

Simon Iskra¹,
Armin Paravlič^{1,2}

Uporaba bližnje infrardeče spektroskopije za spremljanje longitudinalnih sprememb pri vzdržljivostnem treningu: sistematični pregled literature

Izvilleček

Bližnja infrardeča spektroskopija (NIRS) se uveljavlja kot obetavna neinvazivna metoda za spremljanje lokalnih mišičnih prilagoditev na vzdržljivostni trening. Cilj tega sistematičnega pregleda je bil kvalitativno pregledati pristope k spremljanju mišičnih prilagoditev na vzdržljivostni trening in oceniti uporabnost NIRS za spremljanje uspešnosti prilagoditev v trenažnem procesu. V pregled je bilo vključenih šest študij. Rezultati kažejo veliko heterogenost v metodoloških pristopih k analizi parametrov NIRS in v izbiri testnih protokolov. Kljub tem razlikam se kaže uporabnost NIRS pri zaznavanju lokalnih prilagoditev, kot so izboljšana mikrovaskularna ekstrakcija kisika, izboljšana kinetika reoksigenacije in adaptacije na ravni žilnega sistema. Parametri NIRS so se izkazali kot obetavni kazalniki lokalnih mišičnih prilagoditev, saj skupaj s sistemskimi kazalniki vzdržljivosti ponujajo dodaten vpogled v športnikove fiziološke prilagoditve. Kljub spodbudnim rezultatom literatura ostaja metodološko raznolika, z različnimi pristopi k testiranju, analizi podatkov in uporabljeni terminologiji. Pri NIRS se sicer kažejo možnosti za prenos v prakso, vendar so za uspešnost uporabe v vsakdanji športni praksi potrebne nadaljnje raziskave za boljše razumevanje povezav med NIRS in sistemskimi parametri vzdržljivosti, kot je največji ali maksimalni pri-vzem kisika. NIRS kaže potencial kot dopolnilna metoda za spremljanje trenažnega statusa pri vzdržljivostnih športnikih, saj omogoča oceno lokalnih prilagoditev mišic, ki so ključne za načrtovanje, programiranje in optimizacijo vadbenega procesa.

Ključne besede: bližnja infrardeča spektroskopija, vzdržljivost, šport, trening, spremljanje treninga, vadbeni fiziologija.



Using near-infrared spectroscopy to monitor longitudinal training adaptations in endurance training: a systematic review

Abstract

Near-infrared spectroscopy is emerging as a promising non-invasive method for monitoring local muscular adaptations to endurance training. The aim of this systematic review was to qualitatively examine approaches to track muscular adaptations and to assess the utility of NIRS in evaluating peripheral muscular adaptations to training. Six studies met the inclusion criteria. Results revealed substantial heterogeneity in the methodologies, testing protocols, and NIRS data analysis procedures. Despite these differences, findings consistently demonstrated that NIRS is effective in detecting local adaptations, including improved microvascular oxygen extraction capacity, enhanced reoxygenation kinetics, and vascular remodeling. NIRS-derived parameters appear to be valuable indicators of muscular adaptations, offering complementary insights when combined with systemic measures such as maximal oxygen uptake. Although the evidence is encouraging, the current literature remains methodologically diverse, and standardized protocols and terminology is lacking. Further research is needed to clarify the relationship between NIRS-derived parameters and systemic endurance markers. Overall, NIRS shows considerable potential as a complementary tool for monitoring training status in endurance athletes, enabling the assessment of local muscular adaptations critical for optimizing the training process.

Keywords: near-infrared spectroscopy, endurance, sport, training, monitoring, exercise physiology.

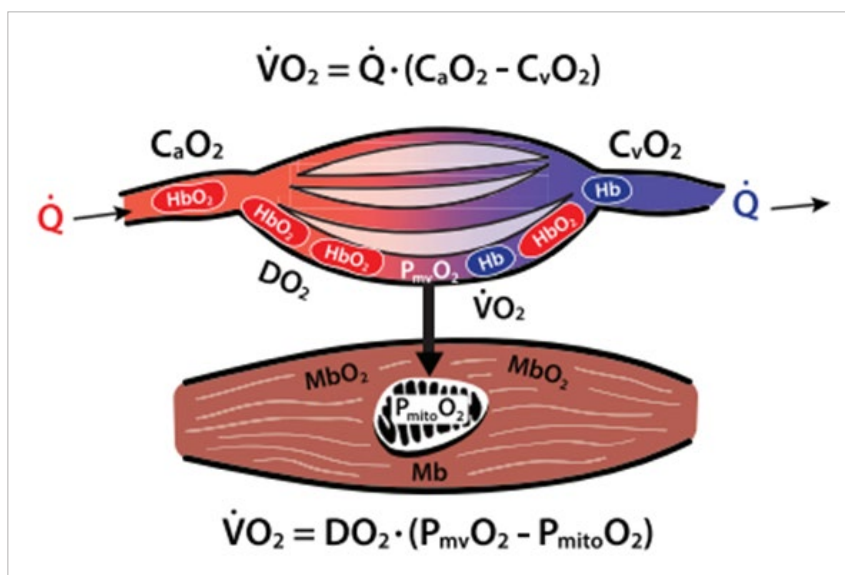
¹ Univerza v Ljubljani, Fakulteta za šport

² Znanstveno-raziskovalno središče Koper, Inštitut za kineziološke raziskave

■ UVOD

V zadnjem obdobju je napredek pri razvoju neinvazivnih tehnologij v športni znanosti tako znanstvenikom kot trenerjem omogočil uporabo različnih metod za spremljanje trenažnega procesa, posebej pri vzdržljivostnih športnikih. Športniki, trenerji in strokovnjaki že uporabljajo različne tehnologije, med drugim merilnike srčnega utripa, moči in hitrosti ter ravni laktata in glukoze. Za učinkovito spremljanje prilagoditev na različne vrste vzdržljivostnega treninga se je uveljavila bližnja infrardeča spektroskopija (NIRS). Ta novi pripomoček omogoča neprekinjeno merjenje z visoko frekvenco zajemanja za spremljanje sprememb v oksigenaciji mišic med vadbo ali drugimi intervencijami. Medtem ko se večina uveljavljenih metod osredotoča na sistemske parametre (npr. ventilacijski parametri, pridobljeni med kardiorespiratornim obremenitvenim testom, vrednosti laktata ali glukoze v krvi, srčni utrip) in parametre obremenitve (npr. moč, hitrost), NIRS omogoča zaznavanje lokalnih odzivov med vadbo neposredno v delujoči mišici.

NIRS spremlja relativne spremembe oksigenacije v mišicah in arteriolah, ki mišično tkivo oskrbujejo s kisikom. Deluje na podlagi posebnih absorpcijskih lastnosti kromoforov v bližnjem infrardečem območju med 700 in 1000 nm valovne dolžine. Infrardeča svetloba prodre več centimetrov globoko v tkivo (2,5–4 cm), kjer sta glavna vira absorpcije svetlobnega spektra hemoglobin in mioglobin. Stopnja absorpcije se med oksigeniranimi in deoksigeniranimi oblikami kromoforov razlikuje, zato je na podlagi tega mogoče zaznavati in razlikovati te molekule v fotodetektorju. Razlika v absorpciji tkiva nam pomaga razumeti dinamično ravnoesje med dovajanjem in privzemom kisika v območju neposredno okoli delujočih mišic in v njih med vadbo in v mirovanju (Barstow, 2019; Orcioli-Silva idr., 2024) (Slika 1). Signal NIRS ponuja informacije o spremembah oksigenacije hemoglobina (Hb), ki je prisoten predvsem v majhnih žilah (< 1 mm premera), kot so kapilare, arteriolarna in venularna mreža. Glede na stalno oksigenacijo mioglobina v rangu, doseženem med vadbo, spremembe v signalu NIRS večinoma odražajo spremembe v oksigenaciji Hb (Ferreira



Slika 1 : Shematski prikaz komponent dostave kisika po Fickovi enačbi (zgoraj) in difuziji kisika iz kapilare v mitohondrije mišičnega vlakna (spodaj). Prilagojeno po: Barstow (2019).

Opomba. CaO_2 – arterijska koncentracija O_2 ; C_vO_2 – venenska koncentracija O_2 , ki zapuša delujoče mišice; DO_2 – difuznost O_2 ; Mb – mioglobin; $P_{mito}O_2$ – mitohondrijski delni pritisk O_2 ; $P_{mv}O_2$ – mikrovaskularni delni pritisk O_2 ; $\dot{Q}$ – krvni pretok; $\dot{V}O_2$ – privzem kisika.

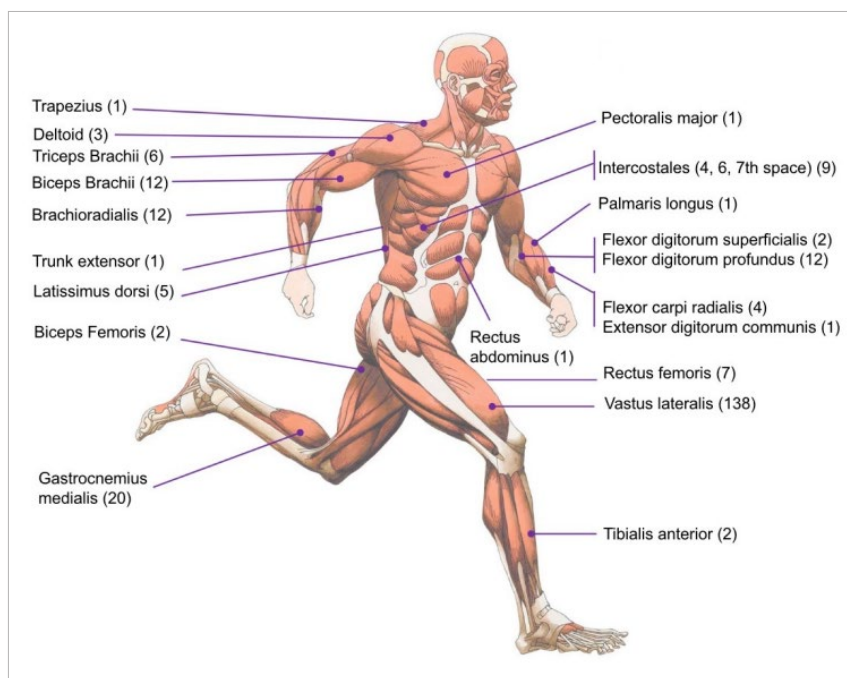
idr., 2005; Iannetta idr., 2017; Perrey idr., 2024; Rasica idr., 2024).

Od uvedbe komercialno dostopnih brezžičnih mišičnih oksimetrov leta 2006 se je literatura, ki raziskuje NIRS kot orodje za oceno oksidativne zmogljivosti skeletnih mišic med športnimi aktivnostmi, znatno razširila. Ker NIRS omogoča zvezno lokalno merjenje oksigenacije mišic, se je uveljavil kot obetaven fiziološki parameter. Ker sta lokalna oksigenacija mišic in dinamično ravnoesje med dovajanjem in privzemom kisika v delujočih mišicah še posebej pomembna pri vzdržljivostnih športih, so številne raziskave to tehnologijo uporabile za nadaljnje raziskovanje lokalnega metabolizma med vadbo in specifičnih odzivov oksigenacije hemoglobina med vadbo (Perrey in Ferrari, 2018). Nedavni pregled Perrey idr. (2024) je obravnaval 191 raziskav s skupno 3.435 udeleženci iz 37 različnih športnih disciplin, pri čemer je 21 raziskav poročalo o intervenciji z vadbo. Pregled je poudaril, da literatura obravnava več parametrov NIRS pri preiskovanjih različnih starosti in na različni stopnji treniranosti. Raziskave so se osredotočale na veliko različnih tem, od akutnih in kroničnih vadbenih intervencij do longitudinalnega spremljanja napredka, opredelitve vadbenih

območij, nefarmakoloških dodatkov, okoljskih razmer in kompresijskih športnih oblačil.

Poleg tega se v razpoložljivi literaturi osredotočajo na merjenje več različnih parametrov, pridobljenih iz signala NIRS, zaznati pa je mogoče uporabo različne terminologije, saj je ta odvisna od uporabljenih instrumentov. Kratek pregled literature je pokazal, da ta hip ni dogovor o uporabi enotne terminologije, raziskovalci pa zaradi natančnosti navajanja podatkov v raziskavah uporabljajo izvirna poimenovanja spremenljivk glede na različne proizvajalce. Za lažjo razumevanje v spodnjih alinejah navajamo različne spremenljivke in terminologijo, ki se pojavlja v velikem delu literature (Perrey idr., 2024):

- rSO_2 /TSI/StO₂/So2/TOI/TSI – izračunana relativna mišična oksigenacija kisika (O_2);
- mVO_2 – privzem mišičnega kisika (mVO_2), izpeljana iz relativnih sprememb oksigeniranega hemoglobina (O_2Hb) med različnimi protokoli tranzientne arterijske okluzije;
- tHb (skupni hemoglobin) – spremembe pretoka krvi, izpeljane iz sprememb v skupnem hemoglobinu v merjenem območju;
- skupni pretok krvi, izračunan iz protokolov venske okluzije;



Slika 2: Prikaz različnih merilnih mest za merjenje mišične oksigenacije z bližnjo infrardečo spektroskopijo. Prilagojeno po: (Perrey idr., 2024).

- $O_2Hb/oxyHb/oxy$ [HBMb] – relativna koncentracija oksigeniranega hemoglobina;
- $HHb/deoxyHb/deoxy$ [HbMb] – relativna koncentracija deoksigeniranega hemoglobina;
- angl. reoxyslope – hitrost reoksigenacije relativne mišične oksigenacije po submaksimalni ali maksimalni vadbi.

Terminologija, povezana s spremenljivkami za oceno prilagoditev na trening, je precej raznolika. Prav tako je precejšnja heterogenost zaznati pri pristopu k oceni prilagoditev na vadbo z metodo NIRS. Ker za zdaj v pristopu ocene prilagoditev na trening ni enotnega »zlatega standarda« (v nasprotju z npr. ventilatornimi spremenljivkami), je heterogenost v literaturi sicer pričakovana.

Različne športne discipline primarno uporabljajo različne mišične skupine. Zaradi lokalizirane narave meritev NIRS je zato pomembno, da za spremljanje prilagoditev izberemo reprezentativno mišično skupino, analiza katere nam omogoča zanesljiv vpogled v omejitve v lokalnem ravnovesju prenosa kisika v delujoče mišice. Prav zaradi lokalizirane narave NIRS meritev je v literaturi poleg prej omenjene heterogenosti v izbiri analiziranih spremenljivk mogoče opaziti tudi uporabo

tehnologije NIRS na različnih mišičnih skupinah, pomembnih v posameznih športih. Pri športnem plezanju se raziskave osredotočajo na primer na meritve mišičnega tkiva v podlahti, medtem ko so pri vzdržljivostnih športih pogostejše meritve na različnih delih mišic stegna in goleni, meritve pa se izvajajo tudi na drugih mišicah, ki sodelujejo pri različnih gibanjih v različnih športnih disciplinah. Pregled literature Perrey idr. (2024) je ugotovil, da se trenutno NIRS uporablja za merjenje zelo različnih mišičnih skupin, večina raziskav pa se osredotoča na meritve na mišicah stegna ali goleni (Slika 2).

V športni znanosti in širše je NIRS edinstvena metoda za spremljanje lokalnih prilagoditev na vadbo. Kljub nekaterim obetavnim rezultatom in čedalje večji priljubljenosti uporabe NIRS v športni znanosti se potencial NIRS za spremljanje lokalnih mišičnih prilagoditev na trening pogosto zanemarlja (Perrey, 2022). Literatura se osredotoča na veliko različnih športnih disciplin, zaznati pa je tudi precejšnja heterogenost tako v pristopih kot pri izvedbi raziskav. Zato je bil cilj tega sistematičnega pregleda smiselno ovrednotiti različne metode v raziskavah, v katerih so spremljali longitudinalne prilagoditve na vadbene intervencije. Cilj je bil tudi ovrednotiti smer in veli-

kost sprememb različnih uporabljenih spremenljivk in pristopov k spremljanju lokalnih prilagoditev mišičnega tkiva na različne longitudinalne vadbene intervencije. Primerjali smo lokalne prilagoditve primarnih agonističnih mišičnih skupin z uveljavljenimi merami za spremljanje vzdržljivostne zmogljivosti pri različnih vrstah vzdržljivostne vadbe pri vzdržljivostnih športnikih.

METODE

Ta sistematični pregled je bil opravljen v skladu s smernicami PERSIST 2021 (angl. implementing PRISMA in Exercise, Rehabilitation, Sport Medicine and Sport Science) ter smernicami za sistematične preglede v športu in medicini športa PRISMA (angl. Preferred Reporting Items for Systematic Reviews and Meta-analyses).

Iskalni niz

Uporabili smo iskalni niz za izbiro ustreznih raziskav, ki uporabljajo NIRS za spremljanje kroničnih adaptacij na longitudinalne vadbene intervencije ali za spremljanje prilagoditev med trenažnim procesom pri zdravih posameznikih ali športnikih, vključenih v vzdržljivostne športe. Iskanje v podatkovni bazi PubMed je bilo izvedeno 27. maja 2025 z uporabo kombinacije ustreznih izrazov z logičnima operatorjema AND in OR, vključno z naslednjimi besednimi zvezami: »NIRS«, »near-infrared spectroscopy«, »muscle oxygenation«, »training«, »exercise«, »sport«, »cycling«, »running«, »swimming« in »athlete«. Uporabljen je bil tudi logični operator NOT za izključitev izrazov: »review«, »systematic review«, »meta-analysis«. Izbrane so bile le raziskave v angleškem jeziku. En raziskovalec je iskalni niz in povezane članke pregledal in izbral na podlagi vključitvenih in izključitvenih meril z uporabo spletne platforme Nested Knowledge.

Vključitvena in izključitvena merila

Vključitvena in izključitvena merila so bila opredeljena na podlagi okvira PICO. Populacija (P) – odrasli preiskovanci v starosti od 18 do 59 let. Vključeni so bili le preiskovanci, ki so bili aktivno vključeni v različne vzdržljivostne športe, rekreativno ali profesionalno. Intervencija (I) –

kronične longitudinalne intervencije (≥ 4 tedne) s strukturiranim vzdržljivostnim treningom ali longitudinalno spremljanje trenažnega procesa v okviru izbranega športa. Primerjava (angl. comparison [C]) – enoskupinske, vzporedne ali randomizirane kontrolirane raziskave, ki analizirajo različne režime vzdržljivostne vadbe, primerjajo različne režime vzdržljivostne vadbe med seboj ali vzdržljivostno vadbo s kontrolno skupino. Izid (angl. outcome [O]) – sprememba spremenljivk NIRS ne glede na izbrano metodo analize, maksimalni privzem kisika, laboratorijski testi vzdržljivosti, trenažni pragovi, pridobljeni z meritvijo laktata ali ventilatornih spremenljivk.

Merila za vključitev: 1) uporaba spremenljivk NIRS na primarnih (agonističnih) mišicah v izbrani športni disciplini, 2) zdrava populacija, 3) intervencija z vzdržljivostno vadbo ali longitudinalno spremljanje trenažnega procesa.

Merila za izključitev: 1) vadbene intervencije, ki vključujejo vadbo za moč ali druge vrste vadbenih intervencij, 2) klinične populacije, 3) raziskave na živalih, 4) akutne (≤ 4 tedne) vadbene intervencije, 5) brez vadbene intervencije, 6) farmakološke intervencije ali uporaba drugih izdelkov poleg vadbene intervencije (dodatki, kompresijska oblačila itn.), 7) protokoli raziskav, 8) sistematični pregledi literature in metaanalize.

Izbira

Prvi pregled na podlagi naslova in povzetka je izvedel en raziskovalec (SI). Vključeval je odstranjevanje podvojenih zapisov ter pregled naslovov in povzetkov potencialnih raziskav na podlagi meril za vključitev in izključitev. Nato so bili izbrani članki pridobljeni v obliki celotnega besedila ter ocenjeni s strani enega raziskovalca (SI) glede vključitve v sistematični pregled literature. V primeru nejasnosti glede vključitve/izključitve je bil opravljen posvet z drugim raziskovalcem (AP), nesoglasja pa so bila odpravljena s konsenzom.

Izbira podatkov

Uporabili smo protokol za ekstrakcijo podatkov na podlagi Cochranove skupine za pregled za potrošnike in komunikacijo (angl. Cochrane Consumers and Communication Review Group) za ekstrakcijo

primarnih in sekundarnih spremenljivk. Primarni izid je bila sprememba v izbrani spremenljivki, pridobljeni z NIRS. Sekundarni izidi so vključevali spremembe v aerobni zmogljivosti, vzdržljivosti, submaksimalne teste, rezultate stopnjevanjih obremenitvenih testov, spremembe laktatnih ali ventilatornih pragov, dizajn in protokol raziskave ter osnovne karakteristike vzorca. Zaradi heterogenosti v izbiri in poročanju primarnih izidov smo se odločili za kvalitativno sintezo vključenih raziskav. Za klasifikacijo protokolov in karakteristik vzorca smo uporabili vnaprej določena merila. Preiskovanci so bili razvrščeni glede na raven vključenosti v športni disciplini, opisani v nadaljevanju. V primeru manjkajočih podatkov smo za njihovo dopolnitev z avtorji navezali stik po e-pošti.

Klasifikacija izidov

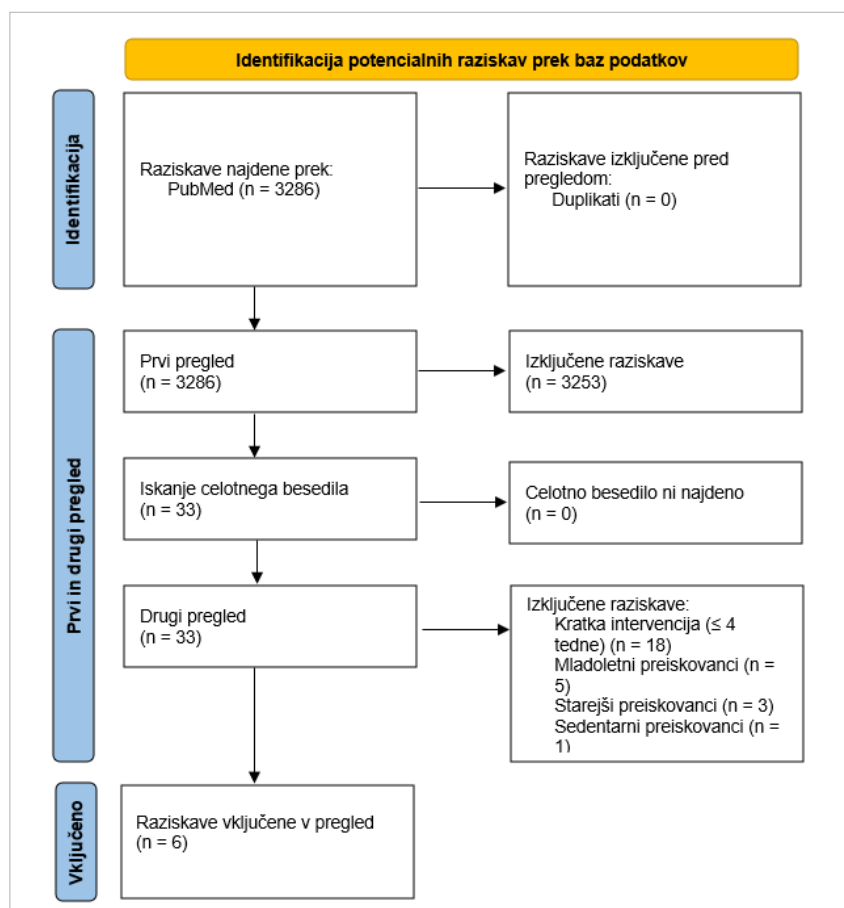
Izide smo ocenili na podlagi vrednosti pred intervencijo in po njej. Udeleženci raziskave so bili glede na starost razvrščeni v kategoriji: 18–39 let – mladi odrasli, 30–59 let – srednja odraslost (La-

chman, 2001). Udeleženci so bili dodatno razvrščeni glede na raven udeležnosti v izbrani športni disciplini glede na McKay idr. (2022): raven 0 – sedentarni, raven 1 – rekreativni športniki, raven 2 – trenirani/športniki v razvoju, raven 3 – visoko trenirani/športniki na državni ravni, nivo 4 – elitni/športniki na mednarodni ravni. Vadbena intervencija je bila opredeljena glede na tip treninga: kontinuirani (angl. continuous aerobic training [CAT]) in intervalni (angl. interval aerobic training [IAT]). Vse intervencije so bile glede na intenzivnost razdeljene po ustaljenih protokolih Coates idr. (2023).

■ REZULTATI

Izbira študij

Pri prvem iskanju je bilo identificiranih skupno 3.286 raziskav. Po odstranjevanju dvojnikov in prvem pregledu je bilo v celoti pregledanih 33 raziskav. Po pregledu celotnega besedila je bilo 27 raziskav izključenih zaradi naslednjih razlogov: kratka intervencija (> 4 tedne) ($n = 18$),



Slika 3: Prikaz izbire raziskav na podlagi sistema PRISMA

mladoletni preiskovanci ($n = 5$), starejši preiskovanci ($n = 3$), sedentarni preiskovanci ($n = 1$). V končni pregled je bilo vključenih šest raziskav. Selekcija študij je prikazana v diagramu PRISMA (Slika 3).

Značilnosti preiskovancev in glavne ugotovitve raziskav

Značilnosti posameznih raziskav so prikazane v Tabeli 1. Vključene študije so zajemale skupno 64 preiskovancev (48 % žensk). V treh raziskavah so bili med preiskovanci samo moški in v dveh samo ženske, medtem ko je ena raziskava vključevala oba spola. Starost preiskovancev je bila od 20 do 34 let. V vseh raziskavah so spremljali fizično aktivne udeležence

ali udeležence, ki se rekreativno ali profesionalno ukvarjajo z izbranim športom. V dveh raziskavah so proučevali fizično aktivne udeležence, medtem ko so v štirih raziskavah spremljali športnike (po ena v hokeju, intermitentnih športih, kolesarstvu in veslanju). Glede na raven udeležnosti v športu so bili preiskovanci večinoma opredeljeni na raven 1 (štiri raziskave), dve raziskavi pa sta vključevali preiskovance na ravni 3 in 4. O maksimalnem privzemu kisika (VO_{2max}) so poročali v treh raziskavah (2817–3967 $mLO_2 \cdot min^{-1}$). Štiri raziskave so za intervencijo uporabile kolesarjenje, medtem ko sta preostali raziskavi uporabili tek in veslanje. Intenzivnost intervencije je bila opredeljena

kot srednja intenzivnost ($n = 2$), visoka intenzivnost ($n = 3$) in maksimalna intenzivna ($n = 1$), ena raziskava pa se je usmerila na longitudinalno spremljanje športnikov po periodiziranem obdobju treninga. Značilnosti vzorca so navedene v Tabeli 1.

V eni raziskavi so za vadbeno intervencijo uporabili CAT, v dveh raziskavah IAT v obliki visoko intenzivnega intervalnega treninga in v eni raziskavi intervalni trening sprintov. Pri eni raziskavi so uporabili periodizirani pristop, sestavljen iz vseh treh tipov treninga. Intervencije so izvajali 6–8 tednov ($Me = 6$ tednov) s skupnim trajanjem treninga 180–2.880 minut (Tabela 2).

Tabela 1:

Glavne značilnosti vzorca in protokola

Raziskava	Izid	Naprava	Merilno mesto	Raven po McKay idr. (2022)	Šport	Spol	Starost	VO_{2max}	Tip vadbe	Tip treninga	Intenzivnost
Costes idr. (2001)	TSI	Runman Unit	vastus lateralis	1	Aktivni	Oba spola (5/2)	20	2817	Kolesarjenje	CAT	Srednja
Buchheit in Ufland (2011)	HHb, O ₂ Hb, TSI	Portamon	vastus lateralis	1	Intermitentni športi	Moški (8/0)	34	NP	Tek	CAT, HIIT, SIT	Srednja in visoka
Jones idr. (2015)	HHb, O ₂ Hb, tHb, TSI	Portamon	vastus lateralis	4	Hokej	Ženske (0/6)	20.6	NP	Kolesarjenje	SIT	Maksimalna
Caen idr. (2018)	HHb, O ₂ Hb	NIRO-200NX	vastus lateralis	1	Aktivni	Moški (9/0)	21.8	3951	Kolesarjenje	HIIT	Visoka
Caen idr. (2019)	HHb, O ₂ Hb, TSI	NIRO-200NX	vastus lateralis	1	Kolesarstvo	Moški (11/0)	21.8	3967	Kolesarjenje	HIIT	Visoka
Eserhaut idr. (2025)	TSI	Moxy Monitor	vastus lateralis	3	Veslanje	Ženske (0/23)	20	NP	Veslanje	Različne metode	NP

Opomba. CAT – kontinuirani aerobni trening; SIT – intervalni trening sprintov; HIIT – visoko intenzivni intervalni trening; HHb – deoksigenirani hemoglobin; O₂Hb – oksigenirani hemoglobin; tHb – skupni hemoglobin; TSI – indeks tkivne saturacije; NP – ni podatka.

Tabela 2:

Glavne značilnosti vadbenih intervencij

Raziskava	Izbrana disciplina	Tip treninga	Trajanje (tedni)	Tedenska frekvenca	Dolžina treninga (min)	Število treningov	Skupno trajanje (min)	Trening
Costes idr. (2001)	Kolesarjenje	CAT	4	6	120	24	2.880	70–80 % HRmax
Buchheit in Ufland (2011)	Tek	CAT, HIIT, SIT	8	3,5	NP	28	NP	Nizka intenzivnost pri 70–74 % MAS, srednja intenzivnost pri 73–77 % MAS, kratki intervali pri 107–120 % MAS, dolgi intervali pri 85–92 % MAS
Jones idr. (2015)	Kolesarjenje	SIT	6	1*	30	6	180	8–12*60 s pri MAP / 75 s aktivne regeneracije
Caen idr. (2018)	Kolesarjenje	HIIT	6	3	49	18	882	6*4 min pri intenzivnosti CP, 3 min regeneracije pri GET
Caen idr. (2019)	Kolesarjenje	HIIT	6	3	49	18	882	6*4 min pri intenzivnosti CP, 3 min regeneracije pri GET
Eserhaut idr. (2025)	Veslanje	Različni tipi treninga		NP	NP	NP	NP	Več evalvacij v eni sezoni

Opomba. CAT – kontinuirani aerobni trening; SIT – intervalni trening sprintov; HIIT – visoko intenzivni intervalni trening; HRmax – maksimalni srčni utrip; MAS – maksimalna aerobna hitrost; MAP – maksimalna aerobna moč; CP – kritična moč; GET – prvi ventilatorni prag (angl. Gas-exchange threshold); NP – ni podatka.

Za analizo rezultatov so vse raziskave uporabile senzor NIRS na mišici *vastus lateralis*. Vključene raziskave so uporabljale naprave NIRS različnih proizvajalcev, med drugim Runman Unit ($n = 1$), Portamon ($n = 2$), NIRO-200NX ($n = 2$) in Moxxy Monitor ($n = 1$). Izbrani izidi so vključevali: TSI ($n = 4$), O_2Hb ($n = 4$), HHb ($n = 4$), in tHb ($n = 1$).

Štiri raziskave so podatke izrazile kot odstotek spremembe glede na začetno vrednost, medtem ko sta dve raziskavi poročali o vrednosti TSI in HHb (Caen idr., 2018; Eserhaut idr., 2025). Raziskava Caen idr. (2018) je za analizo podatkov uporabila vrednosti TSI za izračun relevantnih vadbenih pragov, določenih z NIRS, ki sovpadajo z ventilatornimi pragovi, uporabljenimi za določanje vadbenih območij. Dve raziskavi sta navedli protokol obdelave podatkov, ki je vključeval normalizacijo podatkov in njihovo pretvorbo v eno in desetsekundne odseke.

Rezultati raziskav

Raziskava Costes idr. (2001) je proučevala spremembe TSI po štiritedenskem obdobju srednje intenzivnega kontinuiranega treninga. Uporabili so NIRS v kombinaciji z ventilacijskimi parametri in meritvami koncentracije laktata v krvi, pridobljenimi med dvema naporoma stalne intenzivnosti (50–80 % maksimalne aerobne moči [MAP]). Ugotovili so, da intervencija ni bistveno spremenila vzorca deoksigenacije na začetku vadbe in reoksigenacije po vadbi. Avtorji poročajo o manjšem obsegu spremembe TSI med vadbo pri intenzivnosti 80 % MAP po intervenciji. Ugotovljena je bila pomembna povezava med spremembami koncentracije laktata v krvi in razponom TSI med vadbo pri 80 % MAP. Poleg tega so zaznali povečano spremembo krvnega volumna (tHb) med vadbo po intervenciji, kar kaže na prilagoditev, povezano z neovaskularizacijo kapilar v mišičnem tkivu ter možnim povečanjem kapilarne gostote. Nadalje so poročali o bolj stabilnem vzorcu signala NIRS med vadbo pri 80 % MAP po intervenciji, medtem ko so vrednosti TSI kazale padajoči trend, obratno sorazmeren z naraščanjem koncentracije laktata v krvi med vadbo. To potrjuje, da je NIRS sposoben zaznati prilagoditve na trening,

povezane z izboljšano apilarizacijo delujoče mišice in izboljšanim usklajevanjem kapilarnega pretoka do delujočih mišic z njihovimi presnovnimi zahtevami. Avtorji sklenejo, da je mišični oksidativni metabolizem mogoče oceniti z uporabo NIRS, pri čemer ta izboljšava vpliva na spremenjen odziv koncentracije laktata v krvi.

Raziskava Buchheit in Ufland (2011) se je osredotočila na zaznavanje adaptacij na trening z večkratnimi sprinti in spremljanje zmogljivosti pri ponavljajočih se sprintih. Med posameznimi sprinti je bil uporabljen reoksigenacijski indeks (reoxerate). Trening je bil periodiziran, vključeval je kratke in dolge intervale pri 90–115 % maksimalne aerobne hitrosti (MAS) ter tudi samoregulirane zmerno intenzivne kontinuirane vadbene enote. Vrednosti TSI so spremljali med testom ponavljajočih se sprintov (dva 15-sekundna maksimalna sprinta s 15-sekundnim pasivnim okrevanjem) pred intervencijo in po njej. Mišična reoksigenacija je bila ocenjena z najnižjimi doseženimi vrednostmi med sprinti in najvišjimi doseženimi vrednostmi med 15-sekundnim okrevanjem ter med 90-sekundnim obdobjem po testu. Ugotovili so, da se je mišična reoksigenacija po intervenciji pomembno izboljšala, pri čemer so bile izboljšave močno povezane z izboljšanjem MAS ($r = 0,63$). Rezultati nakazujejo izboljšano oksidativno funkcijo mišic, povezano z izboljšano dostavo kisika med največjim naporom. Hitrejša reoksigenacija je lahko posledica izboljšane oksidativne kapacitete mišic ter izboljšane kapilarizacije, kar omogoča hitrejšo obnovo ravnovesja med dovodom in porabo kisika. Zanimivo je, da avtorji niso odkrili povezave med reoksigenacijskim indeksom in zmogljivostjo pri teku na deset kilometrov, vendar priznavajo, da na vzdržljivostno sposobnost vpliva več dejavnikov kot samo maksimalna aerobna funkcija (npr. MAS).

Študija Jones idr. (2015) je proučevala spremembe pri skupini visoko treniranih hokejistov, pri čemer so analizirali parametre mišične deoksigenacije med ponavljajočimi se sprinti na stacionarnem kolesu. Trening je vključeval dodatke ene vadbene enote intervalnega treninga sprintov k običajni obremenitvi,

sestavljene iz ponavljajočih se 60-sekundnih sprintov, ki so ustrezali maksimalni moči, doseženi med testiranjem, s 75-sekundnim aktivnim okrevanjem med napori. Po intervenciji so zaznali pomembno povečanje ΔTSI (velikost učinka [ES] = 0,75, $p < 0,05$) ter povečanje ΔHHb (ES = 0,65, $p < 0,05$). Poročajo tudi o izboljšanem, čeprav statistično nepomembnem času do dosega maksimalne desaturacije (ES = 0,53, $p = 0,07$) po intervenciji. Rezultati kažejo, da lahko intervalni trening sprintov povzroči pomembne in zaznavne spremembe pri visoko treniranih posameznikih (raven treniranosti 3 in 4). Povečanje ΔTSI pomeni povečano sposobnost mišic za ekstrakcijo kisika.

Caen idr. (2018) so si prizadevali proučiti povezavo med kritično močjo (CP), točko respiratorne kompenzacije (RCP) in izboljšanjem vadbenih pragov, določenih z metodo NIRS, po šestih tednih intervalnega kolesarskega treninga. Trening je obsegal šest ponovitev štiriminutnega kolesarjenja pri CP z vmesnimi tremi minutami aktivne regeneracije, ki je ustrezala intenzivnosti pri GET (angl. gas-exchange threshold). Rezultati so pokazali sočasno izboljšanje vseh navedenih kazalnikov maksimalnega stacionarnega stanja (RCP in CP), pri čemer so vse metode zaznavanja pokazale podobno stopnjo izboljšanja. Kljub temu so se delovne obremenitve, povezane s temi pragovi, med seboj občutno razlikovale, pri čemer se je prag, določen z NIRS (HHb), pojavil pri največji delovni obremenitvi.

V razširitvi študije iz leta 2018 so se Caen idr. (2019) osredotočili na učinek treninga na vadbene pragove mišične oksigenacije in amplitudo odziva. Proučevali so vrednosti TSI, O_2Hb , HHb in tHb med stopnjevanjem obremenitvenim kolesarskim testom do izčrpanosti pred intervencijo in po njej. Rezultati niso pokazali sprememb v skupni amplitudi TSI, vendar pa so opazili povečanje amplitude tHb in HHb. Te spremembe je mogoče pripisati s treningom povzročenim spremembam v difuzijski kapaciteti za O_2 in/ali konvektivni oskrbi s kisikom ter povečani kapilarni gostoti in prilagoditvam v nadzoru ciljne vazodilatacije, ki omogočajo boljšo redistribucijo krvi v aktivne

dele mišic. Zato je TSI počasneje upadel, kljub nespremenjeni amplitudi tega parametra.

Najnovejša študija v tem pregledu, Eserhaut idr. (2025), je 23 veslačic (raven 3) proučevala večkrat med tekmovalno sezono. TSI so spremljali na mišici *vastus lateralis* med stopnjevanim diskontinuiranim vadbenim protokolom, ki je obsegal sedem ponovitev po štiri minute veslanja. Cilj je bil proučiti povezave med vadbenimi pragovi, pridobljenimi z NIRS in meritvami laktata v krvi (LT_1 , LT_2 , TSI_{BP1} , TSI_{BP2}) med diskontinuiranim testom z naraščajočo obremenitvijo, ter ugotoviti, v kolikšnem obsegu se kinetika okrevanja med posameznimi stopnjami (reoxyslope) spreminja skozi sezono. Rezultati so pokazali pomembno povečanje naklona reoksigenacije (reoxyslope) med testom z naraščajočo obremenitvijo. Povprečne vrednosti reoxyslope so se zvišale tudi skozi tekmovalno sezono, kar kaže na uporabnost tega parametra za spremljanje prilagoditve športnic na trening. Primerjava vadbenih pragov, določenih z NIRS, je pokazala dobro ujezanje med LT_2 in TSI_{BP2} , medtem ko je TSI_{BP1} bistveno podcenil LT_1 . Avtorji poudarjajo razliko v metodologiji izračuna obeh pragov, saj pragovi, določeni z NIRS, ocenjujejo lokalno razpoložljivost O_2 , zato časovno prehitujejo sistemski porast laktata. Zanimiv vidik študije je ocena reoxyslope kot spremljevalnega parametra. Reoxyslope se med testom običajno povečuje, vendar kaže zmanjšan odziv v zadnji fazi testa. Povečanje reoxyslope z naraščajočo intenzivnostjo je pričakovano, saj mišično tkivo pri višji intenzivnosti kaže večjo afiniteto do O_2 . V zadnjih korakih testa pa je ta presnovni pogoj v okolici mišice lahko moten zaradi povečanja koncentracije laktata in vodikovih ionov. Povečana glikoliza vodi do preferenčnega prenosa laktata v mitohondrijsko matriko v primerjavi s kisikom. Druga zanimiva ugotovitev je, da reoxyslope potencialno odraža akutno adaptacijo na vadbeni program, kar je lahko posledica izboljšane kinetike presnove metabolitov, hitrejšje reperfuzije oksigenirane krvi v mikrokapilarna omrežja skeletnih mišic ter izboljšano zmogljivost za dostavo kisika.

■ RAZPRAVA

Namen te študije je bil celovito proučiti literaturo glede uporabe metode NIRS za longitudinalno spremljanje prilagoditev na trening v športu. Cilj je bil oblikovati pregled različnih pristopov, ki uporabljajo različne parametre in metodologije. Glavni ugotovitvi tega sistematičnega pregleda sta:

- a) parametri, pridobljeni z metodo NIRS, uspešno zaznavajo lokalne prilagoditve na trening,
- b) parametri, pridobljeni z metodo NIRS, kažejo podobne izboljšave kot bolj uveljavljeni sistemski kazalniki, vendar ponujajo vpogled le v lokalne, in ne sistemske prilagoditve.

Rezultati vključenih študij večinoma kažejo izboljšanje lokalnih prilagoditev na trening, vendar je bilo število vključenih študij majhno, poleg tega so bile večinoma metodološko podhranjene. Čeprav uporaba metode NIRS omogoča spremljanje več različnih parametrov, je bilo izboljšanje večinoma zaznano pri spremljivkah HHb in TSI. Tudi metode pri spremljanju prilagoditev na trening so se močno razlikovale. Nekatere študije so uporabljale testiranje s stopnjevanim obremenitvenim testom, medtem ko so se druge odločile za teste pri stalni obremenitvi z zmerno ali visoko intenzivnostjo, teste ponavljajočih se sprintov in vadbo s nespremenjeno obremenitvijo za določanje razlik v odzivu parametrov NIRS med submaksimalno vadbo v različnih območjih intenzivnosti.

Metodologija in pristop k zaznavanju sprememb se med izbranimi študijami precej razlikujeta. Uporaba HHb in TSI kot potencialnih spremenljivk za zaznavanje pozitivnih perifernih adaptacij je upravičena, saj HHb in TSI veljata za posredna kazalnika mikrovaskularne ekstrakcije kisika. Njuna uporabnost izhaja iz dejstva, da sta v primerjavi z O_2Hb manj občutljiva za lokalne spremembe krvnega volumna ter zato bolje odražata dinamične spremembe razmerja med oksigeniranimi in deoksigeniranimi kromofori v opazovanem mišičnem tkivu (Delorey idr., 2003). Poleg tega časovni potek HHb tesno sledi časovnemu profilu arteriovenske razlike v vsebnosti

kisika (mVO_2) po začetku mišične kontrakcije (Grassi idr., 2003). Zato je smiselno domnevati, da se HHb in TSI lahko uporabljata kot posredna kazalnika mikrovaskularne ekstrakcije kisika. Študija Ferreira idr. (2007) je proučevala dinamiko mikrovaskularne ekstrakcije kisika med postopnim naporom (stopnjevana vadba), da bi bolje razumeli fiziološke mehanizme tega odziva. Na kratko, dinamiko HHb med postopnim naporom določata predvsem mišični pretok krvi in arteriovenska razlika v vsebnosti kisika v delujoči mišici (Slika 1). Njihovi podatki kažejo, da je mikrovaskularna ekstrakcija kisika, merjena z NIRS (HHb), med vadbo nizke intenzivnosti odvisna predvsem od povečanja pretoka krvi. Ta povezava se, potem ko vadba preide v območje visoke intenzivnosti, postopno toliko upočasni, da kinetika mišičnega pretoka krvi in mVO_2 naraščata linearno pri velikih obremenitvah. To vodi do platoja vrednosti HHb in posledično do platoja mikrovaskularne ekstrakcije kisika, kar se kaže v sigmoidnem časovnem profilu krivulje HHb.

Vzdržljivostni trening povzroči več pozitivnih prilagoditev, ki se kažejo kot premik v desno v časovnem profilu HHb med stopnjevanim naporom. Uporaba HHb med stopnjevanim naporom za zaznavanje adaptacij na trening lahko zato strokovnjakom ponudi dodaten vpogled v fiziologijo športnika, saj pomeni dodatno perspektivo za analizo prilagoditev. Vzdržljivostni trening povzroči premik v desno časovnega profila sistema VO_2 in višje najvišje vrednosti, kar ponuja ključne informacije o profilu in zmogljivosti celotnega telesnega privzema kisika. Meritve z NIRS pa ponujajo drugačen vpogled, saj odražajo periferno kapaciteto ekstrakcije kisika (Ferreira idr., 2007). Premik tega profila v desno torej kaže na prilagoditve samo v perifernem delu žilnega sistema in mišičnem tkivu.

Te informacije lahko strokovnjaki neposredno uporabijo za spremljanje prilagoditev na trening, pri čemer upoštevajo tako sistemske kot lokalne adaptacije (pljučna kapaciteta, utripni volumen, žilne adaptacije in periferne adaptacije), da bolje razumejo, kateri tipi treninga povzročajo največje prilagoditve in kako to vpliva na vzdržljivost. Čeprav to ni bila

osrednja tema tega sistematičnega pregleda, so bile vrednosti HHb in TSI uporabljene kot markerji za ločevanje med visoko in zelo visoko intenzivnimi območji vadbe, kar dodatno potrjuje njihovo uporabnost pri spremljanju športnikov (Boone idr., 2016; Fontana idr., 2015; Iannetta idr., 2017; Sendra-Pérez idr., 2023).

Parametri, pridobljeni z NIRS med stopnjevanim obremenitvenim testom za spremljanje dolgoročnih intervencij, so se izkazali kot uporabni tudi v vključenih študijah. Obe študiji (Caen idr., 2018, 2019) sta pokazali, da se parametri NIRS izboljšajo vzporedno z izboljšanjem sistemskih kazalnikov aerobne telesne pripravljenosti (npr. $\text{VO}_{2\text{peak}}$). Konkretno so ugotovili, da se je TSI po intervenciji zmanjševal počasneje, medtem ko sta se amplituda HHb in tHb povečali, kar kaže na izboljšano mikrovaskularno ekstrakcijo kisika. To je v skladu z že opisanim teoretičnim okvirom adaptacije, saj so uporabljeni kazalniki pokazali tako premik časovnega profila v desno kot izboljšano amplitudo, to pa je vodilo do višjih maksimalnih vrednosti. Povečanje skupne amplitude HHb med postopnim naporom se nanaša predvsem na funkcionalne adaptacije na ravni delujočih mišic. Visoko intenzivni intervalni trening, ki so ga uporabili v študiji, je močno povezan s povečano vsebnostjo in funkcijo mitohondrijev v skeletnih mišicah (Dinenno idr., 2001; Jacobs idr., 2013). To poveča gradient parcialnega tlaka kisika med kapilarami in skeletnimi mišicami ter s tem kapaciteto ekstrakcije kisika.

Podobne fiziološke prilagoditve so bile opažene tudi v študiji, ki je za oceno adaptacij na trening uporabila napore submaksimalne intenzivnosti (Costes idr., 2001). Pred intervencijo je bil med vadbo z zmerno intenzivnostjo zaznan izrazit upad TSI, medtem ko je po intervenciji ostal na enaki ravni. Razlika v odzivu je bila pomembno povezana z odzivom koncentracije laktata v krvi, kar nakazuje, da so vrednosti TSI zrcalile odziv laktata v obratnem razmerju. Čeprav med obdobjema pred intervencijo in po njej ni bilo razlike v amplitudi signala TSI, je bila po intervenciji zaznana močno povečana prekrvavitev (posredno merjena z NIRS). Glede na rezultate študije Ferreira idr. (2007) lahko pričakujemo, da so

adaptacije v prekrvavitvi izrazitejše med vadbo nizke do zmerne intenzivnosti. Ti rezultati kažejo, da so prilagoditve na vadbo z zmerno intenzivnostjo večinoma povezane z izboljšanjem mikrovaskularne strukture, kar potrjujeta povečani prekrvavitev med vadbo in kapilarizacija, potrjena z mišično biopsijo. Povečana kapilarizacija verjetno poveča razmerje med kapilarami in mišičnimi vlakni, kar omogoča boljšo redistribucijo pretoka krvi v delujoče mišice med vadbo zmerne intenzivnosti, v nasprotju z adaptacijami, povezanimi z maksimalno kapaciteto ekstrakcije kisika. Zanimivo je, da se je po intervenciji povečala tudi aktivnost citrat sintaze, medtem ko aktivnost fosfofruktokinaze ni bila spremenjena, kar dodatno kaže na adaptacije skeletnih mišic, povezane z vadbo nižje intenzivnosti. Navedeno potrjuje tudi to, da ni bilo sprememb v vsebnosti fosfofruktokinaze, ki je omejitveni dejavnik moči glikolize (Atkinson in Walton, 1965).

Druge študije so proučevale uporabnost metode NIRS kot orodja za spremljanje prilagoditev skeletnih mišic med ponavljajočimi se maksimalnimi sprinti po vadbeni intervenciji (Buchheit in Ufland, 2011; Jones idr., 2015).

Študija Buchheit in Ufland (2011) je pokazala, da se je stopnja reoksigenacije TSI po intervenciji pomembno zvišala, medtem ko je bila najnižja vrednost reoksigenacije med sprinti nižja kot pred intervencijo. Te izboljšave so bile povezane z izboljšano največjo hitrostjo sprinta in sposobnostjo ponavljanja sprintov ($r = -0,52$ in $-0,4$), kar nakazuje, da izboljšana kinetika okrevanja v periferiji zmanjšuje upad zmogljivosti pri ponavljajočih se sprintih. Hitrejša reoksigenacija nakazuje izboljšano sposobnost uravnavanja ravnotežja med periferno oskrbo s kisikom in njegovo porabo, kar vodi v hitrejšo reoksigenacijo in obnovo fiziološkega ravnovesja. Avtorji so ugotovili, da izboljšanje v maksimalni aerobni hitrosti zmerno napoveduje izboljšave v stopnji reoksigenacije ($r = 0,63$), kar kaže, da so periferne izboljšave aerobne kapacitete povezane z izboljšanim okrevanjem med sprinti.

Podobno je študija (Jones idr., 2015) pokazala izboljšanje v amplitudi TSI, HHb in

O2Hb po vadbeni intervenciji. Prednost te študije je v uporabi paralelnih skupin v nasprotju z drugimi vključenimi študijami, pri katerih so raziskovali le eno skupino. Rezultati kažejo, da že vključitev ene dodatne vadbene enote intervalnega treninga sprintov povzroči pomembne periferne adaptacije v primerjavi s klasičnim vadbenim programom, uporabljenim v kontrolni skupini. Rezultati nakazujejo povečano kapaciteto mišične ekstrakcije kisika, kar potrjuje povečana amplituda izbranih parametrov po intervenciji.

Študija Eserhaut idr. (2025) se je osredotočila na drug vidik spremljanja športnikov, in sicer na povezavo med spremembami LT_1 in LT_2 ter ustreznimi pragovi, določenimi z metodo NIRS. Rezultati kažejo, da se prag TSI (natančneje TSI_{BP2}) ni razlikoval od LT_2 , medtem ko je TSI_{BP1} sistematično podcenjeval LT_1 . Čeprav so se rezultati osredotočali na izvedljivost določanja pragov z metodo NIRS v primerjavi z določanjem laktatnih pragov, kažejo, da se izboljšave v laktatni krivulji zrcalijo v parametrih, pridobljenih z NIRS. V nasprotju s prejšnjimi študijami, ki so proučevale povezavo med TSI, HHb in točko respiratorne kompenzacije, rezultati kažejo, da pragovi, določeni z NIRS, izkazujejo večjo variabilnost v primerjavi z določanjem laktatnih pragov. Ključna razlika je v pristopu k testiranju. Prejšnje študije, ki so poročale o višjih korelacijah in vrednostih intraklasnega korelacijskega koeficienta (ICC) med pragovi, določenimi z NIRS in ventilatornimi parametri, so uporabljale kontinuirani protokol z naraščajočo obremenitvijo, medtem ko je navedena študija uporabila diskontinuirani protokol veslanja (7×4 min). Literatura prikazuje širok razpon korelacij (od zmernih do visokih) med pragovi, določenimi z NIRS in ventilatornimi parametri, ter na splošno nižje korelacije pri primerjavi z laktatnimi pragovi. Ta razlika je lahko posledica tega, da se NIRS meri na kontinuiran način, podobno kot ventilatorni parametri, medtem ko se laktatni pragovi določajo z uporabo eksponentne funkcije za analizo podatkov. Ta razlika v pristopu k testiranju onemogoča natančno določitev, ali razlika izhaja iz laktatnih ali parametrov, določenih z NIRS.

V literaturi kot celoti in vključenih študijah (skupaj z neobjavljenimi podatki naše skupine) je mogoče opaziti več metodoloških razlik, pa tudi razlike v pristopu k določanju pragov in postavitvi senzorjev. Zato bi se prihodnje študije morale osredotočiti na razlike med laktatnimi, ventilatornimi in pragovi NIRS z uporabo stroge metodologije in standardiziranega pristopa, da bi bolje razumeli razloge za razlike med temi parametri. Skupno gledano parametri, pridobljeni z metodo NIRS, kažejo obetavne rezultate za spremljanje različnih perifernih adaptacij na različne vadbene intervencije. Potencial teh parametrov za uporabo pri spremljanju športnikov je jasno razviden iz izboljšanja, opaženega pri postopni vadbi, naporih s stalno submaksimalno obremenitvijo in protokolih ponavljajočih se sprintov. Čeprav so ti protokoli usmerjeni v različne kazalnike vzdržljivosti, se zdi, da so adaptacije podobne in periferno pogojene.

Ena izmed omejitev parametrov, pridobljenih z NIRS, je nezmožnost neposredne primerjave absolutnih vrednosti. Različni proizvajalci naprav uporabljajo različne metode izračuna in razpone, v katerih se ti indeksi lahko opazujejo. To onemogoča neposredno primerjavo vrednosti HHb in TSI, v nasprotju z ventilatornimi parametri. Te razlike so privedle do različnih pristopov k normalizaciji podatkov, pri čemer nekatere študije poročajo o absolutnih vrednostih, druge pa se odločajo za normalizacijo podatkov glede na razpon vrednosti (0–100 %), normalizacijo na izhodiščne vrednosti ali fiziološko kalibracijo z arterijsko okluzijo, kar dodatno otežuje neposredno primerjavo med študijami.

Majhno število vključenih študij poudarja potrebo po razširitvi raziskav o perifernih adaptacijah z uporabo metode NIRS v longitudinalnih študijah, da bi bolje razumeli temeljne fiziološke mehanizme ter zagotovili smernice za trenerje in strokovnjake. Parametri NIRS se kažejo zelo uporabni kot dopolnilo ventilatornim ali drugim kazalnikom, kar bi omogočilo dodaten vpogled v fiziologijo posameznega športnika in prispevalo k napredku na tem področju.

■ ZAKLJUČEK

Uporaba NIRS izkazuje velik potencial za uporabo skupaj z bolj uveljavljenimi kazalniki (npr. laktat, VO_2 , obremenitev). Naši rezultati kažejo, da je parametre NIRS mogoče uporabiti za zaznavanje specifičnih perifernih adaptacij, povezanih z regulacijo porazdelitve krvi v delujoče mišice, lokalno kapilarizacijo in kapaciteto ekstrakcije kisika v skeletnih mišicah. Uporaba parametrov NIRS lahko skupaj z drugimi uveljavljenimi kazalniki strokovnjakom pri spremljanju športnikov omogoči globlji vpogled v naravo teh adaptacij ter boljše razumevanje fiziologije posameznega športnika in odziva na različne tipe vzdržljivostnega treninga. Kljub obetavnim rezultatom sta za prenos v prakso potrebna standardizacija metodoloških pristopov pri merjenju in večje število kakovostnih raziskav.

Omejitveni dejavniki

Čeprav ta sistematični pregled obsega celovit pregled longitudinalnih študij, je treba priznati več omejitev. Prvič, vključene so bile le študije, pri katerih je intervencija trajala štiri tedne ali več. Tako so bile izključene študije s krajšim trajanjem intervencij in omejeno število vključenih raziskav. Drugič, zaradi razlik v pristopu k testiranju ni bilo mogoče izvesti kvantitativne primerjave parametrov NIRS pred intervencijo in po njej, zato smo se odločili za kvalitativni pristop. Prihodnje študije bi se morale osredotočiti na specifično testno metodologijo, da bi omogočile lažjo primerjavo in boljši vpogled v izvedljivost uporabe NIRS za spremljanje športnikov, ob predpostavki, da se literatura razširi z ustreznimi raziskavami.

Tretjič, zanesljivost in veljavnost parametrov NIRS za določanje pragov ter njihova dnevna variabilnost za zdaj niso povsem jasne. Neobjavljeni podatki naše raziskovalne skupine kažejo vrednosti ICC = 0,33 za meddnevne razlike v izhodiščnih vrednostih TSI. Vrednosti v mirovanju so lahko pod vplivom različnih dejavnikov in lahko predstavljajo pristranskost pri normalizaciji podatkov na izhodiščne vrednosti. Razpoložljiva literatura kaže tudi, da je pri interpretaciji maksimalnih ali minimalnih vrednosti med različnimi dnevi potrebna previdnost (Desanlis idr.,

2022). Ena izmed študij o meddnevni variabilnosti je pokazala koeficient variacije (CV) 0,6–4 % za TSI, kar kaže, da so manjše razlike v vrednostih TSI lahko posledica inherentne dnevne variabilnosti (Biddulph idr., 2023).

■ LITERATURA

1. Atkinson, D. E., in Walton, G. M. (1965). Kinetics of Regulatory Enzymes. *Journal of Biological Chemistry*, 240(2), 757–763. [https://doi.org/10.1016/S0021-9258\(17\)45240-9](https://doi.org/10.1016/S0021-9258(17)45240-9)
2. Barstow, T. J. (2019). Understanding near infrared spectroscopy and its application to skeletal muscle research. *Journal of Applied Physiology*, 126(5), 1360–1376. <https://doi.org/10.1152/jappphysiol.00166.2018>
3. Biddulph, B., Morris, J. G., Lewis, M., Hunter, K., in Sunderland, C. (2023). Reliability of Near-Infrared Spectroscopy with and without Compression Tights during Exercise and Recovery Activities. *Sports*, 11(2), 23. <https://doi.org/10.3390/sports11020023>
4. Boone, J., Barstow, T. J., Celie, B., Prieur, F., in Bourgois, J. (2016). The interrelationship between muscle oxygenation, muscle activation, and pulmonary oxygen uptake to incremental ramp exercise: influence of aerobic fitness. *Applied Physiology, Nutrition, and Metabolism*, 41(1), 55–62. <https://doi.org/10.1139/apnm-2015-0261>
5. Buchheit, M., in Ufland, P. (2011). Effect of endurance training on performance and muscle reoxygenation rate during repeated-sprint running. *European Journal of Applied Physiology*, 111(2), 293–301. <https://doi.org/10.1007/s00421-010-1654-9>
6. Caen, K., Vermeire, K., Bourgois, J. G., in Boone, J. (2018). Exercise Thresholds on Trial: Are They Really Equivalent? *Medicine & Science in Sports & Exercise*, 50(6), 1277–1284. <https://doi.org/10.1249/MSS.0000000000001547>
7. Caen, K., Vermeire, K., Pogliaghi, S., Moerman, A., Niemeijer, V., Bourgois, J. G., in Boone, J. (2019). Aerobic Interval Training Impacts Muscle and Brain Oxygenation Responses to Incremental Exercise. *Frontiers in Physiology*, 10. <https://doi.org/10.3389/fphys.2019.01195>
8. Coates, A. M., Joyner, M. J., Little, J. P., Jones, A. M., in Gibala, M. J. (2023). A Perspective on High-Intensity Interval Training for Performance and Health. *Sports Medicine* 2023 53:1, 53(1), 85–96. <https://doi.org/10.1007/S40279-023-01938-6>
9. Costes, F., Prieur, F., Feasson, L., Geyssant, A., Barthelemy, J.-C., in Denis, C. (2001). Influence of training on NIRS muscle oxygen saturation during submaximal exercise. *Medicine & Science in Sports & Exercise*, 33(9), 1484–1489. <https://doi.org/10.1097/00005768-200109000-00010>

10. Delorey, D. S., Kowalchuk, J. M., Paterson, D. H., in Paterson, D. H. (2003). Relationship between pulmonary O_2 uptake kinetics and muscle deoxygenation during moderate-intensity exercise. *J Appl Physiol*, 95, 113–120. <https://doi.org/10.1152/jappphysiol.00956.2002>-The
11. Desanlis, J., Gordon, D., Calveyrac, C., Cottin, F., in Gernigon, M. (2022). Intra- and Inter-Day Reliability of the NIRS Portamon Device after Three Induced Muscle Ischemias. *Sensors*, 22(14), 5165. <https://doi.org/10.3390/s22145165>
12. Dinunno, F. A., Tanaka, H., Monahan, K. D., Clevenger, C. M., Eskurza, I., DeSouza, C. A., in Seals, D. R. (2001). Regular endurance exercise induces expansive arterial remodelling in the trained limbs of healthy men. *The Journal of Physiology*, 534(1), 287–295. <https://doi.org/10.1111/j.1469-7793.2001.00287.x>
13. Eserhaut, D. A., DeLeo, J. M., Provost, J. A., Ackerman, K. E., in Fry, A. C. (2025). Monitoring skeletal muscle oxygen saturation kinetics during graded exercise testing in NCAA division I female rowers. *Frontiers in Physiology*, 16. <https://doi.org/10.3389/fphys.2025.1538465>
14. Ferreira, L. F., Koga, S., in Barstow, T. J. (2007). Dynamics of noninvasively estimated microvascular O_2 extraction during ramp exercise. *Journal of Applied Physiology*, 103(6), 1999–2004. <https://doi.org/10.1152/jappphysiol.01414.2006>
15. Ferreira, L. F., Townsend, D. K., Lutjemeier, B. J., in Barstow, T. J. (2005). Muscle capillary blood flow kinetics estimated from pulmonary O_2 uptake and near-infrared spectroscopy. *Journal of Applied Physiology*, 98(5), 1820–1828. <https://doi.org/10.1152/jappphysiol.00907.2004>
16. Fontana, F. Y., Keir, D. A., Bellotti, C., De Roia, G. F., Murias, J. M., in Pogliaghi, S. (2015). Determination of respiratory point compensation in healthy adults: Can non-invasive near-infrared spectroscopy help? *Journal of Science and Medicine in Sport*, 18(5), 590–595. <https://doi.org/10.1016/j.jsams.2014.07.016>
17. Grassi, B., Pogliaghi, S., Rampichini, S., Quaresima, V., Ferrari, M., Marconi, C., in Cerretelli, P. (2003). Muscle oxygenation and pulmonary gas exchange kinetics during cycling exercise on-transitions in humans. *Journal of Applied Physiology*, 95(1), 149–158. <https://doi.org/10.1152/jappphysiol.00695.2002>
18. Iannetta, D., Qahtani, A., Mattioni Maturana, F., in Murias, J. M. (2017). The near-infrared spectroscopy-derived deoxygenated haemoglobin breaking-point is a repeatable measure that demarcates exercise intensity domains. *Journal of Science and Medicine in Sport*, 20(9), 873–877. <https://doi.org/10.1016/j.jsams.2017.01.237>
19. Jacobs, R. A., Flück, D., Bonne, T. C., Bürgi, S., Christensen, P. M., Toigo, M., in Lundby, C. (2013). Improvements in exercise performance with high-intensity interval training coincide with an increase in skeletal muscle mitochondrial content and function. *Journal of Applied Physiology*, 115(6), 785–793. <https://doi.org/10.1152/jappphysiol.00445.2013>
20. Jones, B., Hamilton, D. K., in Cooper, C. E. (2015). Muscle Oxygen Changes following Sprint Interval Cycling Training in Elite Field Hockey Players. *PLOS ONE*, 10(3), e0120338. <https://doi.org/10.1371/journal.pone.0120338>
21. Lachman, M. E. (2001). Adult Development, Psychology of. *International Encyclopedia of the Social & Behavioral Sciences*, 135–139. <https://doi.org/10.1016/B0-08-043076-7/01650-8>
22. McKay, A. K. A., Stellingwerff, T., Smith, E. S., Martin, D. T., Mujika, I., Goosey-Tolfrey, V. L., Sheppard, J., in Burke, L. M. (2022). Defining Training and Performance Caliber: A Participant Classification Framework. *International Journal of Sports Physiology and Performance*, 17(2), 317–331. <https://doi.org/10.1123/ij-spp.2021-0451>
23. Orcioli-Silva, D., Beretta, V. S., Santos, P. C. R., Rasteiro, F. M., Marostegan, A. B., Vitória, R., Gobatto, C. A., in Manchado-Gobatto, F. B. (2024). Cerebral and muscle tissue oxygenation during exercise in healthy adults: A systematic review. *Journal of Sport and Health Science*, 13(4), 459–471. <https://doi.org/10.1016/j.jshs.2024.03.003>
24. Perrey, S. (2022). Muscle Oxygenation Unlocks the Secrets of Physiological Responses to Exercise: Time to Exploit it in the Training Monitoring. *Frontiers in Sports and Active Living*, 4. <https://doi.org/10.3389/fspor.2022.864825>
25. Perrey, S., in Ferrari, M. (2018). Muscle Oximetry in Sports Science: A Systematic Review. *Sports Medicine*, 48(3), 597–616. <https://doi.org/10.1007/s40279-017-0820-1>
26. Perrey, S., Quaresima, V., in Ferrari, M. (2024). Muscle Oximetry in Sports Science: An Updated Systematic Review. *Sports Medicine*, 54(4), 975–996. <https://doi.org/10.1007/s40279-023-01987-x>
27. Rasica, L., Inglis, E. C., Mazzolari, R., Iannetta, D., in Murias, J. M. (2024). Methodological considerations on near-infrared spectroscopy derived muscle oxidative capacity. *European Journal of Applied Physiology*, 124(7), 2069–2079. <https://doi.org/10.1007/s00421-024-05421-6>
28. Sendra-Pérez, C., Sanchez-Jimenez, J. L., Marzano-Felisatti, J. M., Encarnación-Martínez, A., Salvador-Palmer, R., in Priego-Quesada, J. I. (2023). Reliability of threshold determination using portable muscle oxygenation monitors during exercise testing: a systematic review and meta-analysis. *Scientific reports*, 13(1). <https://doi.org/10.1038/s41598-023-39651-Z>

Simon Iskra, mag. kin.
Fakulteta za šport, Univerza v Ljubljani
simon.iskra@fsp.uni-lj.si