basis of the role of vastus medialis muscle in femoro-patellar degenerative arthropathy. *Surgical and Radiologic Anatomy* 1995; 17(1): 7-11.
51. Mathias S, Nayak US, Isaacs B. Balance in elderly patients: the "get-up and go" test. *Arch Phys Med Rehabil* 1986; 67(6): 387-9.
52. Assessment of fracture risk and its application to screening for postmenopausal osteoporosis. Report of a WHO Study Group. Geneva, World Health Organization, 1994 (WHO Technical Report Series, No. 843). Pridobljeno 16.4.2008 s spletne strani: <http://www.who.int/bookorders/anglais/detart1.jsp?sesslan=1&codlan=1&codcol=10&codcch=843>.
53. Bischoff HA, Stahelin HB, Monsch AU, Iversen MD, Weyh A, von Dechend M, et al. Identifying a cut-off point for normal mobility: a comparison of the timed žup and go' test in community-dwelling and institutionalised elderly women. *Age Ageing* 2003; 32(3): 315-20.
54. Barry DT, Gordon KE, Hinton GG. Acoustic and surface EMG diagnosis of pediatric muscle disease. *Muscle Nerve* 1990; 13(4): 286-90.