

Matic Špenko¹, Nejka Potočnik²

Standardizirana kratkotrajna zmerna obremenitev kot orodje za določanje sposobnosti prilagajanja telesa na napor

Standardized Short-lasting Submaximal Exercise as a Tool to Determine the Physiological Response to Exercise

IZVLEČEK

KLJUČNE BESEDE: vegetativni živčni sistem, vzdržljivostna telesna aktivnost, variabilnost srčne frekvenca, okrevanje srčne frekvenca, kazalci telesne pripravljenosti, pretreniranost

IZHODIŠČA. V športu se za spremljanje učinkovitosti treninga uporabljajo srčna frekvenca, njena variabilnost ter hitrost vračanja k vrednosti v mirovanju, ni pa smernic, ki bi določale, kako najbolje spremljati fiziološki odziv na vadbo. Naša raziskava namerava opredeliti, ali je ponavljajoča standardizirana kratkotrajna zmerna telesna vadba dobro orodje za ugotavljanje najugodnejše fiziološke prilagoditve telesa na napor. **METODE.** Preiskovanci (N = 19) so zaporedoma en teden izvajali standardizirano kratkotrajno zmerno telesno vadbo, med prvo in drugo ponovitvijo so izvedli daljši tek kot model vzdržljivostne vadbe. Pred, med in po standardizirani kratkotrajni zmerni telesni vadbi smo spremljali srčno frekvenco, njeno variabilnost in hitrost vračanja k mirovni vrednosti, arterijski krvni tlak ter subjektivno oceno napora. **REZULTATI.** Ugotovili smo, da se fiziološki odziv na standardizirano kratkotrajno zmerno telesno vadbo statistično značilno spreminja s časom po vzdržljivostni vadbi v primerjavi s kontrolnim odzivom. Spremembe so bolj kot v mirovanju vidne v fazi okrevanja po standardizirani kratkotrajni zmerni telesni vadbi. Vzdržljivostna vadba sproži dvofazni odgovor srčne frekvenca po vadbi in hitrosti vračanja k vrednosti v mirovanju glede na kontrolno obremenitev. Takoj po vzdržljivostni vadbi nastopi faza neustreznega fiziološkega odziva na ponovno vadbo, ki se kaže z višjo srčno frekvenco, manjšo variabilnostjo srčne frekvenca in počasnejšim vračanjem srčne frekvenca k vrednosti v mirovanju. Nasprotno pa en dan po vzdržljivostni vadbi nastopi faza najugodnejše prilagoditve z nižjo srčno frekvenco, vendar le po ponavljajoči standardizirani kratkotrajni zmerni obremenitvi, ter hitrejšim vračanjem srčne frekvenca k vrednosti v mirovanju. **RAZPRAVA.** Zaključimo lahko, da je ponavljajoča standardizirana zmerna telesna vadba dobro orodje za opredelitev fiziološkega odziva na napor, najbolj občutljiva kazalca srčno-žilnega delovanja v povezavi z naporom pa sta srčna frekvenca in vračanje srčne frekvenca k vrednosti v mirovanju, saj odražata vpliv zgodovine vadbe. Uporaba našega modela bi lahko pripomogla k hitrejšemu odkrivanju simptomov pretreniranosti.

¹ Matic Špenko, dipl. fiziot., mag. kin., Inštitut za fiziologijo, Medicinska fakulteta, Univerza v Ljubljani, Zaloška cesta 4, 1000 Ljubljana; matic.spenko@gmail.com

² Doc. dr. Nejka Potočnik, univ. dipl. fiz., Inštitut za fiziologijo, Medicinska fakulteta, Univerza v Ljubljani, Zaloška cesta 4, 1000 Ljubljana

ABSTRACT

KEY WORDS: autonomic nervous system, endurance exercise, heart rate variability, heart rate recovery, indicators of aerobic fitness, overtraining

BACKGROUNDS. Heart rate, its variability and recovery after exercise are often used to trace training efficiency in sport, however, there are no guidelines for the optimal assessment of physiologic response to exercise. Therefore, our study aimed to determine the usefulness of repeated standardized short-lasting submaximal exercise as a tool to detect optimal physiologic response to repeated standardized short-lasting submaximal exercise. **METHODS.** The subjects (N = 19) performed repeated standardized short-lasting submaximal exercise subsequently five times in one week. Prolonged running was performed between the first and second repetition of standardized short-lasting submaximal exercise as a model of prolonged exertion to mimic an often used training schedule. Before and after repeated standardized short-lasting submaximal exercise, heart rate, its variability and its recovery after exercise, arterial blood pressure and the rate of perceived exertion were measured. **RESULTS.** A significant time effect was found regarding measured parameters with respect to prolonged exertion throughout the study. The effect of prolonged exertion on the physiologic response was augmented when measured in response to repeated standardized short-lasting submaximal exercise rather than at rest. A biphasic pattern in heart rate after repeated standardized short-lasting submaximal exercise and heart rate recovery was exhibited: autonomic dysfunction characterised by increased heart rate and decreased heart rate recovery on the same day yet parasympathetic rebound with decreased heart rate and increased heart rate recovery one day after prolonged exertion compared to baseline. **DISCUSSION.** In conclusion, repeated standardized short-lasting submaximal exercise is a convenient tool to trace physiological adaptations to exercise. The effect of training history on cardiovascular response is best reflected in the heart rate after exercise and in heart rate recovery. Our model could be potentially used to determine the early symptoms of overtraining in sport.

UVOD

Športniki in njihovi trenerji že dolgo vedo, da je za spremljanje učinkovitosti telesne vadbe pri športniku smiselno spremljati frekvenco srčnega utripa (FSU) in iz nje izpeljane parametre, kot sta denimo variabilnost srčne frekvence (angl. *heart rate variability*, HRV) in hitrost vračanja srčne frekvence k vrednostim v mirovanju po koncu napora (angl. *heart rate recovery*, HRR), ni pa še smernic, katere od vrednosti najbolj opisujejo fiziološko prilagoditev telesa na napor in v katerih fazah treninga oz. počitka jih je smiselno spremljati, da bodo te čim bolj povedne (1, 2). Vse bolj se namreč pojavljajo negativni učinki treninga, ki vodijo v pre-

treniranost, zlasti pri vrhunskih športnikih, vendar tudi pri rekreativnih športnikih (3, 4). Številnim bolnikom z oslABLJENIM srčno-žilnim sistemom se svetuje ukvarjanje s športom, a ni dovolj raziskano, kako spremljati, koliko aktivnosti je dovolj, lahko pa najdemo številne vzporednice med pretreniranostjo športnikov in odzivom srčno-žilnih bolnikov na pretirano telesno obremenitev. Tako se kaže potreba določiti parametre, ki se enostavno merijo in hkrati dobro odražajo sposobnost telesa, da se prilagodi stresu, ki ga predstavlja telesni napor. Analize HRV v povezavi s telesnim naporom ovrednotijo aktivnost vegetativnega živčnega sistema (VŽS) in posle-

dično služijo kot kazalec srčno-žilne prilagoditve.

Spremljanje aktivnosti VŽS pri športnikih nam poda vpogled v homeostatsko stanje telesa in neposredno predstavlja označevalec športnikovega okrevanja po vadbi in pripravljenosti na nov trening (1, 4). VŽS s svojim delovanjem uravnava notranje okolje in delovanje organov ter organskih sistemov in s tem prilagaja organizem na spreminjajoče se zunanje okolje (5–8). Telesna aktivnost je eden izmed stresnih dejavnikov, ki pomembno spremenijo delovanje VŽS (7, 9). Med stopnjevano aerobno vadbo pride do zavrtja parasimpatičnega živčnega sistema (PŽS) in aktivacije simpatičnega živčnega sistema (SŽS) z namenom priprave organizma na premagovanje telesnega napora (4, 10–14). V fazi okrevanja po telesni aktivnosti pride do zavrtja delovanja SŽS in reaktivacije PŽS, kar pripomore k povrnitvi fizioloških parametrov k vrednostim v mirovanju (6, 15).

Spremembe v aktivnosti VŽS po končani vadbi ne izzvenijo takoj, temveč postopoma, govorimo lahko o okrevanju VŽS po telesni aktivnosti (4, 13, 16). Fiziološke spremembe, ki so posledica spremenjenega delovanja VŽS in so opazne po aerobni telesni vadbi, so (7, 11, 12, 14, 17–20):

- povišana FSU v primerjavi z vrednostjo v mirovanju,
- dinamika zmanjševanja FSU po končani vadbi,
- spremenjena HRV,
- spremenjena občutljivost barorefleksa in
- znižan arterijski krvni tlak (AKT).

Večje spremembe v aktivaciji VŽS se pojavijo akutno, v fazi kratkoročnega okrevanja po aerobni vadbi, lahko pa izzvenijo šele čez nekaj dni, v fazi dolgoročnega okrevanja (4, 14, 17, 18, 20, 21). Okrevanje VŽS je pomembno povezano z intenzivnostjo in trajanjem telesne vadbe in tudi s kratkoročno zgodovino treningov. Večja intenzivnost telesne vadbe naj bi bila povezana s počas-

nejšim okrevanjem VŽS (1, 4, 20, 22, 23). Vpliv intenzivnosti vadbe na spremembe VŽS naj bi bil močnejši kot vpliv njene dolžine, vendar naj bi tudi dovolj dolga vadba (nad 20–30 minut) povzročila počasnejše okrevanje VŽS (24–27). Na hitrost okrevanja VŽS naj bi pomembno vplivala tudi vrsta telesne aktivnosti. Cunha, Midgley, Gonçalves in sodelavci so namreč v svoji raziskavi ugotovili pomembno počasnejše okrevanje FSU in HRV pri vadbah, ki vključujejo večjo mišično maso oz. pri katerih je poraba energije večja (28). Na hitrost obnove VŽS po vadbi pomembno vpliva tudi telesna pripravljenost posameznika. Številne raziskave so ugotovile hitrejšo obnovo VŽS po vadbi pri posameznikih, ki so bili telesno bolj pripravljeni (4, 17, 22, 29). Na aktivnost VŽS lahko vplivajo tudi starost, spol, zadosten vnos tekočine, dihanje (med vdihom se aktivnost PŽS zniža in med izdihom zviša) in položaj telesa (v ležečem položaju je aktivnost PŽS višja kot v navpičnih položajih – sede, stoje), psihološki stres, periferna in centralna utrujenost, temperatura okolja in drugi okoljski parametri (npr. zračna vlažnost, nadmorska višina, hipoksija, osvetljenost) (1, 4, 30–35).

Merjenje aktivnosti vegetativnega živčnega sistema

Aktivnost VŽS lahko ocenjujemo posredno in neinvazivno s spremljanjem časovnega spreminjanja fizioloških odzivov, ki so odraz njegovega delovanja (14, 15). Delovanje VŽS na srce ocenjujemo s FSU, HRR in HRV, delovanje na srčno-žilni sistem pa z AKT in občutljivostjo barorefleksa (7, 13, 14, 18, 29).

Prilagodljivost VŽS je njegova sposobnost, da na isti dražljaj v različnih pogojih drugače odzove. Tudi če so kazalci aktivnosti VŽS v mirovnem stanju enaki, je odziv na enak dražljaj lahko spremenjen. To nam nudi vpogled v spremembe delovanja VŽS, ki se pojavijo šele v odgovoru na dražljaj. Primer takega dražljaja je lahko standardizirana telesna vadba, pri kateri se prilagodljivost

VŽS kaže med samim naporom in v okrevanju po njem (6, 36).

Merjenje aktivnosti vegetativnega živčnega sistema z variabilnostjo srčne frekvence

Ena izmed najpogosteje uporabljenih neinvazivnih metod za spremljanje aktivnosti VŽS je merjenje HRV (1, 14, 37). HRV lahko analiziramo z linearnimi in nelinearnimi metodami, pri obojih z različnimi matematičnimi postopki analiziramo spreminjanje trajanja intervalov med sosednjima zobcema R na EKG-posnetku (RR) (37). Linearne metode HRV-analize vključujejo časovne in frekvenčne domene, pri čemer so opredelitve znotraj časovnih domen odraz velikosti spreminjanja RR, opredelitve znotraj frekvenčnih domen pa odraz hitrosti spreminjanja (1, 37). Eden izmed najpogosteje uporabljenih časovnih parametrov je kvadratni koren povprečnega kvadrata razlike med sosednjima zobcema R (angl. *root mean square of successive differences*, RMSSD). Znotraj frekvenčnih domen ločimo visokofrekvenčni del (angl. *high frequency*, HF) (0,15–0,40 Hz), ki naj bi bil kazalnik aktivnosti PŽS, nizkofrekvenčni del (angl. *low frequency*, LF) (0,04–0,15 Hz), na katerega naj bi poleg PŽS delno vplival tudi SŽS, in zelo nizkofrekvenčni del (angl. *very low frequency*, VLF) (0,01–0,04 Hz), ki naj bi bil delno povezan z aktiviranjem renin-angiotenzin-aldosteronskega sistema. Pogosto opazujemo tudi razmerje med LF in HF (LF/HF), ki odraža simpatično-vagalno ravnovesje (37). Ker je pri vzdržljivostnih športnikih aktivnost PŽS v mirovanju v primerjavi z nešportniki večja, imajo vzdržljivostni športniki v mirovanju višje vrednosti tistih kazalnikov HRV, ki odslkavajo aktivnost PŽS (vsi časovni kazalniki, HF) (1, 15). Višje vrednosti omenjenih kazalnikov HRV lahko tako odražajo tudi boljšo telesno pripravljenost posameznika (1). Skladno s spremembami VŽS se ob aerobni vadbi spremeni tudi HRV.

V primerjavi z vrednostmi v mirovanju med aerobno vadbo pride do enakomerne upada HRV (1, 4, 37). Upadejo vsi linearni kazalniki, ki odslkavajo aktivnost PŽS (vsi časovni kazalniki, HF) (1, 37).

Merjenje aktivnosti vegetativnega živčnega sistema z okrevanjem srčne frekvence

HRV je za oceno aktivnosti VŽS v svoji osnovni obliki uporabna le, kadar se srčna frekvenca ne spreminja preveč (15, 37). Aktivnost VŽS neposredno po telesni aktivnosti lahko tako ocenimo s HRR (1, 14). Takoj po koncu vadbe nastopi intenzivna reaktivacija PŽS, kar se izrazi v takojšnjem upadu FSU (15, 29). Največkrat merimo absolutno zmanjšanje FSU, tj. okrevanje srčne frekvence 30 sekund po končani vadbi (angl. *heart rate recovery in 30 seconds*, HRR30), okrevanje srčne frekvence v eni minuti po končani vadbi (angl. *heart rate recovery in 60 seconds*, HRR60) ali v dveh minutah po končani vadbi (15). Ker je HRR po koncu napora povezana z reaktivacijo PŽS, je HRR dobro merilo aktivnosti le-tega (15, 29, 38). HRR je večja, kadar je reaktivacija PŽS hitrejša (3). Raziskave ugotavljajo, da je HRR povezana tudi s fazo aktivacije PŽS v mirovanju. Kadar je ta višja, je HRR po telesni dejavnosti hitrejša (29).

Aktivnost vegetativnega živčnega sistema med okrevanjem

Tako obdobje okrevanja po vadbi imenujemo zgodnja faza okrevanja. Aktivnost SŽS se zmanjšuje bistveno počasneje od reaktivacije PŽS (1, 14). Ker se FSU v tem obdobju prehitro spreminja, je osnovna metoda HRV v tej zgodnji fazi okrevanja neuporabna, zato reaktivacijo PŽS v tej fazi okrevanja lahko ovrednotimo s HRR (1, 14). Ko se hiter padec FSU po vadbi umiri, govorimo o pozni fazi okrevanja, v kateri se FSU s časom ne spreminja več tako hitro, temveč se ustali na višji FSU kot pred vadbo; tedaj je HRV dobro merilo aktivnosti VŽS

(15, 29). Za pozno fazo okrevanja je značilno, da niti zaviranje delovanja SŽS niti reaktivacija PŽS še nista zaključena, njeno trajanje pa je odvisno od načina vadbe, njenega trajanja, intenzitete in stopnje telesne pripravljenosti vadečega, pa tudi od kratkoročne vadbene zgodovine. To je še posebej pomembno pri elitnih športnikih, pri katerih običajno nov trening sledi, še preden je okrevanje po predhodnem treningu zaključeno. Glede intenzitete vadbe velja, da je za popolno obnovo VŽS po aerobni vadbi potrebnih do 24 ur, če gre za nizke intenzivnosti ($< 70\% V_{O_{2max}}$), 24–48 ur po vadbi zmerne intenzivnosti ($70\text{--}82\% V_{O_{2max}}$) in vsaj 48 ur po vadbi visoke intenzivnosti ($> 82\% V_{O_{2max}}$) (4).

Reaktivacija PŽS in zmanjšanje aktivacije SŽS po vadbi se odražata tudi v spremembah krvnega tlaka. Krvni tlak naj bi neposredno po koncu vzdržljivostne vadbe padel pod vrednosti v mirovanju, saj zaradi zavrtja SŽS po vadbi nastopi intenzivna dilatacija krvnih žil, ki so bile zaradi potrebe po razporeditvi krvnega pretoka med vadbo zožene (16, 39–42).

Telesna aktivnost v fazi okrevanja po intenzivni vzdržljivostni vadbi

Izčrpavajoča, dolgotrajna vzdržljivostna vadba lahko pomembno vpliva na aktivnost VŽS tudi še več dni po končani vadbi (4). Če začnemo novo telesno aktivnost pred koncem okrevanja po predhodni telesni aktivnosti, pričakujemo, da se bo telo nanjo odzvalo drugače, kot to velja tudi v splošni teoriji stresa (36). Spremenjen odziv na ponovne telesne obremenitve bi lahko pomenil slabšo zmogljivost med telesno aktivnostjo, ki jo opravljamo v stanju nepopolnega okrevanja VŽS. Prav to je značilno tudi za pretreniranost, ki se kaže v zmanjšani odzivnosti VŽS na vadbo, tako da je stopnja prilagajanja telesa večjim potrebam po energiji zmanjšana ter faza okrevanja podaljšana (15).

Že več raziskav je ugotavljalo vpliv daljše, večurne vzdržljivostne vadbe na spremembo VŽS in s svojimi ugotovitvami ocenilo čas, ki je potreben za okrevanje oz. povrnitev VŽS na vrednosti, značilne za mirovanje. Primanjkuje raziskav, ki bi ovrednotile sposobnost ponovne aktivacije VŽS v fazi okrevanja po predhodni vzdržljivostni vadbi. Ni še raziskano, kako spremenjena aktivnost VŽS pred začetkom vadbe vpliva na njen potek in na okrevanje po njej.

Razumevanje odziva telesa na kratkotrajno zmerno telesno vadbo po daljši, izčrpavajoči aerobni vadbi bi imelo pomembno vlogo pri načrtovanju pogostosti, trajanja in intenzivnosti treningov pri športnikih in bi nam lahko podalo vpogled v to, kako pogosto je smiselno izvajati telesno aktivnost, da športnika ne vodimo v pretreniranost oz. da rekreativni športniki zaradi pogostosti vadbe niso izpostavljeni večji verjetnosti za pojav neljubega srčno-žilnega dogodka med vadbo.

Naša raziskava namerava opredeliti, ali je ponavljajoča standardizirana kratkotrajna zmerna telesna vadba (ZTV) dobro orodje za ugotavljanje najugodnejše fiziološke prilagoditve telesa na napor. Spremljali smo spremembe v fiziološkem odzivu telesa na ZTV pred in v fazi poznega okrevanja po izčrpavajoči vzdržljivostni telesni vadbi (VTV), teku na 21 km pri rekreativnih tekačih. Spremenjen fiziološki odziv smo spremljali en teden po VTV, in sicer isti dan ter prvi, drugi in sedmi dan po VTV. Merili smo FSU, njeno variabilnost ter AKT pred in po kratkotrajni zmerni telesni vadbi na sobnem kolesu ter HRR. Zapisovali smo tudi subjektivne ocene stopnje telesne obremenitve. Z raziskavo smo želeli ugotoviti, če je ponavljanje standardiziranega zmerne kolesarjenja dobro orodje za spremljanje dnevnih sprememb v fiziološkem odzivu na napor, ki so posledica spremenjene aktivnosti VŽS zaradi predhodne vadbene zgodovine, ter potrditi, da ponavljanje takih zmernih

obremenitev odraža sposobnost ponovne aktivacije VŽS na srce in žile.

METODE

Protokol raziskave je odobrila Komisija Republike Slovenije za medicinsko etiko (št. 0120-126/2021/10). Vse meritve in testiranja so potekali v Laboratoriju za obremenitveno testiranje Inštituta za fiziologijo Medicinske fakultete Univerze v Ljubljani. V raziskavo smo vključili 19 prostovoljcev. Vzorec populacije so predstavljali zdravi, polnoletni posamezniki, ki se rekreativno ukvarjajo s tekom ali drugo obliko aerobne rekreativne dejavnosti.

Merilni postopki in namestitvev merilnih senzorjev

V raziskavi smo uporabljali standardne, neinvazivne postopke za merjenje FSU in AKT. Preiskovanci so ZTV opravljali na sobnem kolesu Ergoselect 100 (Ergoline, Nemčija) po predhodno izbranem protokolu stopnjevanje telesne vadbe, kriterij za doseženo submaksimalno stopnjo telesnega nabora je bila FSU. Vadba na kolesu je bila zaključena, ko je preiskovanec dosegel 85 % svoje pričakovane maksimalne FSU (FSU_{max}), ki smo jo izračunali po naslednji enačbi (29):

$$FSU_{max} = 205,8 - (0,685 \times starost) \quad (1).$$

AKT in EKG v II. standardnem ekstremitetnem odvodu smo merili z napravo Finapres Finometer model 2 (Amsterdam, Nizozemska) s frekvenco vzorčenja 500 Hz. AKT smo neprekinjeno merili s pomočjo prstne manšete na kazalcu desne roke. Analizo smo opravili s pomočjo programskih paketov WinDataQ (DATAQ Instruments Inc., Ohio, ZDA) in Nevrokard (Izola, Slovenija).

Potek raziskave

Vse meritve so se izvajale v Laboratoriju za obremenitveno testiranje Inštituta za fiziologijo Medicinske fakultete Univerze

v Ljubljani. Pred pričetkom raziskave so bili preiskovanci v pisni in ustni obliki seznanjeni s potekom in namenom raziskave.

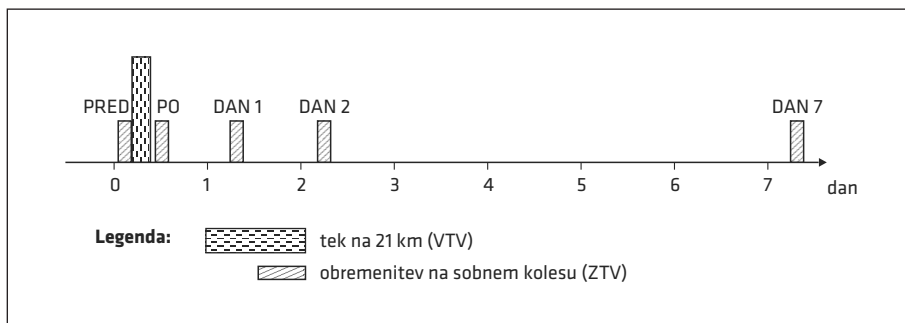
Na podlagi ocene FSU_{max} smo določili preiskovančevu ciljno FSU, pri kateri smo končali ZTV. Preiskovance smo prosili, da tri dni pred vstopom v raziskavo in vse do zadnje meritve ne izvajajo dodatnih telesnih dejavnosti. Prav tako smo jih prosili, da vsaj tri ure pred meritvami ne uživajo kave, pravega čaja in alkohola in ne kadijo.

Preiskovanci so laboratorij obiskali štirikrat v enem tednu. Osnovni protokol raziskave je predstavljen na sliki 1 in sliki 2. Med 30-minutnim umirjanjem pred začetkom meritve smo preiskovancem namestili vse potrebne merilne senzorje. Na dan prvega obiska laboratorija smo opravili prvo ZTV (PRED), ki ji je sledila VTV, to je bilo 21 km teka po začrtani ravninski trasi. Pol ure po koncu VTV smo izvedli še eno ZTV (PO) (slika 1). Meritev PRED predstavlja kontrolno meritev. ZTV smo v nadaljevanju ponavljali še en dan (DAN 1), dva dni (DAN 2) in sedem dni (DAN 7) po teku na 21 km, vselej ob istem času, kot je bila izvedena meritev PO (slika 1).

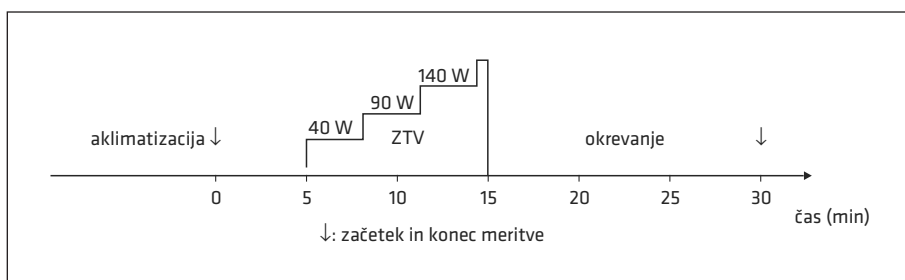
Kot model ZTV smo uporabili zmerno kratkotrajno obremenitev na sobnem kolesu: začetna obremenitev 40 W se je nato vsake tri minute zviševala za 50 W (slika 2). Ko je preiskovanec dosegel svojo ciljno FSU, smo vadbo prekinili, preiskovanec pa je miroval na sobnem kolesu še 15 minut za spremljanje hitre in pozne faze okrevanja po ZTV. Vrednosti fizioloških parametrov smo spremljali pred, med in 15 minut po ZTV. Vse zaporedne meritve ZTV (PRED, PO, DAN 1, DAN 2 in DAN 7) so potekale enako. Po koncu meritve je preiskovanec subjektivno ocenil občuten napor med ZTV s pomočjo Borgove lestvice.

Obdelava podatkov

FSU, njeno variabilnost in AKT smo analizirali v dveh obdobjih: v fazi mirovanja in v fazi okrevanja po ZTV. Kot predstavitevni



Slika 1. Časovna shema telesnih obremenitev. PRED – pred 21 km teka, PO – takoj po 21 km teka, DAN 1 – en dan po 21 km teka, DAN 2 – dva dni po 21 km teka, DAN 7 – sedem dni po 21 km teka, VTV – vzdržljivostna telesna vadba, ZTV – zmerna telesna vadba.



Slika 2. Standardizirana zmerna telesna vadba na sobnem kolesu. ZTV – zmerna telesna vadba.

vzorec smo izbrali časovni interval zadnjih treh minut mirovanja pred ZTV ter zadnjih treh minut meritve, tj. od 12. do 15. minute po koncu napora. V zgoraj opredeljenih časovnih intervalih smo določili povprečne vrednosti FSU in AKT ter časovne (RMSSD) in frekvenčne (HF, LF/HF) parametre HRV. Frekvenčne parametre HRV smo določali z avtoregresijsko metodo. Poleg omenjenih dveh merilnih intervalov smo analizirali še padanje srčne frekvence takoj po koncu napora (HRR30 in HRR60) ter zbrali podatke o subjektivni oceni napora po Borgovi lestvici. Zabeležili smo tudi najvišje doseženo obremenitev med ZTV.

Za urejanje podatkov smo uporabili program MS Excel (različica 2019), za statistično obdelavo podatkov pa računalniški program IMB SPSS v22 (IMB, New York, ZDA). Izvedli smo statistično primerjavo

med posameznimi meritvami, pri čemer smo med seboj primerjali rezultate meritve, zajete v mirovanju pred ZTV, in rezultate meritve, zajete v okrevanju po ZTV. Preverili smo normalnost porazdelitve pridobljenih podatkov (Shapiro-Wilkov test) ter za prvo raven analize uporabili enosmerno analizo variance (angl. *analysis of variance*, ANOVA) za ponovljene meritve. V primeru statističnih značilnosti smo izvedli *post hoc* parne, dvorepe t-teste z Bonferronijevim popravkom in primerjali vrednost s kontrolnimi vrednostmi. Rezultati so predstavljeni kot povprečne vrednosti s pripadajočimi standardnimi odkloni (angl. *standard deviations*, SD) (povprečna vrednost SD) ter grafično prikazani kot povprečje s standardno napako povprečja. Prag statistične značilnosti za vse analize smo postavili na vrednost $\alpha = 0,05$.

REZULTATI

V raziskavi je sodelovalo 19 rekreativnih tekačev (13 moških, 6 žensk). Povprečno starost preiskovancev, njihove antropometrične značilnosti in športne oz. tekaške navade prikazujeta tabeli 1 in 2.

Vsi spremljani fiziološki dejavniki kažejo časovno spreminjanje glede na VTV. Večina jih je spremenjenih le glede na izvajanje ZTV takoj po VTV, FSU v pozni fazi okrevanja, HRR30 in HRR60 po ZTV pa kažejo statistično značilno dvofazno kinetiko glede na kontrolne vrednosti.

Vrednosti spremljanih fizioloških parametrov pred in po ZTV ter subjektivna ocena težavnosti ob koncu ZTV so s povprečnimi vrednostmi, pripadajočimi SD ter rezultati statistične analize predstavljeni v tabeli 3. Rezultati, pri katerih smo na drugi ravni analize s *post hoc* t-testi ugotovili statistično značilno razliko glede na kontrolne vrednosti, so v tabeli 3 označeni z nadpisano črko a (^a).

FSU v fazi poznega okrevanja po ZTV je bila statistično značilno višja glede na vrednosti pred ZTV v vseh merilnih točkah (PRED, PO, DAN 1, DAN 2 in DAN 7). Takoj po VTV je bila FSU statistično zna-

čilno višja glede na kontrolne vrednosti tako v mirovanju pred kot v poznem okrevanju po ZTV. Prvi in drugi dan po VTV se FSU v mirovanju ni statistično značilno razlikovala od kontrolnih vrednosti, je pa bila statistično značilno nižja v poznem okrevanju po koncu ZTV. Sedmi dan ni bilo sprememb FSU niti pred niti po ZTV glede na kontrolne vrednosti. Značilen dvofazni odgovor v odzivu FSU po ZTV, ne pa pred ZTV, prikazuje slika 3, kjer so zapisane tudi posamezne p-vrednosti.

Tako HRR30 kot HRR60 kažeta dvofazni časovni odgovor po VTV glede na kontrolne vrednosti in sta prikazana na sliki 4: statistično značilno zmanjšanje takoj po VTV ter statistično značilno zvečanje en dan po VTV.

Glede HRV v časovni domeni smo izmerili statistično značilno zmanjšanje RMSSD tako v mirovanju kot v poznem okrevanju le takoj po VTV glede na kontrolne vrednosti. Sedmi dan po VTV je bil RMSSD v mirovanju statistično značilno znižan glede na meritve pred VTV. Kazalniki HRV v frekvenčni domeni (HF in LF/HF) v pozni fazi okrevanja niso bili statistično značilno različni

Tabela 1. Osnovne značilnosti vključenih preiskovancev. SD – standardni odklon (angl. *standard deviation*), ITM – indeks telesne mase.

Spol	Št. oseb	Starost (leta (SD))	Telesna masa (kg (SD))	Višina (cm (SD))	ITM (kg/m ² (SD))
Moški	13	42,1 (15,2)	78,8 (14,5)	181,8 (8,0)	23,7 (2,9)
Ženske	6	36,8 (14,8)	59,4 (5,5)	165,8 (6,5)	21,6 (1,3)
Skupaj	19	40,4 (15,2)	72,7 (15,3)	176,8 (10,6)	23,0 (2,7)

Tabela 2. Športne in tekaške navade vključenih preiskovancev ter čas teka na 21 km. SD – standardni odklon (angl. *standard deviation*).

Spol	Telesna aktivnost na teden (št. dni (SD))	Tekaški treningi na teden (št. dni (SD))	Povprečna pretečena razdalja na posameznem treningu (km (SD))	Največja do sedaj pretečena razdalja (km (SD))	Čas teka na 21 km (min (SD))
Moški	4,1 (1,7)	2,5 (1,4)	11,0 (4,2)	33,8 (12,3)	122,2 (19,7)
Ženske	4,7 (0,9)	2,7 (0,5)	11,7 (2,6)	44,5 (19,1)	136,2 (11,1)
Skupaj	4,3 (1,6)	2,5 (1,2)	11,2 (3,8)	37,2 (15,6)	126,6 (19,1)

v nobeni merilni točki glede na kontrolne vrednosti. Časovno spreminjanje odražajo le vrednosti v mirovanju pred ZTV, in sicer je bil HF takoj po VTV statistično značilno manjši, LF/HF pa statistično značilno večji glede na kontrolne vrednosti.

Srednji arterijski tlak (SAT) po ZTV ni bil statistično značilno različen od SAT pred

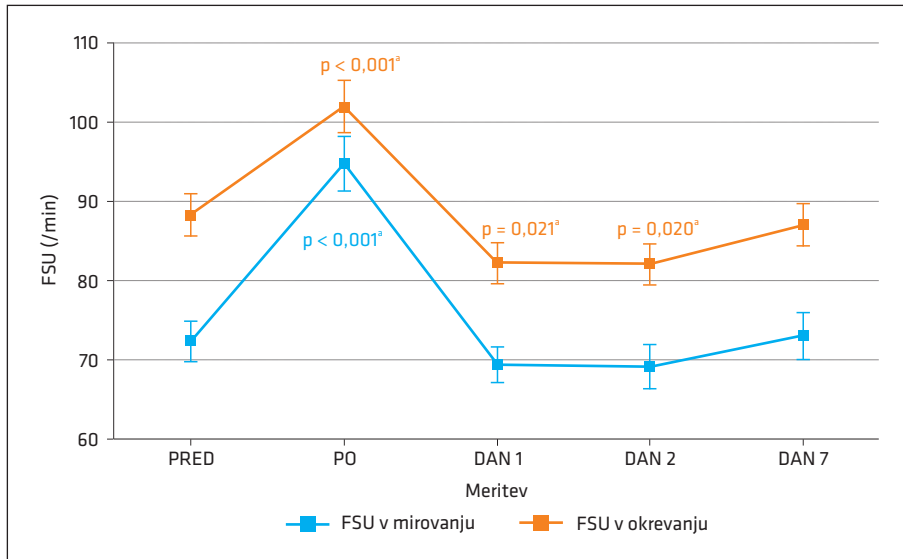
ZTV v nobeni merilni točki. V primerjavi s kontrolnimi vrednostmi je bil SAT pred ZTV statistično značilno nižji v vseh meritvah, po ZTV pa samo takoj po VTV (slika 5).

Preiskovanci so napor pri ZTV ocenili kot statistično značilno večji glede na kontrolne vrednosti le takoj po VTV, ko je bila tudi njihova dosežena obremenitev najmanjša.

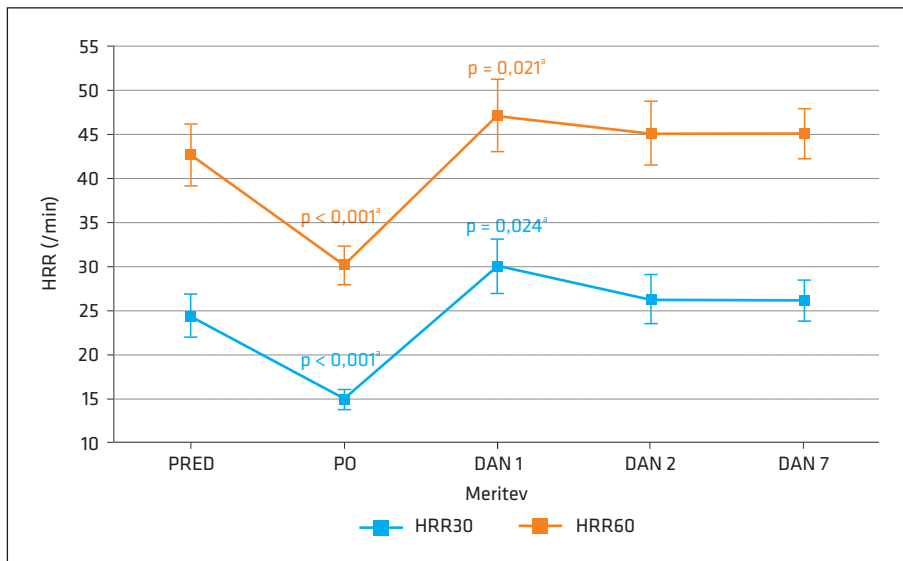
Tabela 3. Vrednosti merjenih parametrov srčne akcije pred in po vadbi na sobnem kolesu, ki je bila izvedena pred in štirikrat po vzdržljivostni telesni vadbi (VTV) z analizo razlik. PRED – pred vzdržljivostno telesno vadbo, PO – takoj po vzdržljivostni telesni vadbi, DAN 1 – en dan po vzdržljivostni telesni vadbi, DAN 2 – dva dni po vzdržljivostni telesni vadbi, DAN 7 – sedem dni po vzdržljivostni telesni vadbi, F – F-vrednost testa analize variance za ponovljive meritve, FSU – frekvenca srčnega utripa, HRR30 – okrevanje srčne frekvence v prvih 30 sekundah po končani vadbi (angl. *heart rate recovery in 30 seconds*), HRR60 – okrevanje srčne frekvence v prvih 60 sekundah po končani vadbi (angl. *heart rate recovery in 60 seconds*), RMSSD – kvadratni koren povprečnega kvadrata razlike med sosednjima zorcema R (angl. *root mean square of successive differences*), HF – visokofrekvenčni del močnostnega spektra variabilnosti intervalov RR v frekvenčni domeni (angl. *high frequency*), NU – normalizirana enota (angl. *normalized unit*), LF/HF – razmerje med nizko- in visokofrekvenčnim delom močnostnega spektra variabilnosti intervalov RR v frekvenčni domeni (angl. *low frequency/high frequency*), SAT – srednji arterijski tlak, ZTV – zmerna telesna vadba.

	PRED	PO	DAN 1	DAN 2	DAN 7	F	p-vrednost
FSU v mirovanju (/min (SD))	73,5 (12,9)	94,8 (14,9) ^a	69,5 (9,8)	69,2 (12,3)	73,1 (12,7)	60,3	< 0,001
FSU v okrevanju (/min (SD))	88,4 (11,6)	102,1 (14,3) ^a	82,3 (11,2) ^a	82,2 (11,4) ^a	87,1 (11,9)	45,6	< 0,001
HRR30 (/min (SD))	24,4 (10,8)	14,9 (4,9) ^a	30,1 (13,3) ^a	26,4 (12,1)	26,2 (10,1)	16,2	< 0,001
HRR60 (/min (SD))	42,7 (15,3)	30,2 (9,7) ^a	47,3 (17,9) ^a	45,2 (15,7)	45,2 (12,5)	19,6	< 0,001
RMSSD v mirovanju (ms (SD))	32,2 (17,7)	15,5 (12,3) ^a	33,0 (22,4)	35,1 (20,1)	26,4 (14,8)	11,6	< 0,001
RMSSD v okrevanju (ms (SD))	16,3 (9,5)	8,6 (5,2) ^a	21,1 (13,3)	20,3 (11,0)	14,4 (7,2)	10,1	< 0,001
HF v mirovanju (NU (SD))	37,5 (18,9)	23,9 (16,2) ^a	42,6 (20,7)	45,3 (23,6)	40,8 (21,2)	7,3	< 0,001
HF v okrevanju (NU (SD))	24,6 (14,9)	21,6 (13,7)	26,7 (19,5)	32,1 (20,4)	31,3 (20,5)	2,4	0,061
LF/HF v mirovanju	3,3	7,1 ^a	3,1	2,5	3,6	13,1	0,011
LF/HF v okrevanju	7,6	10,6	6,8	4,0	6,2	9,1	0,058
SAT v mirovanju (mmHg (SD))	100,9 (11,9)	91,0 (9,4) ^a	93,8 (10,9)	93,7 (7,8)	92,9 (11,8)	3,1	0,021
SAT v okrevanju (mmHg (SD))	99,3 (11,3)	88,9 (11,2) ^a	95,2 (14,2)	97,9 (10,9)	96,5 (14,5)	2,8	0,030
Ocena napora ob koncu ZTV po Borgovi lestvici (SD)	13,16 (2,4)	14,4 (3,0) ^a	14,2 (3,0)	13,0 (3,0)	12,7 (2,6)	7,0	< 0,001

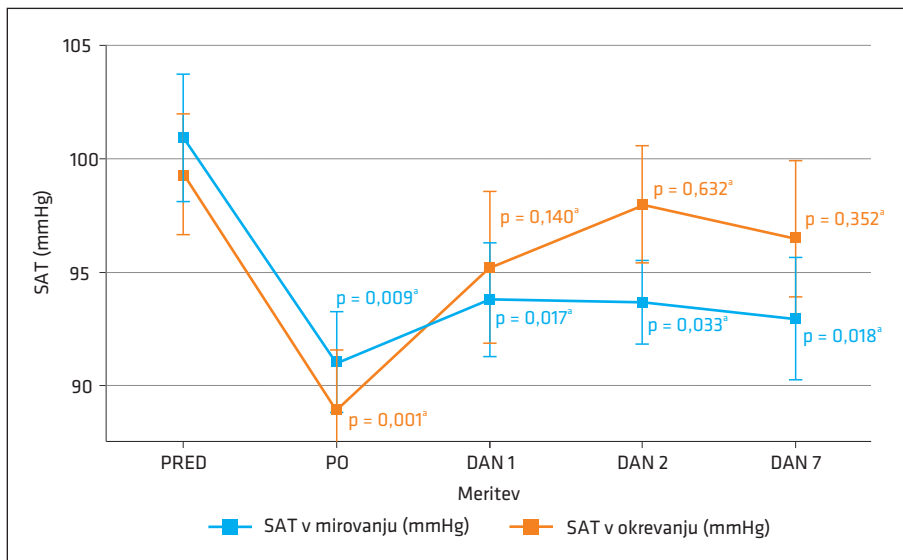
^a – p < 0,05; pri primerjavi meritve po VTV (21 km teka) (PO, DAN 1, DAN 2, DAN 7) s kontrolno meritvijo (PRED).



Slika 3. Spreminjanje frekvence srčnega utripa (FSU) v mirovanju in v okrevanju po zmerni telesni vadbi (ZTV). FSU – frekvenca srčnega utripa, PRED – pred vzdržljivostno telesno vadbo, PO – takoj po vzdržljivostni telesni vadbi, DAN 1 – en dan po vzdržljivostni telesni vadbi, DAN 2 – dva dni po vzdržljivostni telesni vadbi, DAN 7 – sedem dni po vzdržljivostni telesni vadbi. ^a – statistično značilna razlika ($p < 0,05$) glede na kontrolno meritev (PRED).



Slika 4. Časovni potek hitrosti vračanja srčne frekvence k vrednostim v mirovanju po koncu napora (angl. *heart rate recovery*, HRR) 30 in 60 sekund po zmerni telesni vadbi (ZTV) na sobnem kolesu. HRR – hitrost vračanja srčne frekvence k vrednostim v mirovanju po koncu napora (angl. *heart rate recovery*), HRR30 – okrevanje srčne frekvence 30 sekund po končani vadbi (angl. *heart rate recovery in 30 seconds*), HRR60 – okrevanje srčne frekvence 60 sekund po končani vadbi (angl. *heart rate recovery in 60 seconds*), PRED – pred vzdržljivostno telesno vadbo, PO – takoj po vzdržljivostni telesni vadbi, DAN 1 – en dan po vzdržljivostni telesni vadbi, DAN 2 – dva dni po vzdržljivostni telesni vadbi, DAN 7 – sedem dni po vzdržljivostni telesni vadbi. ^a – statistično značilna razlika ($p < 0,05$) glede na kontrolno meritev (PRED).



Slika 5. Časovno spreminjanje srednjega arterijskega tlaka (SAT) v mirovanju in v okrevanju po zmerni telesni vadbi (ZTV) na sobnem kolesu. SAT – srednji arterijski tlak, PRED – pred vzdržljivostno telesno vadbo, PO – takoj po vzdržljivostni telesni vadbi, DAN 1 – en dan po vzdržljivostni telesni vadbi, DAN 2 – dva dni po vzdržljivostni telesni vadbi, DAN 7 – sedem dni po vzdržljivostni telesni vadbi. ^a – statistično značilna razlika ($p < 0,05$) glede na kontrolno meritev (PRED).

RAZPRAVA

S to raziskavo smo želeli ugotoviti učinek VTV (21 km teka) na aktivnost in odzivnost VŽS, ocenjeno s fiziološkim odzivom na standardizirano kratkotrajno ZTV. Dokazali smo pomemben vpliv VTV na okrevanje po standardizirani zmerni aerobni telesni vadbi. Fiziološki odziv telesa na ZTV je bil v vseh parametrih drugačen takoj po VTV, viden pa je bil tudi prvi in drugi dan po VTV, a ne v mirovanju, temveč samo po končanem ZTV in le v HRR30, HRR60 ter FSU v poznem okrevanju po ZTV.

V tem kontekstu lahko glede na izsledke naše raziskave sklenemo:

- da je v proces rednega treniranja smiselno vpeljati izvajanje standardiziranih kratkotrajnih zmernih vadb, saj sta FSU in HRR po taki vadbi jasen kazalec sposobnosti prilagajanja telesa na napor, pogojena s trenutnim stanjem avtonomnega živčnega sistema,

- da je spremljanje FSU, HRV in HRR med telesno vadbo smiselno,
- da je ocenjevanje HRV v časovni domeni bolj povedno kot spremljanje v frekvenčni domeni, saj je HRV v frekvenčni domeni neobčutljiv na zgodovino treningov,
- da je FSU v okrevanju po zmerni kratkotrajni vadbi bolj povedna kot FSU v mirovanju, saj je vpliv zgodovine treningov povezan s srčno frekvenco po taki vadbi,
- znižana FSU v okrevanju po ZTV lahko nakazuje tudi možnost parasimpatičnega pretreniranja,
- da stanje znižane FSU v okrevanju po ZTV brez povečanja HRV pomeni varno treniranje, ne moremo pa potrditi, da tako treniranje vodi v izboljšanje telesne pripravljenosti.

Zgornje ugotovitve so podkrepljene z ustreznimi spremembami v aktivaciji avtonomnega živčnega sistema:

- Učinek reaktivacije PŽS na srce, ki se odraža v HRR, kaže dvofazno časovno kinetiko po VTV, saj je takoj po njej statistično značilno zmanjšana, dan za tem pa statistično značilno povečana glede na vrednost pred tekom.
- Okrevanje VŽS po zmerni telesni vadbi je odvisno tudi od zgodovine predhodnih telesnih aktivnosti.
- Vrednosti HRR in FSU po zmerni telesni aktivnosti so boljši kazalec aktivnosti VŽS na srcu kot vrednosti v mirovanju, saj odražajo tudi zgodovino predhodne telesne aktivnosti.
- VTV zniža SAT v mirovanju, SAT po ZTV pa le, če je ZTV izvedena takoj po VTV.

Takoj po VTV nastopi faza neustreznega odziva na ZTV, povezanega z zmanjšano aktivnostjo PŽS na srce, ki se kaže z višjo FSU ter manjšo HRV in HRR. Nasprotno pa en dan po VTV nastopi faza najugodnejše prilagoditve s povečano aktivnostjo PŽS: nižjo FSU (vendar le po ZTV) ter hitrejšo HRR. VTV vpliva na najvišjo doseženo obremenitev med zmernim telesnim naporom ter subjektivni občutek napora, a le, kadar ZTV izvedemo takoj po teku, kar potrjuje, da takoj po vzdržljivostni obremenitvi sledi faza nepravilnega delovanja avtonomnega živčnega sistema.

Kar nekaj raziskav doslej je raziskovalo vpliv VTV na FSU do enega tedna po vadbi, vendar so njihove ugotovitve zelo različne. Slednje lahko utemeljujemo s tem, da izbrani tip VTV, njena intenzivnost, trajanje in način izvedbe vadbe ter tudi treniranost preiskovancev, starost in spol pomembno vplivajo na okrevanje (1, 26, 27). Naša raziskava je prva, ki opredeljuje vpliv predhodne kratkoročne zgodovine telesnih aktivnosti na okrevanje po vadbi, saj se v praksi mnogokrat zgodi, da smo ponovno telesno aktivni, še preden je končan proces okrevanja po predhodni vadbi, zlasti če je ta dolgotrajna in izčrpavajoča.

V naši raziskavi izmerjena statistično značilno višja FSU v mirovanju pol ure po VTV je skladna z rezultati raziskav Paecha in sodelavcev ter Hautala in sodelavcev, ki so prav tako izmerili statistično značilno višjo FSU neposredno po vzdržljivostni vadbi (17, 43). Rezultati naše raziskave kažejo, da že prvi dan po VTV FSU ni več povišana glede na kontrolno vrednost, kar je prav tako v skladu z raziskavo Hautala in sodelavcev, ki ugotavlja, da se prvi dan po izvedeni vzdržljivostni vadbi FSU povrne k vrednosti v mirovanju (17). Na drugi strani so naše ugotovitve v nasprotju z ugotovitvami raziskave Zazackerleya in sodelavcev, ki kažejo statistično značilno višjo FSU še en dan po izvedeni vzdržljivostni vadbi, vendar je bil v njihovi raziskavi kot model vzdržljivostne vadbe uporabljen tek na 64 km, ki je v primerjavi s tekom na 21 km dolgotrajnejši in bolj izčrpavajoč, kar pomembno vpliva na čas, potreben za popolno obnovo VŽS, ki ima neposreden vpliv na FSU (1, 26, 27, 44).

Posebno zanimiv rezultat naše raziskave je statistično značilno nižja FSU v pozni fazi okrevanja po zmerni vadbi prvi in drugi dan po VTV v primerjavi s kontrolno meritvijo (slika 3). Omenjeni rezultati nakazujejo na pojav superkompensacije s povečano aktivnostjo PŽS en do dva dni po VTV, ki pa se izrazi le, če je VŽS ponovno aktiviran z zmerno telesno aktivnostjo. To je izviren rezultat naše raziskave, zato tu primerjave z literaturo nimamo. Povrnitev FSU k vrednostim v mirovanju po ZTV je posledica zavrtja aktivnosti SŽS in/ali reaktivacije PŽS ter s tem povezanih učinkov na srčno akcijo. Spremembe HRR in parametrov HRV kot kazalcev aktivacije avtonomnega živčnega sistema, ki smo jih hkrati merili v naši raziskavi, teh sprememb v FSU ne potrjujejo enolično. Z rezultati HRR lahko utemeljimo padec FSU po ZTV en dan po VTV, saj sta tako HRR30 kot tudi HRR60 statistično značilno večja glede na kontrolne vrednosti, medtem ko z rezul-

tati HRV padca FSU po ZTV en dan po VTV ne moremo utemeljiti, saj v fazi okrevanja po ZTV en in dva dni po VTV statistično značilnih sprememb ni.

Ta pojav bi lahko pojasnili z baroreceptorskim refleksom: kadar AKT pade, se FSU poveča (6, 45). Ker SAT en dan po ZTV in dva dni po VTV ne pade pod vrednost pred ZTV, kar bi bil sicer normalen odziv SAT na aerobno vadbo, to ne aktivira baroreceptorjev in posledično ne zvišuje FSU. Omenjene spremembe bi lahko označili tudi kot parasimpatično pretreniranost, ki se v našem primeru izrazi kot povečana aktivnost PŽS v okrevanju po ZTV.

HRR je tesno povezan z reaktivacijo PŽS po koncu vadbe in je v povezavi s stopnjo aktivacije PŽS v mirovanju (3, 15, 29). Dvofazna kinetika HRR tako 30 kot tudi 60 sekund po koncu napora kaže na to, da je reaktivacija PŽS po zmerni vadbi neposredno po VTV počasnejša, prvi dan po VTV pa hitrejša kot pred VTV, kar potrjuje vpliv zgodovine predhodnih telesnih obremenitev na potek okrevanja PŽS. Sklepamo lahko, da takoj po vzdržljivostni vadbi nastopi nepravilen vpliv VŽS na srce, en dan po njej pa pride do hiperaktivacije, preobrata v aktivnosti PŽS.

Takoj po končani VTV se zmanjšana aktivnost PŽS na srce kaže tudi z zvišano FSU ter zmanjšano vrednostjo RMSSD in HF v mirovanju, kar je v skladu s tem, da HRR odraža učinek aktivacije PŽS na srce v mirovanju. Zmanjšana HRR je eden od glavnih napovednih dejavnikov za nastanek neljubega srčno-žilnega dogodka, zato fazo takoj po končani vzdržljivostni vadbi lahko imenujemo tudi ranljivo obdobje. Izvajanje zmernih telesnih aktivnosti v tem obdobju bi lahko pomenilo večje tveganje za omenjene dogodke. Svetujemo lahko, da se je smiselno izogibati telesni aktivnosti v tem ranljivem obdobju, če pa je zaradi narave treningov ali tekem nujna, je smiselno uporabljati metode za hitrejšo okrevanje, kot so npr. masaže, ohlajevanje in električna stimulacija.

To pa ne velja za prvi dan po VTV, saj je HRR povečan, kazalci aktivacije PŽS na srce v mirovanju (FSU, RMSSD in HF) pa niso statistično značilno spremenjeni. To bi lahko pomenilo, da se vpliv vzdržljivostne vadbe na delovanje PŽS na srce en dan po njej ne kaže več v mirovanju, pač pa le ob ponovni aktivaciji VŽS z zmerno vadbo. Hiperaktivacijo PŽS po vzdržljivostni vadbi opisujejo tudi drugi avtorji: Hautala in sodelavci so v svoji raziskavi dva dni po 75 km teka na smučeh nakazali povečano delovanje PŽS in to imenovali povratni učinek (angl. *rebound effect*) (17). Isti avtorji ugotavljajo, da zmerna vadba v tem obdobju po vzdržljivostni vadbi povzroči koristne spremembe srčno-žilnega sistema. Podobno se je morda zgodilo v našem primeru, le da smo zaradi krajše in manj intenzivne vadbe (tek na 21 km) omenjeni učinek dosegli že en dan po teku. V tem primeru bi lahko šlo tudi za t. i. parasimpatično pretreniranost, obliko pretreniranosti, ki se kaže s povečano aktivnostjo PŽS, paradoksalno povezano z zmanjšano telesno zmogljivostjo ter povečanim občutkom obremenitve pri naporu (6). V naši raziskavi telesna zmogljivost prvi dan po pretečenem maratonu ni bila zmanjšana in tudi občutek napora ni bil povečan glede na kontrolne vrednosti, zato lahko sklepamo, da gre v tem obdobju za koristne vplive vzdržljivostne vadbe na srce. Praktičen vidik teh rezultatov je, da se telesna vadba v fazi parasimpatične hiperaktivacije priporoča, saj vodi v izboljšanje srčne funkcije.

Vpliv vzdržljivostne telesne vadbe na variabilnost srčne frekvenca pred in po zmerni telesni vadbi

O mehanizmih nastanka teh sprememb lahko le sklepamo. Med ranljivo fazo bi šlo lahko za nezmožnost ponovne aktivacije PŽS in s tem učinka na srce, ki bi bila lahko povezana s prevladujočim vplivom SŽS na srce, ki se kaže v povečanem razmerju LF/HF,

izmerjenem v tem obdobju. Opisani so tudi primeri nezmožnosti ponovne aktivacije PŽS, kadar je aktivnost PŽS prenizka (17, 22, 43, 44). Možna razlaga je tudi zakasnjeno zavrtje SŽS po vzdržljivostni vadbi.

Podobne spremembe po vzdržljivostni vadbi so v svojih raziskavah dokazali tudi Paech in sodelavci, Fazackerley in sodelavci, Hautala in sodelavci ter Furlan in sodelavci, vendar so si rezultati glede na trajanje te faze različni, kar lahko povežemo z različnimi uporabljenimi modeli vzdržljivostne vadbe, kot so različno trajanje, intenziteta in tip vadbe (17, 22, 43, 44).

Z izjemo Paecha in sodelavcev večina avtorjev dva dni po izvedeni vzdržljivostni vadbi ni več zasledila statistično značilno spremenjenih vrednosti HRV v mirovanju v primerjavi z vrednostmi pred izvedbo aerobne vadbe ne glede na model vadbe, kar je v skladu z našimi ugotovitvami (17, 22, 43, 44, 46).

Vpliv vzdržljivostne telesne vadbe na srednji arterijski tlak pred in po zmerni telesni vadbi

Naši rezultati potrjujejo, da ima telesna vadba vpliv na AKT po njej, saj je bil v mirovanju v vseh merilnih točkah po VTV nižji v primerjavi s kontrolno vrednostjo. Po drugi strani je bil AKT v pozni fazi okrevanja po zmerni vadbi glede na vrednosti pred vadbo nespremenjen v vseh merilnih točkah razen pri zmerni vadbi takoj po VTV. Pri izvajanju zmerne telesne obremenitve po večdnevni prekinitvi telesne aktivnosti je bilo pokazano, da povadbena hipotenzija po enakem vadbenem protokolu, kot je bil uporabljen v naši raziskavi, izzveni že pet minut po koncu kratkotrajne aerobne vadbe, kar je v skladu z našimi rezultati (47). Hipotenzija v povezavi s kratkotrajno zmerno vadbo takoj po VTV bi bila lahko posledica vazodilatacije v koži zaradi uravnavanja telesne temperature v povezavi z vzdržljivostno vadbo, a te trditve na podlagi naših rezultatov ne moremo potrditi.

Statistično značilno nižje vrednosti SAT v mirovanju po VTV so skladni z rezultati Müllerja in sodelavcev ter Vlachopoulou in sodelavcev, ki so prav tako izmerili statistično značilno nižje vrednosti krvnega tlaka po pretečenem teku na 3 km oz. 42 km, in v nasprotju z rezultati Staniszewska in sodelavcev, ko že pol ure po polmaratonu AKT ni bil več statistično značilno znižan (39, 40, 48). Glede na hipotenzijo po vadbi raziskave navajajo velik vpliv spola, saj Mourot in sodelavci navajajo hipotenzijo po vadbi le pri moških, pri ženskah pa ne (49).

Spremembe SAT lahko povežemo s številnimi dejavniki, ki se spreminjajo med in po telesni aktivnosti: z aktivnostjo VŽS, vazodilatatorji v krvi, podajnostjo žil, aktivnostjo barorefleksa, s prostornino in viskoznostjo krvi (vnašanjem tekočine) (6, 50). Ker vseh teh parametrov pri naši meritvi nismo spremljali, izmerjenih sprememb SAT ne moremo neposredno pojasniti.

Uporabnost rezultatov v športni praksi

Glede na pridobljene in predstavljene rezultate lahko povzamemo, da zgodovina predhodnih telesnih obremenitev vpliva na okrevanje po kratkotrajni aerobni telesni vadbi. V športu se je s pojavom enostavnih načinov merjenja za spremljanje FSU in njene variabilnosti uveljavilo sprotno spremljanje kazalcev srčne akcije, kot so FSU, iz nje izpeljani parametri HRV ter HRR. Spremljanje omenjenih dejavnikov je postalo stalnica tako pri vrhunskih atletih in rekreativnih športnikih za namen sledenja telesni pripravljenosti, pojavom morebitnih simptomov pretreniranosti in načrtovanja treningov kot tudi pri bolnikih, ki jim je svetovana telesna aktivnost z namenom nadzora med in po vadbi. Mnenja o tem, kateri dejavniki so najbolj povedni in kdaj jih izmeriti, so deljena. Nekateri svetujejo merjenje vsak dan, zjutraj, v mirovanju, drugi po naporu; nekateri prisegajo na FSU, drugi na novejšje kazalce (HRV in HRR). Glede na

rezultate naše raziskave bi priporočali, da poklicni in rekreativni športniki med rednimi treningi izvajajo standardni protokol aerobne kratkotrajne obremenitve ter spremljajo omenjene parametre v fazi okrevanja po tej standardizirani obremenitvi, saj tako lahko ocenijo vpliv zgodovine treningov, ki velikokrat ne vpliva na kazalce v mirovanju. Najbolj zanesljiv in občutljiv kazalec je FSU, merjena v pozni fazi okrevanja (15 min) po standardizirani obremenitvi ter HRR.

Znotraj časovnega okna 24 ur po izčrpavajočem treningu pride do dvofazne spremembe aktivnosti VŽS: zmanjšani aktivaciji PŽS takoj po vzdržljivostni vadbi sledi t. i. superaktivacija PŽS, ki je najbolj izražena en dan po njej. Preiskovanci so zmanjšano aktivacijo PŽS povezovali s subjektivno težjo izvedbo vadbe.

Glede na naše rezultate submaksimalne aerobne vadbe po izčrpavajoči vadbi ni priporočljivo izvajati prehitro: vsekakor ne, dokler je FSU v mirovanju še povišana, saj se aktivnost PŽS še ni reaktivirala in je hkrati aktivnost SŽS še povečana. Trening v tem obdobju vodi v počasnejše okrevanje, pri enaki FSU je intenziteta vadbe nižja, vadba je subjektivno težka in bi ob rednem ponavljanju najverjetneje pripeljala do popolne izčrpanosti adrenergične rezerve.

Obdobje okoli 24 ur po izčrpavajočem treningu bi lahko opisali kot stanje superkompensacije PŽS, torej povečane aktivnosti PŽS (večja HRR in nižja FSU), saj se aktivnost PŽS povrne hitreje, kot se zmanjša aktivnost SŽS (1, 4).

Naše rezultate, da je zmerna aerobna vadba dobra strategija za pospešitev okrevanja po vzdržljivostni vadbi, potrjujejo tudi druge raziskave (4, 24, 51). Glede na nakazano superkompensacijo PŽS okoli 24 ur po izčrpavajočem treningu bi lahko sklepali, da je izvedba submaksimalne aerobne vadbe v tem obdobju najverjetneje

najugodnejša za doseganje najboljših srčno-žilnih prilagoditev in izboljšanje telesne zmogljivosti. Trend superkompensacije znižano FSU po submaksimalnem naporu je še vedno viden 48 ur po izčrpavajočem treningu. Sklepamo lahko, da je načrtovanje novega treninga v tem obdobju zagotovo varno, vendar še ne vemo, če izboljša telesno zmogljivost. Kadar je telesna vadba povezana s subjektivnimi občutki težjega izvajanja vadbe, to lahko pomeni, da vadba poteka v ranljivi fazi.

Omejitve raziskave in predlogi za nadaljnje raziskave

Treba je izpostaviti tudi omejitve naše raziskave, ki hkrati ponujajo možnosti za izboljšave pri nadaljnjih raziskavah. Skupina naših preiskovancev je bila raznovrstna tako glede na spol in starost kot tudi glede na telesno pripravljenost. Ker preiskovanci niso bili trenirani športniki, je prenos naših ugotovitev z gotovostjo možen zgolj na rekreativne športnike in le morebitno tudi na poklicne športnike ali nešportnike. Za večjo verodostojnost rezultatov bi bilo v raziskavo smiselno vključiti tudi kontrolno skupino, ki ne bi opravila 21 km teka. Pri vsakem preiskovancu bi bilo smotno predhodno izvesti tudi poskusno meritev, s čimer bi izključili morebiten vpliv preiskovančeve živčnosti in tesnobe na rezultate prve meritve.

Da bi lahko ocenili, če je ZTV učinkovita tudi pri zaznavanju sindroma pretreniranosti, bi bilo v prihodnjih raziskavah smiselno opraviti enako raziskavo na dveh skupinah vrhunskih športnikov: v prvi skupini bi bili športniki, ki so najverjetneje že pretrenirani, in v drugi tisti, ki niso. Če bi ugotovili, da se tisti, ki so vstopili v raziskavo kot pretrenirani, odzovejo drugače kot tisti, ki niso pretrenirani, bi naš protokol lahko služil kot orodje za ugotavljanje pretreniranosti.

FINANCIRANJE

Raziskavo je finančno podprla Javna agencija za raziskovalno dejavnost Republike

Slovenije v okviru raziskovalnega programa Aplicirana in bazična fiziologija (P3-0019).

LITERATURA

1. Michael S, Graham KS, Davis Oam GM. Cardiac autonomic responses during exercise and post-exercise recovery using heart rate variability and systolic time intervals-a review. *Front Physiol.* 2017; 8: 301.
2. Risk M, Bril V, Broadbridge C, et. al. Heart rate variability measurement in diabetic neuropathy: Review of methods. *Diabetes Technol Ther.* 2001; 3 (1): 63–76.
3. Bellenger CR, Fuller JT, Thomson RL, et. al. Monitoring athletic training status through autonomic heart rate regulation: A systematic review and meta-analysis. *Sports Med.* 2016; 46 (10): 1461–86.
4. Stanley J, Peake JM, Buchheit M. Cardiac parasympathetic reactivation following exercise: Implications for training prescription. *Sports Med.* 2013; 43 (12): 1259–77.
5. Bresjanac M. Temelji patofiziologije s fiziologijo za študente zdravstvenih ved. In: Bajrovič FF, ed. Ljubljana: Medicinska fakulteta, Inštitut za patološko fiziologijo; 2014. p. 165–9.
6. Kenney WL, Wilmore JH, Costill DL. Physiology of sport and exercise with web study guide. In: Tocco AN, Park J, Lan Seaman A, et al., eds. Champaign: Human Kinetics; 2019. p. 642.
7. Vieluf S, Hasija T, Jakobsmeier R, et. al. Exercise-induced changes of multimodal interactions within the autonomic nervous network. *Front Physiol.* 2019; 10: 240.
8. Wehrwein EA, Orer HS, Barman SM. Overview of the anatomy, physiology, and pharmacology of the autonomic nervous system. *Compr Physiol.* 2016; 6 (3): 1239–78.
9. Tulppo MP, Kiviniemi AM, Hautala AJ, et. al. Sympatho-vagal interaction in the recovery phase of exercise. *Clin Physiol Funct Imaging.* 2011; 31 (4): 272–81.
10. Almeida MB, Araújo CGS. Effects of aerobic training on heart rate. *Rev Bras Med Esporte.* 2003; 9 (2): 113–20.
11. Kliszczewicz BM, Esco MR, Quindry JC, et. al. Autonomic responses to an acute bout of high-intensity body weight resistance exercise vs. treadmill running. *J Strength Cond Res.* 2016; 30 (4): 1050–8.
12. Kliszczewicz B, Williamson C, Bechke E, et. al. Autonomic response to a short and long bout of high-intensity functional training. *J Sports Sci.* 2018; 36 (16): 1872–9.
13. Soares AHG, Oliveira TP, Cavalcante BR, et. al. Effects of active recovery on autonomic and haemodynamic responses after aerobic exercise. *Clin Physiol Funct Imaging.* 2017; 37 (1): 62–7.
14. Coote JH. Recovery of heart rate following intense dynamic exercise. *Exp Physiol.* 2010; 95 (3): 431–40.
15. Potočnik N. Aktivnost avtonomnega živčevja med telesno vadbo. *Med Razgl.* 2014; 53 (4): 485–501.
16. Halliwill JR, Buck TM, Laceywell AN, et. al. Postexercise hypotension and sustained postexercise vasodilatation: What happens after we exercise? *Exp Physiol.* 2013; 98 (1): 7–18.
17. Hautala A, Tulppo MP, Mäkkikallio TH, et. al. Changes in cardiac autonomic regulation after prolonged maximal exercise. *Clin Physiol.* 2001; 21 (2): 238–45.
18. Murrell C, Wilson L, Cotter JD, et. al. Alterations in autonomic function and cerebral hemodynamics to orthostatic challenge following a mountain marathon. *J Appl Physiol.* 2007; 103 (1): 88–96.
19. Buchheit M, Laursen PB, Ahmadi S. Parasympathetic reactivation after repeated sprint exercise. *Am J Physiol Heart Circ Physiol.* 2007; 293 (1): H133–41.
20. Mourot L, Bouhaddi M, Tordi N, et. al. Short- and long-term effects of a single bout of exercise on heart rate variability: Comparison between constant and interval training exercises. *Eur J Appl Physiol.* 2004; 92 (4–5): 508–17.

21. Gratzke G, Rudnicki R, Urban W, et. al. Hemodynamic and autonomic changes induced by Ironman: Prediction of competition time by blood pressure variability. *J Appl Physiol.* 2005; 99 (5): 1728–35.
22. Furlan R, Piazza S, Dell’Orto S, et. al. Early and late effects of exercise and athletic training on neural mechanisms controlling heart rate. *Cardiovasc Res.* 1993; 27 (3): 482–8.
23. Kaikkonen P, Nummela A, Rusko H. Heart rate variability dynamics during early recovery after different endurance exercises. *Eur J Appl Physiol.* 2007; 102 (1): 79–86.
24. Seiler S, Haugen O, Kuffel E. Autonomic recovery after exercise in trained athletes: Intensity and duration effects. *Med Sci Sports Exerc.* 2007; 39 (8): 1366–73.
25. Casonatto J, Tinucci T, Dourado AC, et. al. Cardiovascular and autonomic responses after exercise sessions with different intensities and durations. *Clinics.* 2011; 66 (3): 453–8.
26. Kaikkonen P, Hynynen E, Mann T, et. al. Can HRV be used to evaluate training load in constant load exercises? *Eur J Appl Physiol.* 2010; 108 (3): 435–42.
27. Michael S, Jay O, Graham KS, et. al. Longer exercise duration delays post-exercise recovery of cardiac parasympathetic but not sympathetic indices. *Eur J Appl Physiol.* 2017; 117 (9): 1897–906.
28. Cunha FA, Midgley AW, Gonçalves T, et. al. Parasympathetic reactivation after maximal CPET depends on exercise modality and resting vagal activity in healthy men. *Springerplus.* 2015; 4: 100.
29. Danieli A, Lusa L, Potočník N, et. al. Resting heart rate variability and heart rate recovery after submaximal exercise. *Clin Auton Res.* 2014; 24 (2): 53–61.
30. Sandercock GRH, Bromley PD, Brodie DA. Effects of exercise on heart rate variability: Inferences from meta-analysis. *Med Sci Sports Exerc.* 2005; 37 (3): 433–9.
31. Mendonca GV, Heffernan KS, Rossow L, et. al. Sex differences in linear and nonlinear heart rate variability during early recovery from supramaximal exercise. *Appl Physiol Nutr Metab.* 2010; 35 (4): 439–46.
32. Barak OF, Jakovljevic DG, Popadic Gacesa JZ, et. al. Heart rate variability before and after cycle exercise in relation to different body positions. *J Sports Sci Med.* 2010; 9 (2): 176–82.
33. Watanabe N, Reece J, Polus BI. Effects of body position on autonomic regulation of cardiovascular function in young, healthy adults. *Chiropr Osteopat.* 2007; 15: 19.
34. Hjortskov N, Rissén D, Blangsted AK, et. al. The effect of mental stress on heart rate variability and blood pressure during computer work. *Eur J Appl Physiol.* 2004; 92 (1–2): 84–9.
35. Tanaka M, Mizuno K, Tajima S, et. al. Central nervous system fatigue alters autonomic nerve activity. *Life Sci.* 2009; 84 (7–8): 235–9.
36. Oken BS, Chamine I, Wakeland W. A systems approach to stress, stressors and resilience in humans. *Behav Brain Res.* 2015; 282: 144–54.
37. Kšela J. Variabilnost srčne frekvence – iz kardioloških laboratorijev v svet rekreativnega in profesionalnega športa. *Zdrav Vestn.* 2020; 89 (5–6): 287–300.
38. Malik M. Heart rate variability: Standards of measurement, physiological interpretation, and clinical use. *Circulation.* 1996; 93 (5): 1043–65.
39. Müller J, Wilms M, Oberhoffer R. Acute effects of submaximal endurance training on arterial stiffness in healthy middle- and long-distance runners. *J Clin Hypertens.* 2015; 17 (5): 371–4.
40. Vlachopoulos C, Kardara D, Anastasakis A, et. al. Arterial stiffness and wave reflections in marathon runners. *Am J Hypertens.* 2010; 23 (9): 974–9.
41. Weberruss H, Maucher J, Oberhoffer R, et. al. Recovery of the cardiac autonomic nervous and vascular system after maximal cardiopulmonary exercise testing in recreational athletes. *Eur J Appl Physiol.* 2018; 118 (1): 205–11.
42. Wilkins BW, Minson CT, Halliwill JR. Regional hemodynamics during postexercise hypotension. II. Cutaneous circulation. *J Appl Physiol.* 2004; 97 (6): 2071–6.
43. Paech C, Schriber S, Daehnert I, et. al. Influence of a 100-mile ultramarathon on heart rate and heart rate variability. *BMJ Open Sport Exerc Med.* 2021; 7 (2): e001005.
44. Fazackerley LA, Fell JW, Kitic CM. The effect of an ultra-endurance running race on heart rate variability. *Eur J Appl Physiol.* 2019; 119 (9): 2001–9.
45. Gibbons CH. Basics of autonomic nervous system function. *Handb Clin Neurol.* 2019; 160: 407–18.
46. Daniłowicz-Szymanowicz L, Raczak G, Pinna GD, et. al. The effects of an extreme endurance exercise event on autonomic nervous system activity. *Pol Merkur Lekarski.* 2005; 19 (109): 28–31.
47. Potočník N, Lenasi H. The responses of glabrous and nonglabrous skin microcirculation to graded dynamic exercise and its recovery. *Clin Hemorheol Microcirc.* 2016; 64 (1): 65–75.

48. Staniszewska M, Pudło A, Pawlik A. Influence of half marathon race on aortic stiffness in amateur runners. *Arch Med Sci.* 2017; 13 (4): 962–4.
49. Mourot L, Fornasiero A, Rakobowchuk M, et. al. Post-exercise hypotension and reduced cardiac baroreflex after half-marathon run: In men, but not in women. *Int J Environ Res Public Health.* 2020; 17 (17): 6337.
50. Kulics JM, Collins HL, DiCarlo SE. Postexercise hypotension is mediated by reductions in sympathetic nerve activity. *Am J Physiol.* 1999; 276 (1): H27–32.
51. Laursen PB. Training for intense exercise performance: High-intensity or high-volume training? *Scand J Med Sci Sports.* 2010; 20 (Suppl 2): 1–10.

Prispelo 23. 6. 2022