



Sveučilište u Zagrebu
KINEZIOLOŠKI FAKULTET

Marina Banović

**UTJECAJ INTRAVENSKE PRIMJENE
MAGNEZIJA NA POKAZATELJE
AEROBNOGA I ANAEROBNOGA
KAPACITETA**

DOKTORSKI RAD

Zagreb, 2026.



University of Zagreb
FACULTY OF KINESIOLOGY

Marina Banović

**INFLUENCE OF INTRAVENOUS
MAGNESIUM ADMINISTRATION ON
AEROBIC AND ANAEROBIC CAPACITY
INDICATORS**

DOCTORAL THESIS

Zagreb, 2026



Sveučilište u Zagrebu
KINEZIOLOŠKI FAKULTET

Marina Banović

**UTJECAJ INTRAVENSKE PRIMJENE
MAGNEZIJA NA POKAZATELJE
AEROBNOGA I ANAEROBNOGA
KAPACITETA**

DOKTORSKI RAD

Mentor: izv.prof.dr.sc. Vlatko Vučetić
Komentor: prof. dr. sc. Višnja Nesek Adam, prim. dr. med.

Zagreb, 2026.



University of Zagreb
FACULTY OF KINESIOLOGY

Marina Banović

**INFLUENCE OF INTRAVENOUS
MAGNESIUM ADMINISTRATION ON
AEROBIC AND ANAEROBIC CAPACITY
INDICATORS**

DOCTORAL THESIS

Mentors: Prof. Vlatko Vučetić, PhD
Prof. Višnja Nesek Adam, PhD

Zagreb, 2026

ŽIVOTOPISI MENTORA I KOMENTORICE

Vlatko Vučetić rođen je 16. veljače 1974. godine u Zagrebu. Diplomirao je 2001. godine na Fakultetu za fizičku kulturu (danas Kineziološki fakultet Sveučilišta u Zagrebu), gdje je 2007. godine stekao titulu doktora znanosti iz područja kineziologije obranom disertacije „*Razlike u pokazateljima energetske kapaciteta trkača dobivenih različitim protokolima opterećenja*“.

Od 1999. godine sudjeluje u radu Sportskog dijagnostičkog centra Kineziološkog fakulteta Sveučilišta u Zagrebu, a danas je njegov voditelj. Na Kineziološkom fakultetu zaposlen je od 2002. godine, gdje sudjeluje u nastavi te je nositelj više kolegija iz područja opće i primijenjene kineziologije. Također je stalni predavač na Nogometnoj akademiji Hrvatskog nogometnog saveza.

Autor je i koautor više od 200 znanstvenih i stručnih publikacija, uključujući 27 znanstvenih radova objavljenih u međunarodnim citatnim bazama. Do sada je mentorirao više od 50 diplomskih radova te sudjelovao kao mentor ili komentor u tri doktorske disertacije. Njegov znanstveni interes usmjeren je na kondicijsku pripremu sportaša, analizu ventilacijskih i metaboličkih parametara te evaluaciju energetske kapaciteta, s posebnim naglaskom na nogomet.

Višnja Neseck Adam specijalistica je anesteziologije, reanimatologije i intenzivnog liječenja, subspecijalistica intenzivne medicine te specijalistica hitne medicine. U zvanje redovite profesorice izabrana je 2020. godine. Od 2012. godine pročelnica je Zavoda za hitnu medicinu Kliničke bolnice Sveti Duh u Zagrebu, a od 2014. godine obnaša dužnost predstojnice Klinike za anesteziologiju, reanimatologiju i intenzivno liječenje iste ustanove.

Značajan dio profesionalne karijere posvetila je obrazovanju i mentorstvu. Mentorirala je više od 100 diplomskih radova te pet doktorskih disertacija. Autorica je i koautorica više od 145 znanstvenih i stručnih radova, od kojih je 75 indeksirano u bazama CC, SCI i SCIE.

Objavila je ukupno 18 knjiga i monografija (14 stručnih knjiga i priručnika te 4 monografije) iz područja anesteziologije, intenzivne i hitne medicine, kao i više od 30 poglavlja u knjigama. Aktivno sudjeluje u razvoju nacionalnih edukacijskih programa i kliničkih smjernica. Bila je pozvani predavač i sudjelovala na više od 200 stručnih i znanstvenih skupova u Hrvatskoj i inozemstvu, čime je značajno doprinijela razvoju stručne i znanstvene zajednice u području anesteziologije i hitne medicine. Aktivno sudjeluje u međunarodnim znanstvenim projektima i stručnim suradnjama, osobito u okviru Europskog društva za hitnu medicinu (EUSEM).

Od 2024. godine osnivačica je i glavna urednica znanstvenog časopisa *Annales Medicinae Urgentis*, čija je misija poticanje razmjene znanstvenih ideja, unaprjeđenje znanstvene rasprave i jačanje kliničke prakse s ciljem poboljšanja ishoda liječenja bolesnika.

ZAHVALA

- tekst zahvale naknadno

SADRŽAJ

ŽIVOTOPISI MENTORA I KOMENTORICE	i
ZAHVALA	iii
SAŽETAK	vi
ABSTRACT	vii
1. UVOD	1
2. PREGLED LITERATURE	5
2.1. Fiziološke osnove djelovanja magnezija	5
2.2. Status magnezija u općoj populaciji i u sportaša	7
2.3. Magnezij i sportska izvedba – sažetak dosadašnjih studija	9
2.4. Metabolizam magnezija tijekom različitih vrsta napora	11
2.4.1. Sprint i eksplozivni naponi	11
2.4.2. Srednjeprugaške discipline i laktatna tolerancija	11
2.4.3. Izdržljivost i aerobni metabolizam	12
2.5. Metode procjene sportske izvedbe u visokointenzivnom naporu	12
2.5.1. TLim test	12
2.5.2. Respiracijski omjer i njegova interpretacija u visokointenzivnom naporu	14
2.6. Bronhodilatacijski učinci magnezija i implikacije za sportsku izvedbu	15
2.7. Oralna suplementacija magnezijem; dizajn studija i rezultati	16
2.7.1. Aerobni kapacitet i izdržljivost	16
2.7.2. Eksplozivnost i mišićna jakost	16
2.7.3. Starija populacija i funkcionalna izvedba	17
2.7.4. Mehanizmi ergogenog djelovanja i spoznaje iz životinjskih modela	17
2.8. Intravenska primjena magnezija; farmakokinetika i farmakodinamika	18
2.9. Sažetak dosadašnjih spoznaja i istraživački jaz	20
3. CILJEVI ISTRAŽIVANJA I HIPOTEZE	23
3.1. Ciljevi istraživanja	23
3.2. Hipoteze istraživanja	23
4. METODE	24
4.1. Ispitanici	24
4.2. Randomizacija i zaslijepljivanje	25
4.3. Laboratorijski uvjeti i kontrola vanjskih varijabli	25
4.4. Spiroergometrijsko testiranje (KF1 protokol)	26
4.5. Test izdržaja pri $\dot{V}O_{2\max}$ (Tlim test)	27
4.6. Obrada podataka i statistička analiza	29
5. REZULTATI	30
5.1. Opis uzorka	30
5.2. Rezultati inicijalnog spiroergometrijskog testiranja	32
5.3. Vrijeme izdržaja u TLim testu	33
5.3.1. Vrijeme izdržaja izraženo u sekundama	33

5.3.2.	Vrijeme izdržaja izraženo u prijeđenoj udaljenosti	34
5.4.	Vrijeme do postizanja maksimalnog respiracijskog omjera (tRER)	35
5.5.	Ventilacijski i respiracijski parametri	36
5.5.1.	Relativni primitak kisika ($RVO_2\text{max}$) tijekom TLim testa	36
5.5.2.	Apsolutni primitak kisika ($VO_2\text{max}$) tijekom TLim testa	37
5.5.3.	Maksimalna proizvodnja ugljikova dioksida ($VCO_2\text{max}$) tijekom TLim testa	39
5.5.4.	Maksimalna minutna ventilacija ($VE\text{max}$) tijekom TLim testa	40
5.5.5.	Maksimalni dišni volumen ($VT\text{max}$) tijekom TLim testa	41
5.5.6.	Maksimalna frekvencija disanja ($BF\text{max}$) tijekom TLim testa	41
5.5.7.	Sažetak rezultata	42
5.6.	Maksimalna frekvencija srca ($HR\text{max}$) tijekom TLim testa	43
5.7.	Metabolički parametri	44
5.7.1.	Koncentracija laktata	44
5.7.2.	Koncentracija glukoze	46
6.	RASPRAVA	49
6.1.	Učinak intravenske primjene magnezija na vrijeme izdržaja tijekom TLim testa	49
6.2.	Vrijeme do postizanja maksimalnog respiracijskog omjera (tRER) kao pokazatelj metaboličke tolerancije	51
6.3.	Anaerobni metabolički odgovor; koncentracija laktata	52
6.4.	Glikemijski odgovor	55
6.5.	Ventilacijski i respiratorno-metabolički odgovor	56
6.6.	Kardiovaskularni odgovor	61
6.7.	Subjektivni doživljaj napora	62
7.	ZAKLJUČCI	64
8.	OGRANIČENJA ISTRAŽIVANJA	66
9.	PRAKTIČNE I ZNANSTVENE IMPLIKACIJE	68
10.	REFERENCE	70
11.	POPIS KRATICA I OZNAKA	75
12.	ŽIVOTOPIS AUTORICE	77

SAŽETAK

Uvod:

Magnezij je esencijalni mineral uključen u regulaciju energetskeg metabolizma, neuromuskularne ekscitabilnosti i kardiovaskularne funkcije. Iako je njegova uloga u sportu najčešće ispitivana kroz oralnu suplementaciju, podatci o učincima akutne intravenske primjene magnezija na sportsku izvedbu su ograničeni.

Cilj:

Cilj ovog istraživanja bio je utvrditi utječe li akutna intravenska primjena magnezija neposredno prije opterećenja na pokazatelje aerobnoga i anaerobnoga energetskeg kapaciteta te na sportsku izvedbu tijekom testa izdržaja do iscrpljenja pri konstantnoj brzini (TLim test).

Metode:

Provedeno je prospektivno, randomizirano, single-blind crossover istraživanje na uzorku treniranih atletičara. Svi ispitanici proveli su inicijalno progresivno spiroergometrijsko testiranje (KF1) radi određivanja maksimalnog primitka kisika i brzine trčanja pri VO_{2max} (vVO_{2max}). Nakon toga su u dva navrata izveli TLim test pri brzini vVO_{2max} , jednom nakon intravenske primjene magnezija, a jednom nakon primjene placeba, uz razdoblje ispiranja od tri dana. Praćeni su ventilacijski, kardiovaskularni i metabolički parametri, uključujući vrijeme izdržaja, respiracijski omjer, koncentracije laktata i glukoze te subjektivni dojam napora.

Rezultati:

Akutna intravenska primjena magnezija dovela je do statistički značajnog produljenja vremena izdržaja tijekom TLim testa te produljenja vremena do postizanja maksimalnog respiracijskog omjera. Nisu utvrđene razlike u maksimalnom aerobnom kapacitetu, ventilacijskim i kardiovaskularnim parametrima, kao ni u koncentracijama laktata i glukoze tijekom ranog oporavka. Većina ispitanika subjektivno je TLim test u uvjetu s magnezijem doživjela kao lakši za izvođenje.

Zaključak:

Akutna intravenska primjena magnezija ne povećava aerobni ni anaerobni energetskeg kapacitet, ali može poboljšati toleranciju visokointenzivnog napora, što se očituje produljenjem vremena izdržaja i promjenom metaboličke dinamike tijekom opterećenja.

Ključne riječi: magnezij; TLIM test; intravenska primjena; tolerancija napora; sportska izvedba

ABSTRACT

Background:

Magnesium is an essential mineral involved in the regulation of energy metabolism, neuromuscular excitability, and cardiovascular function. In sports science, its effects have predominantly been investigated through oral supplementation, whereas data on the acute effects of intravenous magnesium administration on exercise performance are limited.

Aim:

The aim of this study was to determine whether acute intravenous magnesium administration prior to exercise affects indicators of aerobic and anaerobic energy capacity and exercise performance during a time-to-exhaustion test performed at a constant speed (TLim test).

Methods:

We conducted as a prospective, randomized, single-blind crossover trial in a trained athletic population. All participants completed an initial progressive cardiopulmonary exercise test (KF1) to determine maximal oxygen uptake and running velocity at VO_2max (vVO_2max). Subsequently, each participant performed two TLim tests at vVO_2max , once following intravenous magnesium administration and once following placebo administration, with a three-day wash-out period between trials. Ventilatory, cardiovascular, and metabolic parameters were recorded, including time to exhaustion, respiratory exchange ratio, blood lactate and glucose concentrations, and subjective perception of effort.

Results:

Acute intravenous magnesium administration resulted in a statistically significant prolongation of time to exhaustion during the TLim test and a delayed attainment of maximal respiratory exchange ratio. No significant differences were observed in maximal aerobic capacity, ventilatory or cardiovascular parameters, or blood lactate and glucose concentrations during early recovery. The majority of participants subjectively perceived the TLim test performed after magnesium administration as easier compared with the placebo condition.

Conclusion:

Acute intravenous magnesium administration does not enhance aerobic or anaerobic energy capacity but may improve tolerance to high-intensity exercise, as reflected by prolonged time to exhaustion and altered metabolic dynamics during exertion.

Keywords: magnesium; time-to-exhaustion test; intravenous administration; exercise tolerance; sports performance

1. UVOD

Magnezij (Mg) je esencijalni mineral i kao takav je neophodan za pravilno funkcioniranje ljudskog organizma, osobito u kontekstu metabolizma, neuromuskularne aktivnosti i kardiovaskularne regulacije. Kao kofaktor u više od 300 enzimskih reakcija, magnezij sudjeluje u sintezi proteina i nukleotida, regulaciji stanične signalizacije te održavanju ionske i membranske stabilnosti (Bohl & Volpe, 2002; Newhouse & Finstad, 2000). Njegova je uloga posebno izražena u mišićnom i živčanom sustavu jer omogućuje odvijanje niza procesa koji neposredno određuju funkcionalni kapacitet sportaša.

Jedna od temeljnih biokemijskih značajki magnezija jest njegova povezanost s adenozin-trifosfatom (ATP): fiziološki aktivan ATP u stanici postoji kao Mg-ATP kompleks (Mildvan, 1987). Stoga magnezij izravno utječe na sve energetske procese koji podržavaju mišićnu kontrakciju i relaksaciju, a time i na sposobnost generiranja sile, održavanja razine napora i brzinu oporavka. Romani (2011) opisuje ulogu magnezija u regulaciji kalcijevog toka kroz staničnu membranu i sarkoplazmatski retikulum. Magnezij modulira neuromuskularnu ekscitabilnost i doprinosi stabilnosti ekscitacijsko–kontraktilne sprege. Ovi su mehanizmi ključni tijekom visokointenzivnih napora u kojima potrebna optimalna učinkovitost mišićnih vlakana.

U kardiovaskularnom sustavu magnezij djeluje kao prirodni antagonist kalcija, pridonoseći regulaciji vaskularnog tonusa i održavanju perifernog protoka krvi. Altura i Altura (1994) navode da magnezij inhibira kontraktilni odgovor glatke muskulature krvnih žila i potiče vazodilataciju, što može biti od izravne važnosti u sportskim aktivnostima koje zahtijevaju stabilnu cirkulaciju i opskrbu tkiva kisikom. Dodatno, putem ATP-ovisne sinteze glutaciona magnezij sudjeluje u procesima antioksidacije (Uwitonze & Razzaque, 2018), što je važno pri zaštiti mišića od oksidacijskog stresa izazvanog intenzivnom fizičkom aktivnošću.

Homeostaza magnezija održava se zajedničkim djelovanjem crijevne apsorpcije, koštanog depozitnog sustava i bubrežne regulacije. Samo mali udio ukupnog magnezija nalazi se u plazmi (1–3 %), što otežava procjenu ukupnog statusa ovog minerala (de Baaij et al., 2015). Serumske vrijednosti stoga često ne odražavaju stvarne tjelesne zalihe, a subklinička hipomagnezijemija može proći nezapaženo. Zbog toga se propituje mjerenje razine serumskog magnezija ili zagovara redefiniranje donje granice referentnog raspona (Rosanoff et al., 2022), osobito kod populacija s povećanim metaboličkim zahtjevima.

Sportaši su izloženi intenzivnom mišićnom radu, povećanom znojenju i visokom energetske prometu te su osobito osjetljivi na poremećaje u statusu magnezija. Volpe (2015) napominje da prehrambeni unos često ne prati povećane potrebe povezane s treninzima i natjecanjima. U velikoj longitudinalnoj studiji provedenoj na elitnim britanskim atletičarima, Pollock i suradnici (2020) su dokumentirali stanični deficit magnezija u 22 % ispitanika, čime su istaknuli važnost nadzora mineralnog statusa u visoko treniranih sportaša. Slične nalaze donose i Zhang i suradnici (2017), pokazujući da sportaši u odnosu na nesportaše češće imaju niže serumske koncentracije i veću urinarnu ekskreciju, što odražava kronično povećanu potrošnju. Dominguez i suradnici (2025) dodatno upozoravaju na međudjelovanje magnezija i vitamina D u održavanju mišićne funkcije, metabolizma i integriteta koštanog tkiva.

S obzirom na središnju ulogu magnezija u energetske, metaboličke i neuromuskularnoj funkciji, brojne studije nastojale su utvrditi doprinos suplementacije magnezijem sportske izvedbi, ali rezultati su neujednačeni. Newhouse i Finstad (2000) nisu pronašli konzistentni ergogeni učinak, dok Heffernan (2019) potvrđuje poboljšanja u mišićnoj snazi i eksplozivnosti. Wang i suradnici (2017)) zaključuju da se korist uglavnom pojavljuje u kod osoba koje su imale inicijalni deficit te upozoravaju da se učinak ne opaža u sportaša s urednim laboratorijskim nalazima magnezija. Ovi nalazi ukazuju na to da učinak suplementacije ovisi o mnogobrojnim čimbenicima, uključujući razinu treniranosti, početnu koncentraciju magnezija u serumu i vrstu opterećenja.

Oralna suplementacija, iako najčešće istraživana, ima važna ograničenja: saturabilnu apsorpciju, varijabilnu bioraspoloživost i potrebu za dugotrajnijom primjenom. Time je njezina primjena neprikladna za ispitivanje akutnih učinaka neposredno prije sportskog napora. Za razliku od toga, intravenska primjena omogućuje precizno i brzo povećanje koncentracije ioniziranog magnezija, što je potvrđeno farmakokinetičkim studijama (Fawcett et al., 1999; Connolly & Worthley, 1999; Lu & Nightingale, 2000). Brza distribucija i predvidljiva eliminacija omogućuju istraživanje kratkoročnih fizioloških učinaka koji se ne mogu postići oralnim putem.

Klinička istraživanja dodatno ukazuju na potencijalne koristi intravenske primjene magnezija. U medicini je zabilježen njegov bronhodilatacijski učinak, koji uključuje smanjenje kontraktilnosti glatke muskulature bronha, modulaciju kolinergičkog tonusa i smanjenje upalne reaktivnosti (Ni et al., 2022; Amaral et al., 2012; Song & Chang, 2012.; Cairns & Kraft, 1996; Hashimoto et al., 2000.). Iako su ovi učinci istraživani u kliničkim populacijama, rezultati ukazuju na potencijalnu važnost u sportovima s visokim ventilacijskim zahtjevima.

Unatoč fiziološkoj osnovi, u dosadašnjoj literatura postoji nedostatak istraživanja o učinku intravenske primjene magnezija u sportu. Pregledni radovi (Zhang et al., 2017; Tarsitano et al., 2024) potvrđuju da ne postoji kontrolirano istraživanje koje ispituje akutni ergogeni učinak intravenske primjene magnezija u zdravih sportaša. Dosadašnje spoznaje temelje se na oralnim intervencijama ili na intravenskoj primjeni u kliničkim stanjima s pacijentima, pri čemu se sportski ishodi ne mogu izravno ekstrapolirati, tako da ovaj nedostatak literaturnih podataka predstavlja istraživački jaz. Budući da sportaši često traže intervencije koje pružaju brzi, akutni učinak neposredno prije natjecanja, a fiziološki mehanizmi djelovanja intravenskog magnezija pružaju uvjerljivu teorijsku podlogu, postoji opravdana potreba za sustavnim ispitivanjem njegovog učinka na sportsku izvedbu. Stoga je cilj ove disertacije ispitati može li intravenska primjena jednog grama (1g) magnezijevog sulfata neposredno prije visokointenzivne aktivnosti poboljšati sportsku izvedbu treniranih atletičara modeliranjem parametara aerobnoga i anaerobnoga energetske kapaciteta, te identificirati moguće mehanizme koji bi takav učinak mogli objasniti.

Time se otvara važno istraživačko pitanje: može li se poznati akutni fiziološki učinak intravenski primijenjenog magnezija (brza promjena serumske i ionizirane koncentracije, učinak na neuromuskularnu funkciju i cirkulaciju) iskoristiti za poboljšanje sportske izvedbe u uvjetima visokointenzivnog opterećenja?

Temelji istraživanja za ovu disertaciju polaze od:

1. ključne uloge magnezija u energetske metabolizmu, neuromuskularnoj funkciji i kardiovaskularnoj regulaciji i dokaza da je suboptimalni status magnezija relativno čest nalaz u sportaša i može negativno utjecati na izvedbu i povećati rizik nastanka ozljeda
2. heterogenih rezultata studija s oralnom suplementacijom, koje sugeriraju da ergogeni učinak ovisi o početnom nalazu i doziranju
3. farmakokinetičkih prednosti intravenske primjene (brzo i predvidljivo postizanje vršnih koncentracija, mogućnost preciznog vremenskog usklađivanja s opterećenjem)
4. činjenice da do sada, prema dostupnoj literaturi, nije objavljeno kontrolirano istraživanje akutne intravenske primjene magnezija u zdravih sportaša u svrhu poboljšanja sportske izvedbe

Uzimajući u obzir sve navedeno, kao i činjenicu da se intravenska primjena magnezija uvriježila u sportu bez znanstveno utemeljenih dokaza, osmišljeno je istraživanje čiji je cilj ispitati akutni

učinak intravenske primjene magnezija na odabrane fiziološke i metaboličke parametre treniranih atletičara trkača.

2. PREGLED LITERATURE

2.1. Fiziološke osnove djelovanja magnezija

Magnezij je esencijalni mineral koji sudjeluje kao kofaktor u nekoliko stotina enzimskih reakcija, uključujući energetske metabolizam (sinteza i hidroliza ATP-a), sintezu nukleotida i proteina, te regulaciju stanične signalizacije i ionske ravnoteže (Newhouse & Finstad, 2000). Bohl i Volpe (2002) ističu da je magnezij nužan za funkcioniranje više od 300 enzimskih sustava, a osobito se ističu oni povezani s metabolizmom ugljikohidrata, lipida i proteina (Garfinkel & Garfinkel, 1985; Dorup & Clausen, 1991). Mildvan još 1987. naglašava da je funkcionalno aktivan ATP u stanici vezan na magnezij (Mg-ATP), tako da su gotovo sve ATP-ovisne reakcije ujedno i Mg-ovisne, što je ključno za razumijevanje uloge magnezija u skeletnom mišiću pod opterećenjem (Mildvan et al., 1987; al-Ghamdi et al., 1994).

Magnezij sudjeluje u regulaciji natrij/kalij ATP-aze (Na/K-ATP-aza), heksokinaze, kreatinkinaze i adenilat-ciklaze te brojnih protein-kinaza, čime posredno utječe na održavanje membranskog potencijala, metabolizam glukoze i fosfokreatina te prijenos signala u mišićnim i živčanim stanicama (Grober et al., 2015). Kao fiziološki antagonist kalcija (Ca), magnezij modulira ulazak Ca^{2+} u stanice i njegovo oslobađanje iz sarkoplazmatskog retikuluma, što je od ključne važnosti za ekscitacijsko–kontraktilnu spregu u skeletnoj i srčanoj muskulaturi (Marabelli et al., 2025; Swaminathan, 2003).

Neuromuskularna funkcija ovisi o regulaciji ionskih tokova, neurotransmisije i energetske raspoloživosti, a magnezij ima ključnu ulogu u svim trima komponentama. Njegova prisutnost unutar stanice i u sinaptičkom prostoru neophodna je za stabilnost membranskog potencijala, pravilno odvijanje ekscitacijsko–kontrakcijske sprege te učinkovitu relaksaciju mišića nakon kontrakcije. Na presinaptičkoj razini, magnezij modulira oslobađanje acetilkolina u neuromuskularnoj sinapsi. Kao antagonist naponski ovisnih kalcijevih kanala, smanjuje ulazak Ca^{2+} u živčani završetak, čime se smanjuje količina otpuštenog neurotransmitera. Romani (2013) naglašava da nedostatak magnezija može dovesti do povećane presinaptičke ekscitabilnosti i spontanog otpuštanja acetilkolina, što rezultira fascikulacijama, grčevima i neučinkovitom kontraktilnom aktivnošću. Ovaj se fenomen često klinički prepoznaje kao znak latentne hipomagnezijemije. Na postsinaptičkoj razini, Mg^{2+} sudjeluje u stabilizaciji membranskog potencijala mišićnog vlakna. Budući da magnezij modulira propusnost natrijevih i kalijevih kanala, njegov manjak dovodi do hiperpodražljivosti sarkoleme. Romani također opisuje kako unutarstanična koncentracija magnezija utječe na prag depolarizacije te kako pomaže u

sprječavanju pretjeranog ulaska Na^+ i Ca^{2+} , što je ključno za sprečavanje neuromuskularne disfunkcije tijekom intenzivnog napora.

Magnezij također utječe na rad N-metil-D-aspartat (NMDA) receptora u središnjem živčanom sustavu (Kirkland i sur 2017). Ionski kanal NMDA receptora fiziološki je blokiran magnezijem pri membranskim potencijalima mirovanja, a uklanjanje tog bloka ovisi o depolarizaciji. U stanju suboptimalnog statusa magnezija dolazi do pojačane NMDA aktivnosti, što može rezultirati povećanom centralnom ekscitabilnošću, poremećenom motoričkom kontrolom i većom percepcijom napora. U sportskom kontekstu, ovo je posebno važno jer centralna komponenta umora čini znatan dio ukupnog opterećenja pri visokointenzivnim naporima.

Na razini mišićnog vlakna magnezij posreduje u procesima ekscitacijsko–kontraktilne sprege. U mišićnim vlaknima tipa I i tipa II postoje razlike u osjetljivosti na Mg-ovisne procese. Vlakna tipa II, koja karakteriziraju brzina i eksplozivnost, pokazuju veću ovisnost o brzom otpuštanju i uklanjanju Ca^{2+} iz sarkoplazmatskog retikuluma. Magnezijev učinak na Ca-ATPazu i fosforilaciju proteina uključenih u kontraktilni aparat stoga je izraženiji u anaerobnim uvjetima. Saris i suradnici (2000) naglašavaju da manjak unutarstaničnog magnezija može smanjiti učinkovitost i usporiti relaksaciju. Time se povećava energetska trošak kontrakcije, što može dovesti do ranijeg zamora posebno u sportovima eksplozivnog karaktera.

Neuromuskularna stabilnost uvelike ovisi i o odnosu Mg^{2+} i Ca^{2+} tijekom visokofrekventne stimulacije motoričkih jedinica. Magnezij regulira ulazak kalcija u mišićna vlakna ne samo tijekom kontrakcije, nego i u međukontrakcijskim intervalima (Potter et al., 1981), čime sprječava pojačani tonus i rigidnost. Kod napora visokog intenziteta, pri kojima dolazi do brze i ponavljane depolarizacije, magnezij posredno osigurava da o kalciju ovisan signal ostane učinkovit i vremenski precizan.

U uvjetima visokog intenziteta neuromuskularna funkcija može biti narušena naglim padom koncentracije fosfokreatina, porastom ADP i AMP te povećanom akumulacijom protona i anorganskog fosfata. Svi ovi procesi modulirani su magnezijem koji je uključen u regeneraciju ATP-a, u glikolitičke enzime, kao i u aktivnosti kinaza koje održavaju kontraktilni kapacitet. Manjak magnezija u takvim uvjetima visokog napora može dovesti do brže pojave umora, poremećaja koordinacije mišićnih jedinica i povećane sklonosti grčevima, što je u skladu s rezultatima kliničkih i sportskih studija koje povezuju hipomagnezijemiju s nastankom grčeva mišića i poremećajem neuromuskularne funkcije (Volpe, 2015; Saris et al., 2000). Osim učinaka na neuromuskularnu ekscitabilnost, suboptimalni status magnezija povezuje se i s

promjenama autonomne regulacije, uključujući smanjenje varijabilnosti srčane frekvencije i pomak prema simpatičkoj dominaciji, što je opisano u populacijama izloženima kroničnom stresu i kod srčanih bolesnika (Almozni- Sarafian et al., 2009)

U stanju stresa dolazi do redistribucije magnezija u tijelu. Mooren i drugi autori pokazuju da se ionizirani magnezij premješta iz seruma u eritrocite i skeletne mišiće tijekom kratkotrajnih napora, što ukazuje na povećanu unutarstaničnu potražnju (Mooren et al., 2005; Bohl & Volpe, 2002). Brilla i sur su na životinjskim modelima dokazali tzv „compartmental shifting“ magnezija tijekom fizičke aktivnosti i povećanje koncentracije magnezija u mišićima (Brilla et al., 1989).

Kumulativno, može se zaključiti da je magnezij jedan od ključnih regulatora neuromuskularne funkcije na presinaptičkoj, postsinaptičkoj, centralnoj i perifernoj razini. Njegova dostupnost određuje kvalitetu kontrakcije, preciznost neuralne kontrole, stabilnost membranskog potencijala i brzinu oporavka između kontraktilnih ciklusa. Zbog toga je optimizacija statusa magnezija važna za sportaše čije discipline uključuju visoke zahtjeve u pogledu snage, eksplozivnosti, brzine i koordinacije, ali i one u kojima je neuromuskularna izdržljivost ključna komponenta rezultata.

Osim neuromuskularnog i energetskog, magnezij ima važnu ulogu i u antioksidativnom sustavu te metabolizmu vitamina D. Minnich i suradnici (1971) naglašavaju da je sinteza glutathiona, jednog od ključnih unutarstaničnih antioksidansa ATP-ovisna, a samim time i o magneziju ovisna, dok drugi autori pokazuju da je adekvatan status magnezija preduvjet normalnog metabolizma vitamina D i adekvatne sekrecije parathormona (PTH), s učinkom na koštani metabolizam i imunološku funkciju (Rosanoff et al., 2016; Uwitonze & Razzaque, 2018) .

2.2. Status magnezija u općoj populaciji i u sportaša

Oko 60 % ukupnog magnezija u organizmu nalazi se u kostima, oko 20 % u skeletnim mišićima, dok se samo oko 1% ukupne tjelesne količine nalazi u izvanstaničnom prostoru (de Baaij et al., 2015; Altura, 1991). To znači da se serumske koncentracije magnezija često ne podudaraju s ukupnim zalihama, pa se latentna hipomagnezijemija teško prepoznaje klasičnim laboratorijskim vrijednostima.

Serumski magnezij postoji u tri frakcije: ioniziranoj (biološki aktivna), vezanoj na proteine i u kompleksu s anionima (fosfat, bikarbonat, citrat, sulfat). Iako se referentne vrijednosti najčešće navode kao 0,75–1,05 mmol/L, sve je više autora (Rosanoff et al., 2022) koji predlažu da donja

granica bude podignuta na 0,85 mmol/L kako bi se bolje identificirao deficit, a Pollock i suradnici (2020) također predlažu reevaluaciju statusa magnezija za sportaše.

Bubrezi imaju ključnu ulogu u regulaciji homeostaze magnezija. De Baaij i suradnici (2015) ističu da se oko 95 % filtriranog magnezija reapsorbira, a reapsorpcija se povećava u stanju deficita i smanjuje pri prekomjernom unosu.

Magnezij je nerijetko nedovoljno zastupljen u prehrani opće populacije. Više prehrambenih i epidemioloških studija pokazuje da značajan dio odraslih prehranom ne postiže preporučene dnevne unose magnezija, a blaga do umjerena hipomagnezijemija relativno je česta, iako često neprepoznata (Rosanoff et al., 2016; diNicolantonio et al., 2018).

U sportaša je problem potencijalno još izraženiji zbog:

- povećanog energetskog i elektrolitskog obrtaja
- gubitka magnezija znojenjem
- povećanih metaboličkih zahtjeva tijekom jake mišićne aktivnosti
- čestih restriktivnih dijeta i specifičnih obrazaca prehrane (npr. redukcija tjelesne mase).

Newhouse i Finstad još su 2000. godine istaknuli da je procjena statusa magnezija kod sportaša otežana zbog činjenice da serumske vrijednosti loše odražavaju ukupne zalihe, a da pritom mnogi sportaši imaju marginalni unos magnezija prehranom.

Pollock i suradnici (2020) proveli su istraživanje u kojem su tijekom osam godina pratili 192 elitna atletičara koji su bili dio britanskog olimpijskog i paraolimpijskog programa, te pokazali da je 22 % sportaša tijekom praćenja imalo stanični (eritrocitni) deficit magnezija. Niže vrijednosti bile su češće u sportašica, sportaša crne ili mješovite rase te kod onih koji su u svojoj karijeri imali zdravstvene tegobe po tipu Ahilove ili patelarne tendinopatije, što sugerira moguću povezanost suboptimalnog statusa magnezija s opterećenjem tetiva i nastankom mišićno-tetivnih ozljeda.

Novija sustavna analiza Zhanga i suradnika (2023) uspoređivala je status magnezija kod sportaša i netreniranih osoba te pokazala da sportaši imaju niže serumske koncentracije magnezija i veću 24-satnu urinarnu ekskreciju, što upućuje na kronično povećan „promet“ magnezija te potencijalno veći rizik od deficita, osobito u uvjetima visokog volumena i intenziteta treninga.

Dominguez i suradnici (2025) dodatno naglašavaju sinergiju magnezija i vitamina D u sportaša te ističu da suboptimalni status ovih nutrijenata može nepovoljno utjecati na mišićnu funkciju i skeletno zdravlje te povećati rizik nastanka ozljeda kod sportaša. Ranije spomenuti Pollockov rad dokaz je visoke prevalencije unutarstanične hipomagnezijemije u elitnih atletičara. Recentni pregledni radovi također ističu da suboptimalni status magnezija, čak i u odsutnosti kliničke hipomagnezijemije, može imati mjerljive učinke na neuromuskularnu, kardiovaskularnu i metaboličku funkciju, pri čemu serumske vrijednosti često ne odražavaju stvarni intracelularni status magnezija (de Baaij et al., 2015., diNicolantonio et al., 2018).

Zajednički zaključak tih radova jest da su sportaši populacija s povećanim rizikom za deficit magnezija, da serumske vrijednosti nisu uvijek pouzdan pokazatelj, te da suboptimalni status magnezija može imati utjecaj na sportsku izvedbu i pojavnost ozljeda tetiva i mišića. Slijedom svega navedenoga, status magnezija u sportaša nije samo nutricionistički problem, već multidisciplinarni koncept koji uz nutricionizam povezuje:

- sportsko zdravlje (mišićna funkcija, zdravlje kosti, srčana funkcija)
- kineziologiju (sportska izvedba, tolerancija opterećenje, mogućnost adaptacije)
- sportski trening (planiranje, periodizacija, oporavak)
- kliničku medicinu (balans elektrolita, aritmije, neuromuskularna stabilnost)

Zbog toga je status magnezija važan prediktor sportskog uspjeha, rizika od nastanka ozljeda, učinkovitosti treninga.

2.3. Magnezij i sportska izvedba – sažetak dosadašnjih studija

Povezanost magnezija i sportske izvedbe proizlazi iz njegovog središnjeg položaja u energetsom, neuromuskularnom i kardiovaskularnom sustavu. Zbog širokog raspona učinaka, utjecaj magnezija na izvedbu sportaša može se manifestirati kroz snagu, eksplozivnost, aerobni i anaerobni kapacitet, metabolizam laktata, oporavak i subjektivni doživljaj napora. Međutim, literatura navodi heterogene rezultate, što zahtijeva detaljniju analizu fizioloških mehanizama i metodoloških razlika među studijama.

Već od 80-ih i 90-ih godina prošlog stoljeća provode se studije koje ispituju odnos magnezija i tjelesne ili sportske izvedbe. Newhouse i Finstad (2000) u svom preglednom radu zaključuju da većina studija nije pokazala jasan ergogeni učinak suplementacije magnezijem na aerobne, anaerobne i pokazatelje snage, ali uz brojna metodološka ograničenja: male uzorke, malu

zastupljenost ženskih ispitanica, neujednačene protokole, različite oblike i doze magnezija koji je korišten u suplementaciji te nedovoljnu kontrolu početnog nalaza ispitanika.

Zhang i suradnici (2017) proveli su sveobuhvatan pregled studija na ljudima i na životinjama te zaključili da se potreba za magnezijem povećava s rastom razine tjelesne aktivnosti te da magnezij može poboljšati izvedbu kroz: povećanje dostupnosti glukoze u mozgu, krvi i mišićima, smanjenje i/ili odgodu nakupljanja laktata te utjecaj na krvni tlak, srčanu frekvenciju i primitak kisika. Međutim, istaknuli su da je većina ljudskih studija bila usmjerena na fiziološke parametre, a manje na realne funkcionalne ishode poput specifičnih testova snage ili skoka.

Magnezij ima ulogu u aktivaciji piruvat-dehidrogenaze, Krebsova ciklusa i ATP-sintetaze (Romani, 2013), što može objasniti i nalaze studija koje su zabilježile poboljšanje VO_{2max} (Zhang & Xun, 2017), iako ne dosljedno.

Studije provedene na životinjama (Cheng et al., 2010; Chen et al., 2014) pokazale su da magnezij produžuje vrijeme do iscrpljenja, povećava dostupnost glukoze u mišićima, smanjuje lokalnu akumulaciju laktata te poboljšava energetske učinkovitost tijekom eksplozivnog napora. Ovi nalazi potencijalno objašnjavaju zašto su u ljudskim studijama (Brilla & Haley, 1992.; Kass & Poeira, 2015; Heffernan et al., 2019) najveći ergogeni učinci magnezija zabilježeni upravo u testovima snage.

Heffernan i suradnici (2019) proveli su meta-analizu o učinku magnezija na mišićnu kondiciju i pokazali da suplementacija magnezijem može dovesti do poboljšanja pojedinih pokazatelja mišićne snage, posebno u ispitanika s nižim početnim nalazom magnezija, ali uz neujednačenost studija i relativno skroman ukupni efekt. Snaga i eksplozivnost proizlaze iz brzine ciklusa aktin–miozin mostova, učinkovitosti neuromuskularnog prijenosa i stabilnosti Mg-ATP, što magnezij čini izravno uključenim u generiranje sile.

Novija istraživanja i pregledni radovi (Tarsitano et al., 2024, Zhang et al., 2017.) potvrđuju da je slika kompleksna: magnezij može imati ergogeni učinak, ali taj učinak nije univerzalan i najčešće se pojavljuje u populacijama s jasnim manjkom ili suboptimalnim statusom magnezija, u specifičnim tipovima opterećenja i pri adekvatnom doziranju i trajanju intervencije. Radovi ističu da se ergogeni učinak magnezija javlja prvenstveno kod osoba koje imaju manjak ili se nalaze na donjoj granici normalnog raspona koncentracije magnezija.

2.4. Metabolizam magnezija tijekom različitih vrsta napora

2.4.1. Sprint i eksplozivni naponi

Sprint i druge eksplozivne aktivnosti oslanjaju se pretežito na ATP-fosfokreatinski (PCr) sustav. Kreatin-kinaza (CK), ključni enzim u resintezi ATP-a, izravno ovisi o magneziju. Magnezij sudjeluje kao kofaktor u reakciji kreatin-kinaze koja regenerira ATP iz fosfokreatina. Saris i suradnici (2000) naglašavaju da ATP u stanici egzistira u obliku Mg-ATP kompleksa te da je magnezij ključan za ATP-ovisne procese koji omogućuju normalnu kontraktilnu funkciju mišića. Kod visokointenzivnih kontrakcija povećava se potražnja za Mg-ATP kompleksom i za brzom refosforilacijom ADP-a, što može učiniti magnezij limitirajućim čimbenikom u stanju visokog intenziteta.

Intenzivna tjelesna aktivnost dovodi do povećane potrebe i redistribucije magnezija, uključujući premještanje magnezija u aktivne mišiće tijekom i neposredno nakon napora, što sugerira važnost njegovog učešća u oporavku. Istraživanje Moorena i suradnika (2005) pokazuje da nakon napora dolazi do pomaka ioniziranog Mg iz seruma u eritrocite i mišiće, odnosno do porasta razine intracelularnog magnezija, što sugerira povećanu unutarstaničnu potrebu.

2.4.2. Srednjeprugaške discipline i laktatna tolerancija

Ovaj tip aktivnosti karakterizira visoka akumulacija laktata, brza promjena pH vrijednosti, povećana aktivnost fosfofruktokinaze i laktat-dehidrogenaze te nakupljanje protona i pad kontraktilne učinkovitosti.

Magnezij modulira glikolitičke enzime, a kao puferski kation smanjuje negativne učinke intracelularne acidifikacije. Pregled Zhang i suradnika (2017) navodi studije koje potkrepljuju da sportaši s boljim statusom magnezija imaju:

- niži laktat pri istom opterećenju
- sporiji pad pH
- bolju ekonomičnost pokreta
- stabilniji srčani ritam tokom intenzivnog napora

Kod intenzivnih napora magnezij djeluje i na Ca^{2+} -ovisnu kontraktilnost, smanjujući pretjeranu ekscitabilnost i neučinkovite kontrakcije.

U utrkama 400–1500 m, veliki dio energije dolazi iz anaerobne glikolize, uz značajan aerobni doprinos. Magnezij kao kofaktor glikolitičkih enzima (npr. fosfofruktokinaze) povećava

učinkovitost metabolizma glukoze, dok kao ionski puferski sustav smanjuje negativne učinke acidifikacije. Ranije spomenuti pregled Zhang i suradnika (2017) pokazao je da sportaši s boljim nalazom magnezija imaju i bolju neuromuskularnu stabilnost tijekom progresivnih testova.

2.4.3. *Izdržljivost i aerobni metabolizam*

Tijekom dugotrajnih aerobnih aktivnosti važni su stabilan kardiorespiratorni kapacitet, učinkovita oksidativna fosforilacija i mitohondrijska funkcija te elektrolitna ravnoteža (K^+ , Na^+ , Mg^{2+}).

Nekoliko studija pokazalo je da sportaši u sportovima izdržljivosti često imaju kronično niže razine serumskog magnezija, povećanu urinarnu ekskreciju nakon napora te veću sklonost mišićnim grčevima i aritmijama ako je status magnezija niži od optimalnog.

Tijekom dugotrajnih napora (npr. maraton, triatlon) ključno je održavanje aerobnog metabolizma i elektrolitnog balansa. Nielsen i Lukaski (2006) dokumentiraju da se značajne količine magnezija gube znojenjem, a Costill i suradnici još 1976. potvrđuju da intenzivno znojenje i dehidracija mijenjaju sadržaj elektrolita u mišiću, uključujući i magnezija, no Terblanche i suradnici (1992) u svom radu nisu pokazali poboljšanje u rezultatu maratona nakon suplementacije magnezijem. Kod ultramaratona i ekstremnih sportova gubitak magnezija može doseći 10–15 % dnevnih zaliha. Iako oralna suplementacija magnezija nije redovito pokazivalo ergogene učinke na poboljšanje sportske izvedbe, zabilježen je pozitivan učinak na percepciju napora, oporavak, varijabilnost srčane frekvencije i kontrolu elektrolita.

2.5. *Metode procjene sportske izvedbe u visokointenzivnom naporu*

2.5.1. *TLim test*

U istraživanjima sportske izvedbe, osobito u kontekstu visokointenzivnog kontinuiranog napora, odabir odgovarajuće metode procjene predstavlja ključni metodološki element. Klasične mjere maksimalnog kapaciteta, poput maksimalnog primitka kisika (VO_{2max}), pružaju informacije o gornjoj granici aerobnog sustava, ali ne odražavaju nužno sposobnost sportaša da održi vrlo visok intenzitet rada tijekom vremena, što je često presudno u atletici.

Jedna od metoda koja se pokazala posebno prikladnom za procjenu tolerancije napora visokog intenziteta jest test izdržaja pri konstantnoj brzini trčanja koja odgovara brzini pri kojoj je zabilježen maksimalni primitak kisika, poznat kao *time-to-limit* test (TLim test), ili *time-to-exhaustion* test. U ovom testu ispitanik izvodi kontinuirani napor (trčanje na pokretnom sagu)

pri unaprijed definiranoj brzini, najčešće individualnoj brzini pri VO_2max (vVO_2max), sve do voljne iscrpljenosti, a kao primarni ishod testa bilježi se vrijeme izdržaja.

Eksperimentalna uporaba TLim testa pri vVO_2max jasno je dokumentirana u radovima Billat i suradnika. Billat i suradnici (1996) te Billat i Koralsztein (1996) koristili su upravo vrijeme izdržaja pri brzini vVO_2max kao ključnu varijablu za procjenu sposobnosti sportaša da toleriraju napor na razini maksimalnog aerobnog opterećenja. Billat (2001) ističe važnost vremena izdržaja pri vVO_2max kao funkcionalnog pokazatelja tolerancije napora. U ovim radovima pokazano je da vrijeme izdržaja pri vVO_2max predstavlja osjetljiv pokazatelj funkcionalnih razlika među ispitanicima te promjena induciranih treningom, čak i u odsutnosti promjena u samom VO_2max . Ovi radovi čine temeljnu eksperimentalnu osnovu za primjenu TLim testa pri vVO_2max u laboratorijskim uvjetima.

Osim izravnih eksperimentalnih studija, TLim test dodatno je teorijski i metodološki opravdan u preglednim i metodološkim radovima. Billat tako naglašava da vrijeme izdržaja pri visokim konstantnim intenzitetima predstavlja važnu komponentu sportske izvedbe, što je bitno u sportskim disciplinama u kojima se znatan dio utrke odvija pri ili blizu VO_2max . Slično tome, Midgley i suradnici (2007) raspravljaju o fiziološkim determinantama izdržljivosti pri visokim intenzitetima te ističu važnost mjera koje nadilaze statične maksimalne vrijednosti.

Pouzdanost i reproducibilnost *time-to-exhaustion* protokola dodatno su potvrđene u istraživanjima. Laursen i suradnici (2002, 2005) koriste time to exhaustion testove za praćenje promjena u izvedbi istog ispitanika. Iako u svim radovima intenzitet nije uvijek točno definiran kao brzina kretanja pri maksimalnom primitku kisika (vVO_2max), rezultati potvrđuju metodološku vrijednost vremena izdržaja kao mjere tolerancije napora.

Važno je razlikovati TLim test od time-trial protokola, u kojima ispitanik sam regulira intenzitet rada s ciljem postizanja najboljeg rezultata uz vjerodostojnu simulaciju stvarne izvedbe (Currell & Jeukendrup, 2008). Iako su time-trial testovi bliži stvarnim natjecateljskim uvjetima, oni su pod snažnim utjecajem taktičkih i psiholoških čimbenika. Nasuprot tome, TLim test osigurava strogo kontrolirane uvjete i precizniju izolaciju fizioloških učinaka ispitivane intervencije, što ga čini pogodnim za eksperimentalna istraživanja nakon intervencija

Kada govorimo o istraživanjima koja se bave tolerancijom visokog intenziteta, konceptualnu fiziološku podlogu TLim testu pružaju i radovi koji se bave pragovima zamora i kritičnom snagom. Tako Poole i suradnici (2016) opisuju da u opterećenjima iznad kritične razine organizam ne može uspostaviti stabilno metaboličko stanje te vrijeme do iscrpljenja reflektira

integrirani odgovor metaboličkog, ventilacijskog i neuromuskularnog sustava. Iako ti radovi ne koriste uvijek brzinu $\dot{V}O_{2\max}$, oni dodatno podupiru fiziološku logiku uporabe ovog testa kao mjere tolerancije ekstremnog opterećenja.

TLim test zbog kontinuiranog mjerenja omogućuje i analizu vremenske dinamike fizioloških odgovora tijekom napora, uključujući praćenje respiracijskog omjera i vremena do njegova maksimalnog porasta. Time se ne procjenjuje samo ukupno vrijeme izdržaja, nego i razvoj metaboličkog stresa tijekom testa, što je važno u istraživanjima usmjerenima na akutne učinke intervencija koje ne mijenjaju maksimalni aerobni kapacitet, već moduliraju toleranciju visokog intenziteta.

2.5.2. Respiracijski omjer i njegova interpretacija u visokointenzivnom naporu

Respiracijski omjer (respiratory exchange ratio, RER), definiran kao omjer proizvodnje ugljikova dioksida i potrošnje kisika ($\dot{V}CO_2/\dot{V}O_2$), jedan je od temeljnih pokazatelja metaboličkog odgovora organizma na tjelesno opterećenje. Tijekom submaksimalnog aerobnog rada vrijednosti RER-a reflektiraju dominantni supstratni izvor energije, dok se pri visokim intenzitetima RER postupno povećava iznad vrijednosti 1,0 zbog dodatne produkcije CO_2 povezane s puferiranjem vodikovih iona nastalih tijekom anaerobne glikolize (Wasserman et al., 1999; Beaver et al., 1986; Brooks 2018).

U uvjetima kontinuiranog visokointenzivnog napora, poput trčanja pri brzini $\dot{V}O_{2\max}$, porast RER-a ne predstavlja isključivo promjenu u oksidativnom metabolizmu, već integrirani odgovor ventilacijskog, metaboličkog i acidobaznog sustava (Poole & Jones, 2012). Vrijeme potrebno da se dosegne maksimalni RER tijekom takvog opterećenja može se stoga promatrati kao pokazatelj brzine razvoja metaboličkog stresa i tolerancije na akumulaciju metaboličkih produkata, neovisno o samoj maksimalnoj vrijednosti RER-a

Poole i Jones naglašavaju da kinetika metaboličkih varijabli tijekom prijelaza iz aerobnog u izrazito anaerobni režim rada može pružiti osjetljivije informacije o funkcionalnoj učinkovitosti sustava nego statične maksimalne vrijednosti. U tom kontekstu, analiza vremena do dostizanja maksimalnog respiracijskog omjera (tRER) može predstavljati potencijalno vrijedan pokazatelj akutnih promjena u metaboličkom odgovoru na napor, osobito u istraživanjima koja se bave intervencijama za koje se ne očekuje promjena maksimalnog aerobnog kapaciteta, već promjena tolerancije visokog intenziteta. U kontekstu sportske fiziologije, odgoda pojave izraženog porasta RER-a može upućivati na povoljniji metabolički odgovor i učinkovitiju

regulaciju acidobazne ravnoteže tijekom napora, što može biti od značaja kod sportaša koji se natječu u npr. srednjeprugaškim utrkama.

2.6. Bronhodilatacijski učinci magnezija i implikacije za sportsku izvedbu

Bronhodilatacijski učinak magnezija dobro je dokumentiran u respiratornoj medicini. Do Amaral i suradnici (2012) su pokazali da intravenska primjena magnezijevog sulfata smanjuje statičku hiperinflaciju pluća i poboljšava inspiratorni kapacitet kod bolesnika s kroničnom opstruktivnom bolesti pluća (KOPB) tijekom testiranja opterećenja.

Ostali značajni radovi na ovu temu uključuju Noppen i suradnike (1990) koji su pokazali pojavu bronhodilatacije kod bolesnika s astmom, zatim Ni i suradnici (2022) koji u svom preglednom radu upućuje na učinkovitost primjene magnezija u akutnim respiratornim situacijama, ali uz heterogene dokaze. Magnezij poboljšava bronhijalnu relaksaciju i smanjuje reaktivnost dišnih puteva, i kao takav se intravenski magnezij može sigurno koristiti kao adjuvantna terapija u akutnim bronhokonstriktivnim epizodama.

Mehanizmi djelovanja magnezija uključuju:

- Antagonizam kalcijevih kanala – smanjuje kontrakciju glatke muskulature bronha
- Inhibiciju oslobađanja acetilkolina – smanjuje kolinergički bronhokonstriktorski tonus
- Stabilizaciju mastocita – smanjuje oslobađanje histamina i upalnih medijatora
- Sniženje vagalnog tonusa – doprinosi bronhodilataciji

Zaključuje se da intravenski primijenjen magnezij smanjuje bronhijalnu reaktivnost, poboljšava ventilaciju i smanjuje subjektivni osjećaj dispneje u akutnim stanjima.

Iako ispitivanja nisu provedena na zdravim sportašima, potencijalnu korist mogli bi imati sportaši u disciplinama s visokim ventilacijskim opterećenjem te sportaši s blagom bronhijalnom hiperreaktivnošću.

Poboljšanje ventilacijske mehanike može povećati ventilacijsku rezervu i toleranciju napora, posebno kod aktivnosti visokog intenziteta gdje ventilacija postaje ograničavajući čimbenik. U sportovima kao što su srednjeprugaške discipline, intervalni visoko-intenzivni treninzi (HIIT), crossfit, veslanje i plivanje, sposobnost održavanja visokog ventilacijskog protoka uz minimalnu dispneju ključna je za postizanje vrhunskih rezultata. Osim toga, subklinična bronhijalna hiperreaktivnost relativno je česta u sportaša, osobito u sportovima izdržljivosti, zimskim sportovima te kod sportaša izloženih hladnom zraku ili kloriranoj vodi. U tim bi

skupinama bronhodilatacijski učinak magnezija mogao imati dodatni fiziološki značaj. Iako se ova implikacija tek teoretski navodi u literaturi, jasno je da akutna intravenska primjena magnezija predstavlja potencijalnu intervenciju koja može utjecati na ventilacijsku komponentu izvedbe.

2.7. Oralna suplementacija magnezijem; dizajn studija i rezultati

2.7.1. Aerobni kapacitet i izdržljivost

Među prvim većim radovima, Newhouse i Finstad (2000) zaključili su da nadomještanje magnezija ne rezultira dosljednim poboljšanjem parametara aerobnog kapaciteta, iako su neke druge studije bilježile pozitivne pomake u parametrima poput VO_{2max} i drugim pokazateljima fizičke izvedbe.

Kasnije studije, uključene u pregled Zhang i suradnika, opisale su poboljšanja u vrijednostima VO_{2max} ili ekonomici trčanja u određenim skupinama ispitanika, ali najčešće kod onih s nižim početnim unosom ili statusom magnezija. Neke intervencije pokazale su poboljšanje rezultata u testovima poput "20-m shuttle runa" uz sniženu razinu laktata (Cinar et al., 2006), često korištenog u procjeni kardiovaskularne izdržljivosti, no rezultati nisu bili dosljedni kroz sve populacije i protokole.

Nasuprot tome, Zanforlini i sur. (2021) su u kliničko-fiziološkom kontekstu kronične opstruktivne plućne bolesti (ne u sportaša) pokazali da nadomještanje magnezija može poboljšati snagu, ali ne i hodnu distancu u 6-minutnom testu hoda kao ni plućnu funkciju, ali napominju kako nisu dostigli planirani broj ispitanika za istraživanje što je mogući ograničavajući čimbenik.

2.7.2. Eksplozivnost i mišićna jakost

Brojne studije usmjerile su se na učinak magnezija na snagu i eksplozivnost. Pregledi i analize (Heffernan et al., 2019; Zhang et al., 2017; Wang et al., 2017) navode poboljšanja u „kvadriceps torqueu“ (Brilla & Haley, 1992), izokinetičkim i izometričkim testovima (Santos et al., 2011) i rezultatima u skakačkim testovima u pojedinim populacijama, osobito kada je nadomještanje trajalo nekoliko tjedana i kada je početni nalaz magnezija bio suboptimalan.

Ovi autori navode studije u kojima je kombinacija kontroliranog treninga i nadomještanja magnezija u trajanju od nekoliko tjedana dovela do većeg porasta snage u odnosu na placebo skupinu, primjerice u odbojkašica ili drugih sportaša čija je izvedba uvelike ovisna o eksplozivnoj snazi donjih ekstremiteta. U jednoj od tih studija suplementacija magnezijem

rezultirala je nižim vrijednostima laktata i boljim rezultatima u “countermovement jump” testu nakon perioda intervencije (Setaro et al., 2014).

S druge strane, postoje studije koje nisu našle poboljšanje u pokazateljima snage ili izdržljivosti unatoč suplementaciji (deHaan et al., 1995). U dijelu tih radova ispitanici su bili dobro uhranjeni, bez dokaza o manjku magnezija, što podupire tezu da je ergogeni potencijal magnezija najveći kada ispravlja postojeći manjak, a ne kada je nalaz već uredan.

2.7.3. *Starija populacija i funkcionalna izvedba*

Nekoliko studija istraživalo je učinak magnezija na tjelesnu izvedbu ispitanika starije životne dobi. Zhang i suradnici navode radove u kojima je nadomještanje magnezija povezano s trendom poboljšanja mišićne funkcije uključujući hvatnu snagu i funkcionalnu pokretljivost kod starijih odraslih osoba (Moslehi et al., 2013), ali bez statističke značajnosti. U drugom radu Veronese i suradnici (2014) dokazali su poboljšanje izvedbe kod starijih žena nakon suplementacije magnezijem što sugerira da populacije s većim rizikom za manjak magnezija imaju veću vjerojatnost iskazivanja koristi od njegovog nadomještanja.

Ovi podatci, iako nisu izravno vezani uz sportaše, važni su jer pokazuju da je magnezij sposoban modificirati mišićnu funkciju u populacijama s kompromitiranim statusom, što je konceptualno prenosivo i na sportaše s hipomagnezijemijom.

2.7.4. *Mehanizmi ergogenog djelovanja i spoznaje iz životinjskih modela*

Studije provedene na životinjama dale su važan uvid u potencijalne mehanizme ergogenog djelovanja magnezija pa tako Zhang i suradnici (2017) u svom pregledu navode radove u kojima je akutna primjena magnezija kod glodavaca (Cheng et al., 2010; Chen et al. 2014) prije prisilnog plivanja odnosno trčanja na pokretnoj traci dovela do:

- povećane dostupnosti glukoze u krvi i mišićima
- smanjenja akumulacije laktata u krvi, uz ponekad višu razinu laktata u mozgu, što se tumači preraspodjelom i boljom energetsom opskrbom središnjeg živčanog sustava
- produljenja vremena do iscrpljenja u testovima prisilnog plivanja

Ovi rezultati podupiru hipotezu da magnezij može poboljšati toleranciju napora kroz poboljšan metabolizam glukoze, učinkovitiju glikolizu i oksidativnu fosforilaciju te smanjenu akumulaciju metaboličkih produkata umora, poput laktata. Istodobno, učinak na središnji

živčani sustav (npr. modulacija NMDA receptora, smanjenje ekscitotoksičnosti) može doprinijeti percepciji napora i održavanju motoričke izlazne komande.

2.8. Intravenska primjena magnezija; farmakokinetika i farmakodinamika

Dok su istraživanja provedena na sportašima gotovo isključivo fokusirana na oralnu suplementaciju, intravenska primjena magnezija temeljito je istražena u kliničkoj medicini. Najčešće indikacije za primjenu magnezija intravenski uključuju:

- preeklampsiju i eklampsiju
- ventrikularne aritmije
- akutni astmatični napad
- egzacerbacije KOPB-a
- analgeziju i mišićnu relaksaciju

Do Amaral i suradnici (2012) ispitivali su utjecaj akutnog intravenskog „loadinga“ magnezijem na maksimalno opterećenje u pacijenata sa stabilnim KOPB-om, koristeći kardiopulmonalni test opterećenja (CPET). U randomiziranom, dvostruko slijepom, placebom kontroliranom dizajnu pokazali su da bolus intravenskog magnezija smanjuje statičku hiperinflaciju (poboljšanje inspiratornog kapaciteta) i poboljšava toleranciju opterećenja, što su autori pripisali poboljšanju respiratorne mehanike i bronhodilataciji.

Ni i suradnici (2022) u preglednom radu o primjeni intravenskog magnezijevog sulfata u egzacerbacijama KOPB-a naglašavaju njegov bronhodilatacijski učinak, poboljšanje plućne funkcije i moguće poboljšanje tolerancije napora, iako naglašavaju da su podatci raznoliki, a studije ograničene relativno malim brojem uključenih ispitanika.

Bitno je istaknuti da se u tim studijama intravenski magnezij primjenjuje u bolesničkoj populaciji s respiratornim ograničenjem, a primarni ishodi su poboljšanje plućne funkcije i kliničkih simptoma – sportska izvedba u zdravih osoba nije bila predmet istraživanja.

Farmakokinetički podaci iz kliničkih studija i modela pokazuju da intravenska primjena magnezija ima dvije faze distribucije. Prvo se odvija brza distribucija u intravaskularni i intersticijski prostor (tijekom nekoliko minuta), nakon čega slijedi sporija faza eliminacije i prelaska u unutarstanični prostor, s poluvijekom eliminacije od nekoliko sati kod osoba s urednom bubrežnom funkcijom (Fawcett et al., 1999; Geiger & Wanner, 2012).

Takav profil čini intravensku primjenu jedinom metodom kojom se može postići brzi, vremenski precizno kontrolirani porast ioniziranog magnezija neposredno prije opterećenja – što je upravo scenarij koji se želi modelirati u sportskom kontekstu.

Farmakokinetika intravenski primijenjenog magnezija razlikuje se od svih drugih načina primjene po tome što omogućuje trenutačan, predvidljiv i kvantificiran porast ioniziranog magnezija u plazmi. Upravo je ta karakteristika ključna za proučavanje akutnih fizioloških učinaka i predstavlja temeljnu razliku u odnosu na oralnu suplementaciju, čiji su učinci sporiji, varijabilniji i ovisni o probavnim mehanizmima.

Fawcett i suradnici (1999), Connolly i Worthley (1999) te Egelund i suradnici (2013) opisuju farmakokinetiku intravenski primijenjenog magnezija primjenom dvokompartmentalnog modela. Centralni kompartment odgovara intravaskularnom prostoru, dok periferni obuhvaća intersticijski i intracelularni prostor, uz značajnu ulogu koštanog depoa. Razlikuju se:

Brza distribucijska faza (nekoliko minuta): Nakon bolusne primjene, koncentracija magnezija se brzo povećava u intravaskularnom prostoru te magnezij unutar minuta difundira u visoko perfundirana tkiva: skeletni mišić, srce, jetru i eritrocite te se djelomično ugrađuje u unutarstanični “Mg-ATP pool”, stabilizira neuromuskularnu transmisiju i vaskularni tonus. Dosta farmakodinamskih učinaka (neuromuskularnih, vaskularnih, bronhodilatacijskih) pojavljuje se upravo u ovoj ranoj fazi.

Spora eliminacijska faza (nekoliko sati): U drugoj fazi, koncentracija u plazmi opada zbog bubrežnog klirensa (glomerularna filtracija i tubularna reapsorpcija), prelaska u tkivna skladišta (mišić, kost), vezanja na proteine u plazmi. Ova faza određuje trajanje učinka i sigurnosni profil.

Geiger i Wanner (2012) naglašavaju da normalna bubrežna funkcija osigurava učinkovitu regulaciju i povrat koncentracija u fiziološki raspon bez rizika od nakupljanja.

U kontekstu akutnog učinka, najvažniji je čimbenik ionizirani Mg^{2+} , jer upravo on sudjeluje u neuromuskularnom prijenosu, regulira tokove kalcija, modulira vaskularnu reaktivnost, utječe na membranski potencijal, određuje biološku aktivnost u sinapsama i mišiću.

Okusanya i suradnici (2015) potvrđuju da intravenska primjena 4 grama bolusa $MgSO_4$ dovodi do naglog porasta koncentracije magnezija u plazmi, postizanja vršne vrijednosti unutar nekoliko desetaka minuta te održavanja visoke koncentracije magnezija tijekom trajne infuzije.

Bubrezi su glavni regulator koncentracije magnezija nakon intravenske primjene. Tubuli reapsorbiraju 95 % filtriranog magnezija, a u stanju povećane koncentracije dolazi do smanjene

tubularne reapsorpcije i povećanog izlučivanja i taj mehanizam sprječava hipermagnezijemiju kod osoba s urednom bubrežnom funkcijom (de Baaij et al., 2015; Geiger & Wanner, 2012).

Kod sportaša s visokim stupnjem hidratacije i normalnom funkcijom bubrega očekuje se brži klirens, stabilnija krivulja koncentracije, minimalan rizik od zadržavanja iona. Ovaj sigurnosni aspekt čini 1-gramski bolus sigurnim i fiziološki predvidljivim.

Nakon naglog porasta koncentracije ioniziranog magnezija, nastupaju farmakodinamski učinci koji su posebno značajni za sportsku izvedbu:

Neuromuskularni učinci: smanjenje presinaptičkog otpuštanja acetilkolina, stabilizacija membranskog potencijala, olakšana relaksacija mišića, manja neuromuskularna hiperekscitabilnost. Ovi učinci potencijalno mogu poboljšati ekonomičnost pokreta i spriječiti neučinkovitu regrutaciju motoričkih jedinica pri visokom intenzitetu.

Metabolički učinci: bolja stabilnost Mg-ATP kompleksa, aktivacija piruvat-dehidrogenaza (PDH) i Krebsova ciklusa, sporije nakupljanje laktata (potvrđeno u životinjskim studijama).

Kardiovaskularni učinci: blaga vazodilatacija, stabilizacija srčanog ritma, smanjenje perifernog otpora (Marabelli et al., 2025). Altura & Altura (1994) navode da Mg^{2+} djeluje na vaskularni tonus. Time može pospješiti mikrocirkulaciju i poboljšati perfuziju mišića tijekom većih metaboličkih zahtjeva.

Bronhodilatacija: Dokazana u populacijama s respiratornim poteškoćama (Amaral et al., 2012; Ni et al., 2022), što može imati implikacije na povećane ventilacijske zahtjeve tijekom visokointenzivnih testova.

Potencijalni ergogeni učinak intravenske primjene magnezija može biti moduliran početnim statusom magnezija u tkivima, bubrežnom funkcijom, razinom treniranosti, vrstom mišićnih vlakana (viši udio tip II može značiti jači odgovor), hidratacijskim statusom te intenzitetom napora. Ovo se podudara s nalazima studija u kojima je korištena oralna suplementacija magnezija (Newhouse & Finstad, 2000; Zhang & Xun, 2017) gdje se učinak uvijek najviše vidi kod osoba s nižim početnim nalazom koncentracije magnezija.

2.9. Sažetak dosadašnjih spoznaja i istraživački jaz

Na temelju pregleda literature može se izvući nekoliko ključnih zaključaka:

Magnezij je ključan za energetske metabolizam, neuromuskularnu funkciju i kardiovaskularnu regulaciju.

Njegova uloga u Mg-ATP kompleksu, ekscitacijsko–kontraktilnoj sprezi, regulaciji ionske

ravnoteže i antioksidativnoj zaštiti čini ga posebno značajnim za sportske aktivnosti visokog intenziteta.

Suboptimalni status magnezija u sportaša je čest i često neprepoznat. Opservacijski radovi (Pollock et al., 2020) i analize statusa magnezija u sportaša pokazuju niže serumske i stanične razine magnezija kod sportaša u odnosu na netrenirane osobe, osobito u žena i u određenim sportskim disciplinama.

Oralna suplementacija magnezija može imati ergogeni učinak, ali neujednačeno i uvjetovano. Ranije spomenuti pregledi i meta-analize (Newhouse & Finstad 2000; Zhang et al., 2017; Heffernan et al., 2019; Tarsitano et al., 2024) pokazuju da su najveće koristi zabilježene kod osoba s niskim početnim statusom magnezija, u specifičnim protokolima i uz adekvatno trajanje suplementacije. Kod zdravih, treniranih sportaša bez deficita učinci su nerijetko bili nekonzistentni.

Oralna primjena ima jasna ograničenja u kontekstu akutnog ergogenog učinka. Varijabilna i saturabilna apsorpcija, potreba za duljim vremenom da bi se promijenio cjelokupan status magnezija te potencijalne gastrointestinalne nuspojave, čine je manje pogodnom za modeliranje akutnog učinka neposredno prije natjecanja.

Intravenski primijenjen magnezij dokazano mijenja fiziologiju u kliničkim populacijama i pod opterećenjem (CPET), ali nije istražen u zdravih sportaša. Studije u bolesnika s KOPB-om pokazuju da intravenski magnezij poboljšava respiratornu mehaniku i toleranciju opterećenja, ali sportska izvedba u zdravih, treniranih ispitanika nije bila predmet tih ispitivanja (do Amaral et al., 2012; Ni et al., 2022).

U literaturi nije identificirano kontrolirano istraživanje akutne intravenske primjene magnezija u sportaša s praćenjem sportske izvedbe. Pregledni radovi i specifične pretrage literature ne nalaze studije koje bi sustavno ispitale akutni ergogeni učinak intravenski primijenjenog magnezija kod zdravih sportaša, uz objektivnu mjeru sportske izvedbe.

Upravo taj istraživački jaz – dokazano fiziološko djelovanje intravenski primijenjenog magnezija, njegova sigurna i rutinska primjena u kliničkoj praksi, ali potpuni nedostatak podataka o akutnom učinku na sportsku izvedbu u zdravih atletičara – čini znanstvenu osnovu i opravdanje za istraživanje koje je predmet ove doktorske disertacije.

Na taj se način disertacija nadovezuje na postojeće spoznaje o ulozi magnezija u energetske metabolizmu, neuromuskularnoj funkciji i statusu magnezija u sportaša, ali uvodi novi, dosad neistraženi aspekt: akutni učinak intravenske primjene magnezija na parametre aerobnoga i

anaerobnoga energetskeg kapaciteta te sportsku izvedbu u standardiziranom, visoko-intenzivnom testu izdržljivosti.

3. CILJEVI ISTRAŽIVANJA I HIPOTEZE

3.1. Ciljevi istraživanja

Ciljevi ovog istraživanja definirani su u skladu s prijavom teme doktorske disertacije.

Cilj 1 je utvrditi može li akutna intravenska primjena magnezija, neposredno prije izvođenja testa izdržaja pri konstantnoj brzini (TLim test), dovesti do promjene pokazatelja anaerobnoga energetskog kapaciteta, te na taj način utjecati na poboljšanje sportske izvedbe.

Cilj 2 bio je utvrditi dovodi li akutna intravenska primjena magnezija do više maksimalne aerobne aktivacije tijekom izvođenja TLIM testa.

3.2. Hipoteze istraživanja

Na temelju postavljenih ciljeva definirane su sljedeće radne hipoteze:

H1: Akutna intravenska primjena magnezija prije TLim testa ne utječe na poboljšanje pokazatelja anaerobnoga energetskog kapaciteta.

H2: Akutna intravenska primjena magnezija prije TLim testa ne utječe na poboljšanje pokazatelja aerobnoga energetskog kapaciteta.

4. METODE

Istraživanje je osmišljeno kako bi u kontroliranim laboratorijskim uvjetima što vjernije imitiralo okolnosti u kojima se sportaši nalaze neposredno prije natjecanja, osobito u kontekstu znanstveno neutemeljene prakse intravenske primjene magnezija u sportu s ciljem poboljšanja izvedbe. Uzimajući u obzir činjenicu da magnezij nije zabranjena supstanca i da intravenska primjena magnezija u ovom volumenu nije zabranjena prema Listi zabranjenih supstanci i metoda Svjetske antidopinške agencije (WADA), ovaj istraživački model omogućio je etičnu i znanstveno relevantnu evaluaciju mogućeg akutnog učinka magnezija na sportsku izvedbu. Upit o navedenom upućen je i Službi za antidoping Hrvatskog zavoda za toksikologiju i antidoping koja se referirala na popis zabranjenih sredstava i zabranjenih metoda WADAE i potvrdila da se planirani postupak ne smatra dopingom, navodim;

Sljedeće je zabranjeno:

- *intravenske infuzije i/ili injekcije volumena većeg od 100 mL u razdoblju od 12 sati, osim ako se opravdano daju tijekom bolničkog liječenja, kirurških postupaka ili kliničkih dijagnostičkih postupaka.*

Iz navedenog proizlazi da primjena intravenske injekcije od 10 ml nije zabranjena.”

Provedeno je prospektivno, randomizirano, single-blind crossover ispitivanje kako bi svaki ispitanik mogao poslužiti kao vlastita kontrola. Ovaj pristup smanjuje međusubjektne varijacije te povećava osjetljivost istraživanja na detekciju stvarnih učinaka intervencije. Prije uključivanja u studiju svi su ispitanici bili detaljno informirani o ciljevima i postupcima istraživanja te o dokazanim učincima i mogućim nuspojavama intravenske primjene magnezija. Svoje sudjelovanje u istraživanju ispitanici, ili roditelji maloljetnih ispitanika, potvrdili su potpisivanjem informiranog pristanka, uz dogovor da u bilo kojem trenutku mogu odustati od daljnjeg sudjelovanja. Istraživanje je provedeno u skladu s Helsinškom deklaracijom i odobreno od strane etičkog povjerenstva Kineziološkog fakulteta Sveučilišta u Zagrebu te u potpunosti provedeno u Sportsko dijagnostičkom centru Kineziološkog fakulteta Sveučilišta u Zagrebu.

4.1. Ispitanici

U istraživanje je uključeno 28 atletičarki i atletičara trkača koji su aktivni natjecatelji u disciplinama trčanja 200-800m, a regrutirani su iz nekoliko zagrebačkih atletskih klubova. Prije uključivanja u istraživanje provedena je medicinska obrada koja je uključivala uzimanje

detaljne anamneze, fizikalni pregled, elektrokardiografiju te laboratorijsku analizu serumskih vrijednosti magnezija i parametara bubrežne funkcije (urea, kreatinin, eGFR). Atletičari s povišenim vrijednostima serumskog magnezija, poremećenom bubrežnom funkcijom ili drugim kontraindikacijama za intravensku primjenu magnezija bili bi isključeni iz sudjelovanja. Dodatno bi se isključile osobe koje su uzimale lijekove ili dodatke prehrani koji mogu pojačati ili umanjiti učinke magnezija u organizmu (primjerice diuretici ili visoke doze oralnog magnezija). Ovakav pristup osigurao je uključivanje samo onih sportaša kod kojih je intervencija sigurna, a fiziološki odgovor interpretabilan. Nakon uvida u sve nalaze, nije bilo atletičara s kontraindikacijom za sudjelovanje u istraživanju.

Potrebna veličina uzorka određena je pomoću G*Power programa (verzija 3.1.9.2), uz pretpostavljenu srednju veličinu efekta ($d_z = 0,50$), razinu značajnosti $\alpha = 0,05$ i snagu od 80 %. Procijenjeni minimalni broj ispitanika bio je 27; uključivanjem ukupno 28 sudionika osigurana je adekvatnost uzorka čak i u slučaju potencijalnih odustajanja.

4.2. Randomizacija i zaslijepjivanje

Svi sudionici u istraživanju imali su tri dolaska u dijagnostički centar, a nakon prvog dolaska randomizirani su u dvije sekvence primjene: magnezij–placebo ili placebo–magnezij. Randomizacija je provedena računalno generiranom listom slučajnih brojeva, uz 1:1 raspodjelu. Ispitanici nisu znali koju otopinu primaju tijekom pojedinog testiranja (single-blind), dok su mjeritelji koji su provodili i nadzirali testiranja bili zaslijepljeni u odnosu na redoslijed intervencija. Otopine su bile pripremljene u identičnim štrcaljkama, prozirne i bezbojne, kako bi se onemogućilo prepoznavanje tretmana vizualnim putem. Osoba zadužena za pripremu otopina nije sudjelovala u provedbi testova, čime je dodatno osigurana neovisnost postupka.

4.3. Laboratorijski uvjeti i kontrola vanjskih varijabli

Sve faze mjerenja provedene su u laboratorijskim uvjetima Sportskog dijagnostičkog centra Kineziološkog fakulteta, pri stabilnoj temperaturi zraka (20–22 °C) i bez značajnih ometajućih vanjskih izvora stimulacije. Sva testiranja održana su u istom dijelu dana kako bi se smanjio utjecaj cirkadijalnih ritmova na metabolički i ventilacijski odgovor. Ispitanici su prestali s provođenjem specifičnih atletskih treninga tijekom sudjelovanja u istraživanju, a isto tako im je bilo preporučeno da se suzdrže od konzumacije kofeina, alkohola i dodataka koji sadrže magnezij. Također su zamoljeni da zadrže uobičajeni dnevni obrazac prehrane i hidracije, bez posebnih restrikcija, ali s naglaskom na izbjegavanje obilnih obroka unutar dva sata prije

dolaska u laboratorij. Ovi uvjeti omogućili su stabilne i ponovljive okolnosti za provođenje testova.

4.4. Spiroergometrijsko testiranje (KF1 protokol)

Prvi posjet dijagnostičkom centru uključivao je spiroergometrijsko testiranje na pokretnom sagu uz određivanje kardiorespiratornih i metaboličkih parametara provođenjem standardiziranog protokola KF1, koji se rutinski provodi u Sportskom dijagnostičkom centru Kineziološkog fakulteta Sveučilišta u Zagrebu. KF1 predstavlja validiranu proceduru za određivanje aerobnog energetskeg kapaciteta. Testiranje je provedeno korištenjem prijenosnog metaboličkog sustava Cortex MetaMax 3B-R2 (Cortex Biophysik GmbH, Leipzig, Njemačka), uređaja koji omogućuje kontinuirano praćenje ventilacijskih i metaboličkih parametara putem breath-by-breath analize. Prije svakog testiranja uređaj je podvrgnut standardiziranoj plinskoj i volumetrijskoj kalibraciji, a frekvencija uzorkovanja odgovarala je preporukama proizvođača za maksimalne testove opterećenja. Time je osigurana valjanost i pouzdanost mjerenja. Uređaj je bio spojen s bežičnim sustavom za prijenos podataka, što je omogućilo nesmetano kretanje ispitanika tijekom trčanja.

Protokol KF1 započinje mirovanjem u prvoj minuti uz mjerenje svih ventilacijskih i metaboličkih parametara. Nakon minute mirovanja kreće progresivno ubrzavanje saga, a početna brzina je 3km/h i pri toj brzini ispitanik započinje s hodaњem. Trajanje pojedinog stupnja opterećenja je 30 sekundi, uz povećanje brzine saga od 0,5 km/h za svaki stupanj opterećenja. Trčanje započinje pri brzini saga od 6km/h. Nagib saga je konstantan i iznosi 1,5 %. Test se izvodi do iscrpljenja ispitanika, a za utvrđivanje stvarnih maksimalnih vrijednosti u testu koriste se različiti kriteriji: VO₂max dostiže plato sa porastom opterećenja, frekvencija srca je unutar 10 otkucaja ili 5% u

odnosu na maksimalnu frekvenciju za dob, respiracijski omjer RER>1,10, dišni ekvivalent VE/VO₂>30, koncentracija laktata >8 mmol/L, subjektivni osjećaj iscrpljenja. Standardno se mjere spiroergometrijski parametri (maksimalni primitak kisika, relativni maksimalni primitak kisika, maksimalna frekvencija srca, maksimalna minutna ventilacija, maksimalni dišni volumen, maksimalna frekvencija disanja, brzina trčanja pri VO₂max, maksimalna brzina saga), te se određuju razine laktata i glukoze u određenim vremenskim intervalima. Za vrijeme trajanja testa ispitanik na pitanje mjeritelja rukom pokazuje stupanj vlastitog zamora po Borgovoj skali, što je unaprijed iskomunicirano.

Kapilarni uzorci krvi uzimani su u četiri vremenske točke: u minuti mirovanja prije početka testa te u prvoj, trećoj i petoj minuti oporavka. Koncentracija laktata određivana je uređajem Lactate Scout Sport, dok je koncentracija glukoze mjerena uređajem FreeStyle Optium Neo. Ovaj raspored mjerenja omogućio je uvid u vršne vrijednosti laktata i glukoze te dinamiku oporavka nakon progresivnog opterećenja.

Na temelju maksimalnih vrijednosti postignutih tijekom testa, za svakog ispitanika izračunata je individualna brzina trčanja pri kojoj je postignut maksimalni primitak kisika ($v\text{VO}_2\text{max}$) ili plateau VO_2 bez obzira na daljnji rast brzine trčanja, koja se u nastavku koristila kao referentna vrijednost za izvođenje tlim testa.

4.5. Test izdržaja pri $v\text{VO}_2\text{max}$ (Tlim test)

Nakon inicijalno provedenog KF1 protokola, a u razmaku od po tri dana, ispitanici su u drugom i trećem dolasku u dijagnostički centar izveli Tlim test za procjenu anaerobnog kapaciteta. Testovi su izvedeni jednom u uvjetu nakon intravenske primjene magnezija, jednom u uvjetu nakon primjene placeba, ovisno o ranije zadanom redoslijedu primjene za svakog ispitanika. Test je proveden nakon ranije određene brzine trčanja svakog pojedinog ispitanika pri kojoj je zabilježen maksimalni primitak kisika ($v\text{VO}_2\text{max}$). Za razliku od KF1 protokola koji je test s progresivnim opterećenjem, u Tlim testu ispitanik svoje trčanje započinje odmah pri brzini $v\text{VO}_2\text{max}$ i mora trčati što je duže moguće pri čemu je rezultat izražen u vremenu izdržaja trčanja pri $v\text{VO}_2\text{max}$. Ovaj test predstavlja pouzdan i osjetljiv način procjene sposobnosti održavanja i izdržaja u naporu visokog intenziteta i ovdje je korišten kao laboratorijski ekvivalent natjecateljske utrke. Prije oba testa ispitanici su provodili standardizirano zagrijavanje koje je uključivalo trčanje na pokretnom sagu u trajanju od 10 min, dinamičko istezanje i tri ubrzanja na progresivnim brzinama pokretnog saga. Nakon zagrijavanja ispitanici su primili intravensku injekciju magnezija ili placeba, ovisno o ranije određenoj sekvenci, nakon čega su spojeni na mjerne uređaje i započeli izvođenje samog testa.

Intervencijski protokol uključivao je intravensku primjenu 1 grama magnezijevog sulfata razrijeđenog fiziološkom otopinom (0.9% NaCl) do ukupnog volumena od 10ml otopine, ili primjenu 10 ml placeba koji je bio čista fiziološka otopina, ovisno o režimu kojem su ispitanici taj dan bili podvrgnuti. Otopine su bile izgledom identične i pripremljene u identičnim štrcaljkama, a primjenjivane su kao spora intravenska injekcija putem perifernog venskog puta nakon provedenog zagrijavanja, a prije izvođenja Tlim testa. Primjenu je provodila liječnica, anesteziologica, a ispitanici su za vrijeme primjene bili u ležećem položaju kako bi se osigurala

udobnost. Tijekom istraživanja nisu zabilježene nikakve nuspojave, što je u skladu sa sigurnosnim profilom primjene magnezija u zdravih osoba s urednom bubrežnom funkcijom. Razmak od tri dana između dva intervencijska protokola i TLim testova odabran je kako bi se osiguralo potpuno povlačenje akutnih učinaka magnezija i potpuni oporavak od prethodnog visokointenzivnog opterećenja.

Nakon primjene otopine započinjao je TLim test. Ispitanici su odmah započinjali trčanje konstantnom brzinom ranije individualno određene $\dot{V}O_{2\max}$ sve do trenutka voljne iscrpljenosti kada više nisu mogli održavati zadani intenzitet unatoč verbalnoj motivaciji. Vrijeme od početka do prekida testa zabilježeno je u sekundama i korišteno kao osnovni pokazatelj izdržaja. Prekid testa nastupao je u trenutku kada je ispitanik jasno rukom pokazao da ne može nastaviti ili kada je po procjeni mjeritelja postalo očito da ne može više održavati zadani intenzitet unatoč verbalnom poticaju mjeritelja. Ovaj kriterij prekida standardiziran je za sve ispitanike. Sve testove provodio je isti mjeritelj.

Tijekom testa kontinuirano su bilježeni ventilacijski parametri i frekvencija srca. Koncentracije laktata i glukoze i u ovom su testu mjerene u minuti mirovanja prije početka testa i odmah nakon dovršetka u prvoj, trećoj i petoj minuti oporavka, što je omogućilo usporedbu metaboličkog odgovora pod utjecajem magnezija i u placebo kontrolnim uvjetima.

Vrijeme izdržaja u TLim testu definirano je kao primarna varijabla istraživanja, dok su sekundarne varijable obuhvaćale ventilacijske i metaboličke parametre, frekvenciju srca te praćenje promjena koncentracije laktata i glukoze ovisno o režimu u kojem je test proveden (magnezij ili placebo).

Nakon završetka drugog TLim testa, svi ispitanici su ispunili kratki upitnik kojim je zabilježena subjektivna procjena napora. U upitniku su ispitanici bili zamoljeni da označe koji im je TLMIM test bio subjektivno lakši za izvođenje, pri čemu su kao odgovor mogli odabrati prvi ili drugi provedeni TLim test. Ova procjena korištena je kao kvalitativni, deskriptivni pokazatelj percepcije napora, bez primjene skale ili numeričkog bodovanja. Subjektivna procjena napora prikupljena je nakon završetka cjelokupnog testiranja kako bi se izbjegao utjecaj očekivanja ispitanika na izvedbu tijekom pojedinog testa. Dobiveni podatci analizirani su deskriptivno i korišteni kao potporni nalaz u interpretaciji rezultata istraživanja.

Tablica 1. Prikaz tijeka istraživanja po fazama.

Faza istraživanja	Opis postupka
Uključivanje ispitanika	Odabir ispitanika prema kriterijima uključenja i isključenja, informirani pristanak, zdravstvena anamneza, fizikalni pregled, EKG zapis i laboratorijska obrada.
Inicijalno testiranje (KF1)	Progresivni spiroergometrijski test KF1 radi procjene maksimalnog aerobnog kapaciteta i određivanja brzine $\dot{V}O_{2max}$.
Randomizacija redosljeda testiranja za TLim	Randomizirani crossover dizajn kojim je određen redosljed uvjeta za provođenje TLim testova (magnezij-placebo/placebo-magnezij).
TLim test – prva faza	Provođenje TLim testa na brzini $\dot{V}O_{2max}$, nakon intravenske primjene magnezija ili placeba. Kontinuirano praćenje ventilacijskih i kardiovaskularnih parametara, bilježenje vremena tTLim i tRER, uzorkovanje kapilarne krvi za određivanje laktata i glukoze u mirovanju prije testa te u 1., 3. i 5. minuti oporavka.
Razdoblje ispiranja (wash-out)	Razdoblje od tri dana između dva TLim testiranja bez specifičnih treninga ili dodatnih intervencija.
TLim test – druga faza	Provođenje TLim testa u suprotnom eksperimentalnom uvjetu (placebo ili magnezij), uz identičan protokol i mjerenja kao u prvoj fazi.
Subjektivna procjena napora	Nakon završetka drugog TLim testa ispitanici u upitniku označavaju koji im je TLim test bio subjektivno lakši za izvođenje (prvi ili drugi).

4.6. Obrada podataka i statistička analiza

Statistička analiza provedena je u programu Statistica 13.3. Deskriptivna statistika korištena je za prikaz centralnih tendencija i raspršenosti. Normalnost distribucije pojedinih varijabli ispitivana je Shapiro–Wilk testom, nakon čega su razlike između uvjeta s magnezijem i uvjeta s placebo analizirane t-testom za zavisne uzorke ili Wilcoxonovim testom ako normalnost nije bila zadovoljena. Razina statističke značajnosti postavljena je na $p < 0,05$, a uz to je izračunata veličina efekta (Cohen d) radi procjene praktične važnosti dobivenih rezultata.

5. REZULTATI

5.1. Opis uzorka

U istraživanje je uključeno ukupno 28 ispitanika, od čega 15 muškaraca i 13 žena, u dobi od 16 do 28 godina. Prosječna dob cijelog uzorka iznosila je $20,25 \pm 3,89$ godina. Prosječna tjelesna visina bila je $177,58 \pm 9,93$ cm, dok je prosječna tjelesna masa iznosila $65,55 \pm 11,14$ kg. Vrijednosti forsiranog vitalnog kapaciteta (FVC) kretale su se od 3,68 L do 7,58 L, uz prosječnu vrijednost $5,03 \pm 1,02$ L, što ukazuje na urednu plućnu funkciju ispitanika. Individualne vrijednosti izmjerenih varijabli za svakog ispitanika prikazane su u Tablici 2.

Tablica 2. Demografske osobine i prikaz individualnih vrijednosti izmjerenih varijabli inicijalne spirometrije i spiroergometrije prema KF1 protokolu.

Ispitanik	Dob	Spol	Visina (cm)	Težina (kg)	FVC (L)	RVO2max-KF1 (ml/kg/min)
1.	24	F	170	62,90	4,61	49,16
2.	26	F	162,8	52,90	3,70	59,82
3.	20	M	168	64,30	5,47	72,32
4	17	M	185,1	69,10	6,22	71,50
5.	25	M	190	82,30	6,01	60,25
6.	18	M	194,5	77,90	6,30	72,62
7.	26	M	180,4	81,70	6,45	60,97
8.	26	F	167	53,30	3,86	58,38
9.	19	M	178,9	65,90	5,43	61,11
10.	18	M	175,6	55,00	3,86	66,66
11.	27	F	178,8	64,20	5,17	59,99
12.	24	M	191,3	80,60	7,58	61,46
13.	18	F	165,4	52,60	3,94	48,76
14.	16	M	189,1	71,90	5,63	57,44
15.	16	F	171,4	59,60	4,45	54,57
16.	16	F	174,3	54,50	4,01	49,77
17.	20	F	161,5	55,90	3,68	51,12
18.	20	M	180,6	67,20	5,41	60,86
19.	20	M	184,5	79,20	5,96	57,22
20.	22	M	196,3	90,10	5,59	48,63
21.	17	F	169	54,40	4,53	52,90
22.	16	M	186	72,50	5,02	51,38
23.	17	F	167	49,90	3,69	57,21
24.	16	M	184	66,30	5,92	55,75
25.	18	M	184	76,70	5,36	52,54
26.	18	F	167	57,30	4,32	51,46
27.	19	F	171,7	54,90	4,02	52,27
28.	28	F	178	62,20	4,70	45,83

Legenda: FVC-forsirani vitalni kapacitet izmjeren u litrama; RVO2max-KF1- relativni maksimalni primitak kisika u inicijalnom spiroergometrijskom KF1 protokolu.

Muški ispitanici (n = 15)

Prosječna dob muških ispitanika iznosila je $20,13 \pm 3,46$ godina. Prosječna visina bila je $183,87 \pm 8,77$ cm, a tjelesna masa $72,55 \pm 9,48$ kg. Vrijednosti FVC-a u muškaraca kretale su se od 3,86 L do 7,58 L, s prosječnom vrijednošću $5,82 \pm 1,02$ L. Ispitanici su ostvarili prosječni relativni VO_2max od $60,7 \pm 7,4$ $\text{ml}\cdot\text{kg}^{-1}\cdot\text{min}^{-1}$, s rasponom vrijednosti od 48,6 do 72,6 $\text{ml}\cdot\text{kg}^{-1}\cdot\text{min}^{-1}$. Ove vrijednosti upućuju na visoku razinu kardiorespiratorne spremnosti, tipičnu za trenirane mlade sportaše, s izraženom interindividualnom varijabilnošću koja je očekivana u sportskoj populaciji (Tablica 3.).

Ženski ispitanici (n = 13)

Prosječna dob ženskih ispitanica iznosila je $20,38 \pm 4,48$ godina. Prosječna visina bila je $170,38 \pm 5,84$ cm, a prosječna tjelesna masa $56,57 \pm 4,42$ kg. Vrijednosti FVC-a kretale su se od 3,68 L do 5,17 L, uz prosječnu vrijednost $4,23 \pm 0,51$ L. Ženski Ispitanice su ostvarile prosječni relativni VO_2max od $53,2 \pm 4,5$ $\text{ml}\cdot\text{kg}^{-1}\cdot\text{min}^{-1}$, uz raspon od 45,8 do 60,0 $\text{ml}\cdot\text{kg}^{-1}\cdot\text{min}^{-1}$. Vrijednosti RVO_2max kod ženskih ispitanica također ukazuju na vrlo dobru aerobnu spremnost, usporedivu s treniranim sportašicama slične dobi (Tablica 3.).

U skladu s poznatim spolnim razlikama u kardiorespiratornoj fiziologiji, oba spola karakteriziraju uredne izmjerene respiratorne vrijednosti, bez odstupanja koja bi mogla utjecati na valjanost provedenog istraživanja. Muški ispitanici u ovom istraživanju u prosjeku su ostvarili više vrijednosti relativnog VO_2max u odnosu na ženske ispitanice. Unatoč toj razlici, obje skupine karakterizira visoka aerobna sposobnost, što potvrđuje da je uzorak prikladan za ispitivanje fizioloških odgovora na visokointenzivno opterećenje u TLim protokolu.

Demografske osobine i prikaz izmjerenih varijabli prema spolu ispitanika prikazani su u Tablici 3.

Tablica 3. Demografske osobine i prikaz izmjerenih varijabli inicijalne spirometrije i spiroergometrije prema KF1 protokolu razvrstano prema spolu ispitanika.

Ispitanici	Dob (god)	Visina (cm)	Tjelesna masa (kg)	FVC (L)	RVO ₂ max-KF1 (mL/kg/min)
Muški ispitanici	20,13 ± 3,46	183,87 ± 8,77	72,55 ± 9,48	5,82 ± 1,02	60,7 ± 7,4
Ženski ispitanici	20,38 ± 4,48	170,38 ± 5,84	56,57 ± 4,42	4,23 ± 0,51	53,2 ± 4,5

Legenda: FVC – forsirani vitalni kapacitet izražen u litrama; RVO₂max-KF1 – relativni maksimalni primitak kisika u KF1 testu izražen u mililitrima po kilogramu u minuti

5.2. Rezultati inicijalnog spiroergometrijskog testiranja

Spiroergometrijsko testiranje provedeno prema KF1 protokolu korišteno je za procjenu aerobnog kapaciteta ispitanika i određivanje individualne brzine pri kojoj je postignut maksimalni primitak kisika (vVO₂max), koja je zatim služila kao referentna vrijednost za izvođenje tlim testova. Rezultati inicijalnog testiranja prikazani su u Tablici 4.

Prosječni relativni maksimalni primitak kisika (RVO₂max) iznosio je 57,21 ± 7,25 mL/kg/min, dok je prosječni apsolutni VO₂max bio 3,76 ± 0,87 L/min. Maksimalna proizvodnja ugljikova dioksida (VCO₂max) iznosila je 4,11 ± 0,96 L/min.

Tijekom testiranja, ispitanici su postigli prosječnu maksimalnu brzinu trčanja (vmax-KF1) od 18,98 ± 1,64 km/h, dok je prosječna brzina pri maksimalnom primitku kisika (vVO₂max) iznosila 18,82 ± 1,60 km/h.

Izmjereni ventilacijski parametri potvrdili su postignuti maksimalni napor. Prosječna maksimalna ventilacija (VEmax) iznosila je 137,39 ± 29,58 L/min, maksimalni volumen disanja (VTmax) 2,31 ± 0,48 L, a maksimalna frekvencija disanja (BFmax) 60,75 ± 7,26 udisaja/min. Maksimalna frekvencija srca (HRmax-KF1) iznosila je 195,21 ± 11,46 otkucaja/min.

Ventilacijski pragovi procijenjeni tijekom testa pokazali su da se drugi ventilacijski prag (VT2) javljao pri prosječnom apsolutnom primitku kisika (VO₂VT2) od 3,34 ± 0,73 L/min, uz pripadajuću brzinu (vVT2) od 15,55 ± 1,58 km/h.

Ovi rezultati potvrđuju da su ispitanici bili sposobni dosegnuti maksimalni napor te pružaju referentne fiziološke vrijednosti za interpretaciju ishoda TLim testova.

Tablica 4. Prikaz izmjerenih varijabli u inicijalnom spiroergometrijskom testiranju prema KF1 protokolu (prikazane su srednje vrijednosti i standardna devijacija).

Test	RVO ₂ max	VO ₂ max	vmax	vVO ₂ max
	(mL/kg/min)	(L/min)	(km/h)	(km/h)
KF1	57,21 ± 7,25	3,76 ± 0,87	18,98 ± 1,64	18,82 ± 1,60
	VE _{max}	VT _{max}	BF _{max}	HR _{max}
	(L/min)	(L)	(udisaja/min)	(otkucaja/min)
	137,39 ± 29,58	2,31 ± 0,48	60,75 ± 7,26	195,21 ± 11,46

Legenda: RVO₂max – relativni maksimalni primitak kisika; VO₂max – maksimalni primitak kisika; vmax – maksimalna postignuta brzina; vVO₂max – brzina pri kojoj je postignut maksimalni primitak kisika; VE_{max} – maksimalna minutna ventilacija; VT_{max} – maksimalni dišni volumen; BF_{max} – maksimalna frekvencija disanja; HR_{max} – maksimalna srčana frekvencija

5.3. Vrijeme izdržaja u TLim testu

Vrijeme izdržaja u TLim testu analizirano je u oba eksperimentalna uvjeta; nakon intravenske primjene magnezija i nakon intravenske primjene placeba.

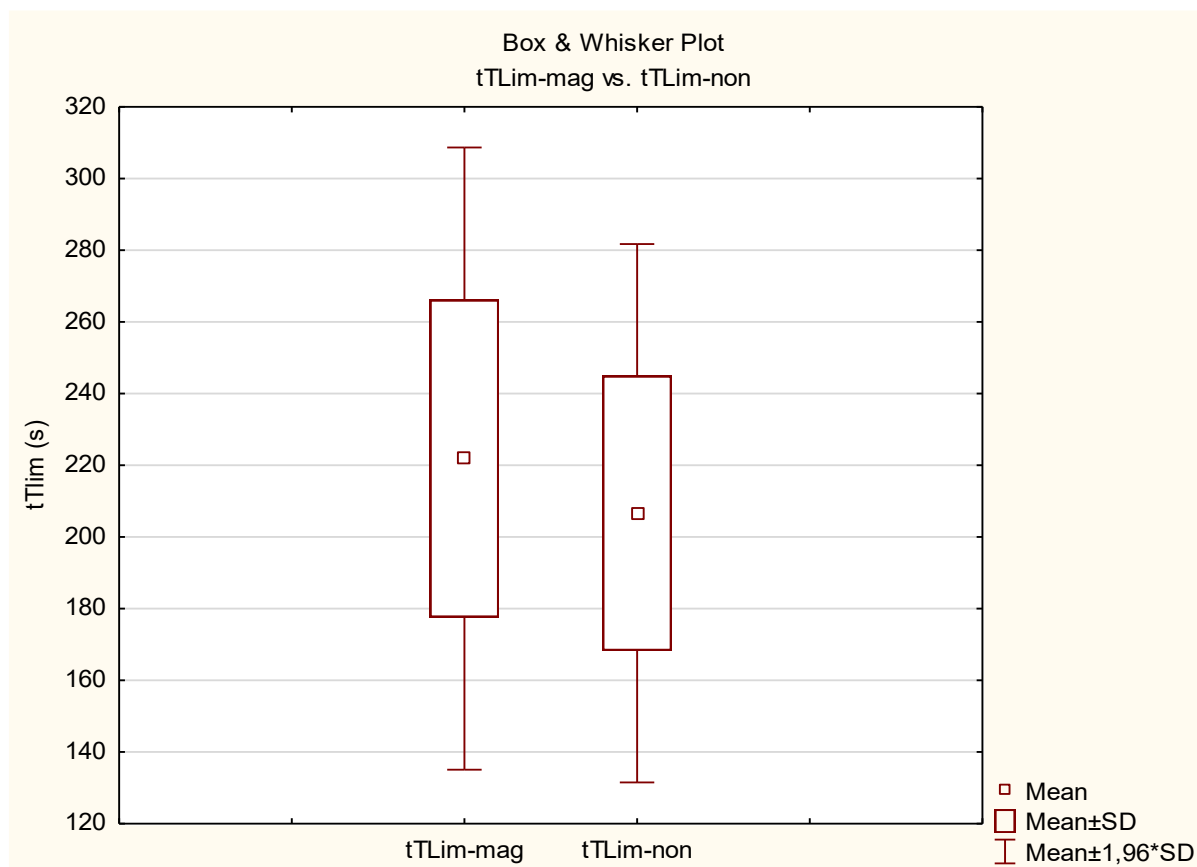
5.3.1. Vrijeme izdržaja izraženo u sekundama

Vrijeme izdržaja izraženo u sekundama bilo je statistički značajno dulje u uvjetu s magnezijem u usporedbi s placebom. Prosječno vrijeme izdržaja iznosilo je 221,89 ± 44,29 s nakon intravenske primjene magnezija te 206,64 ± 38,32 s nakon intravenske primjene placeba (Tablica 5., Slika 1.). Analiza zavisnih uzoraka pokazala je da je razlika između uvjeta iznosila 15,25 s (95 % CI: 8,03 – 22,47 s), što je bilo statistički značajno ($t = 4,33$; $p = 0,00$).

Tablica 5. Rezultati t-testa za zavisne uzorke za vrijeme izdržaja u TLim testovima u sekundama (prikazane su srednje vrijednosti i standardna devijacija).

Varijabla	TLim-mag	TLim-non	t	p
tTLim (s)	221,89 ± 44,29	206,64 ± 38,32	4,33	0,00

Legenda: tTLim (s) – vrijeme izdržaja u TLim testu izraženo u sekundama; TLim-mag – test u uvjetu s magnezijem; TLim-non – test u uvjetu s placebom; t – t vrijednost t-testa; p – p vrijednost t-testa.



Slika 1. Usporedni prikaz rezultata testiranja za vrijeme izdržaja u TLim testovima u sekundama .

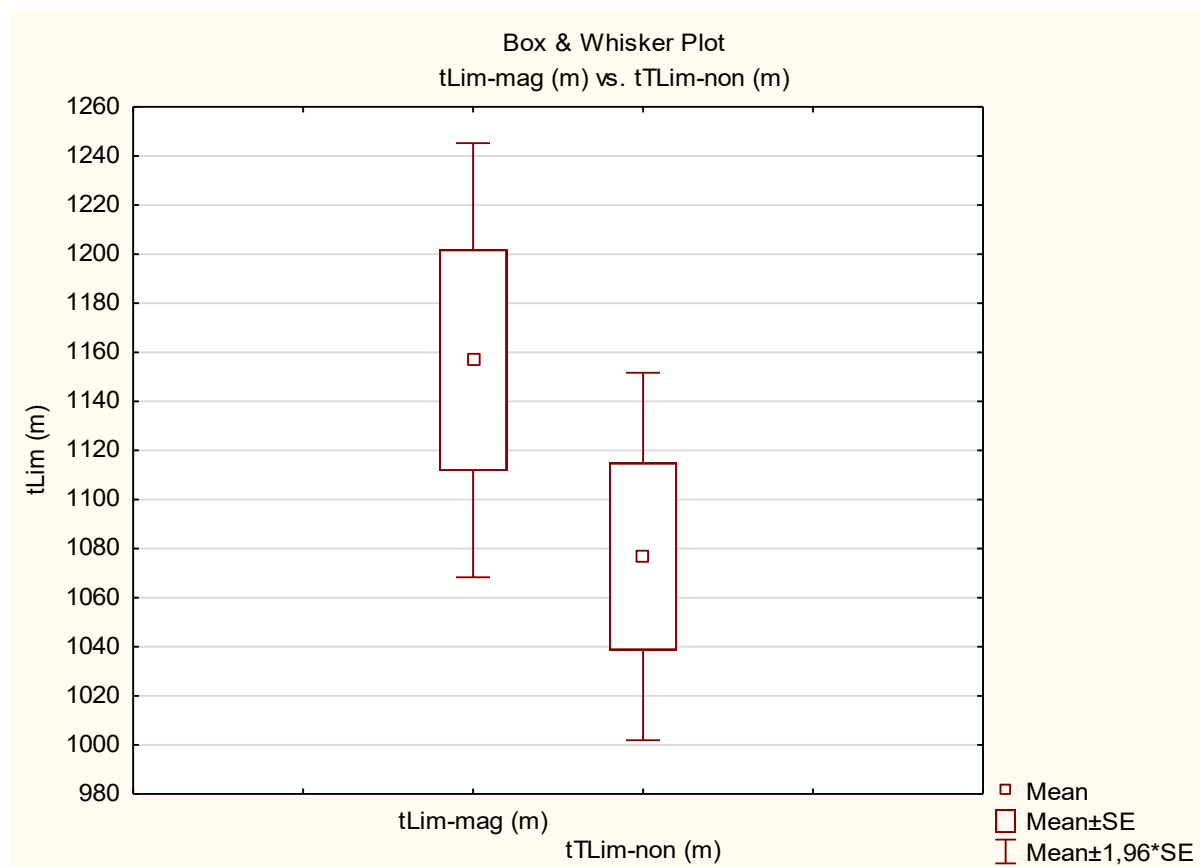
5.3.2. Vrijeme izdržaja izraženo u prijedenoj udaljenosti

Kada je vrijeme izdržaja preračunato u prijedenu udaljenost, također je zabilježena statistički značajna razlika između eksperimentalnih uvjeta. U uvjetu s magnezijem ispitanici su prosječno pretrčali $1156,78 \pm 238,84$ m, dok je u uvjetu s placeboom prosječna prijedena udaljenost iznosila $1076,81 \pm 202,11$ m (Tablica 6., Slika 2.) Razlika između uvjeta iznosila je 79,98 m (95 % CI: 41,10 – 118,85 m) te je bila statistički značajna ($t = 4,22$; $p = 0,00$).

Tablica 6. Rezultati t-testa za zavisne uzorke za prijedenu udaljenost u TLim testovima u metrima (prikazane su srednje vrijednosti i standardna devijacija).

Varijabla	TLim-mag	TLim-non	t	p
TLim (m)	1156,78 ± 238,84	1076,81 ± 202,11	4,22	0,00

Legenda: TLim (m) – pretrčana udaljenost u TLim testu izražena u metrima; TLim-mag – test u uvjetu s magnezijem; TLim-non – test u uvjetu s placeboom; t – t vrijednost t-testa; p – p vrijednost t-testa.



Slika 2. Usporedni prikaz rezultata testiranja za prijeđenu udaljenost u TLim testovima u metrima.

5.4. Vrijeme do postizanja maksimalnog respiracijskog omjera (*tRER*)

Vrijeme potrebno za postizanje maksimalnog respiracijskog omjera tijekom tlim testa (*tRER*) analizirano je u poduzorku od 16 ispitanika, za koje su bili dostupni potpuni podatci u oba eksperimentalna uvjeta. Rezultati su prikazani u Tablici 7.

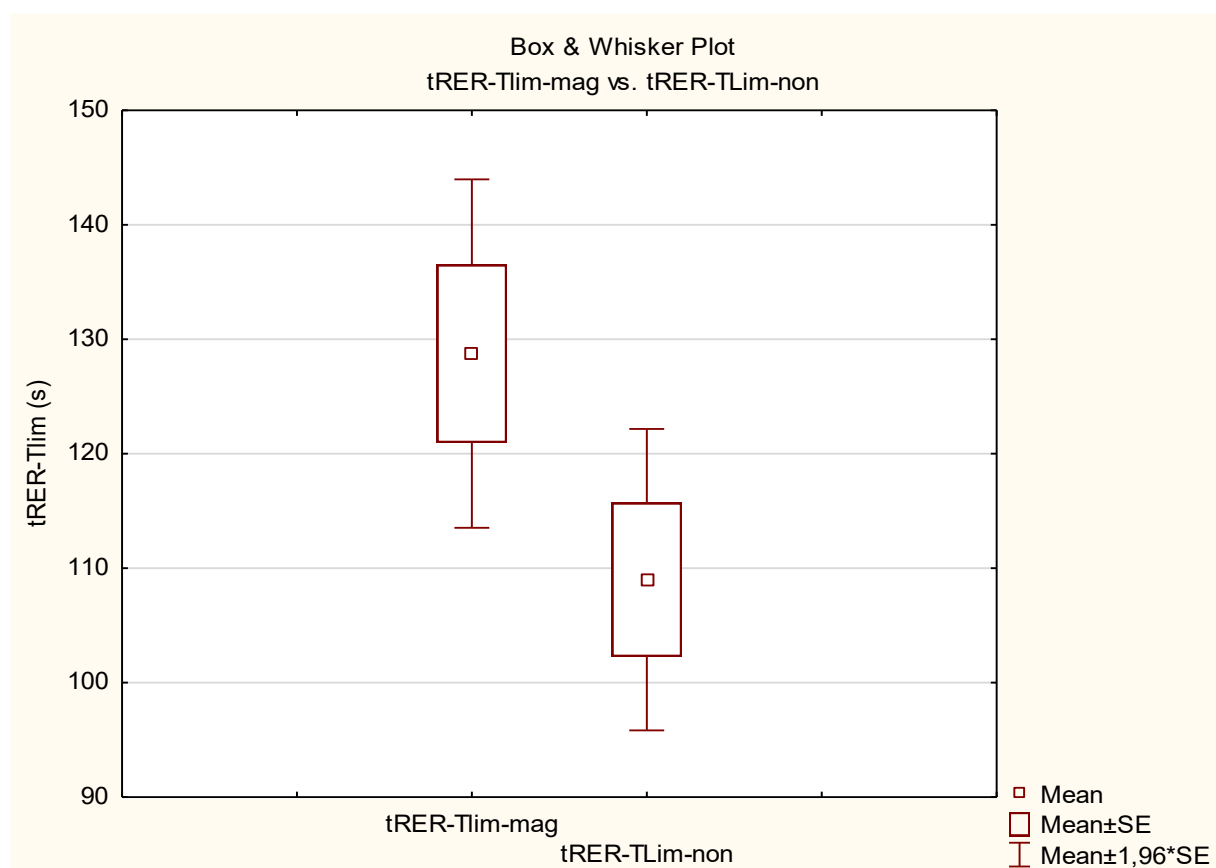
U uvjetu intravenske primjene magnezija prosječna vrijednost *tRER*-a iznosila je $128,75 \pm 31,07$ s, dok je u placebo uvjetu prosječna vrijednost bila $109,00 \pm 26,87$ s (Slika 3.).

t-test za zavisne uzorke pokazao je da je vrijeme do postizanja maksimalnog RER-a bilo statistički značajno dulje u uvjetu primjene magnezija u odnosu na placebo ($t = 4,43$; $p < 0,001$). Prosječna razlika između uvjeta iznosila je 19,75 s, s 95 % intervalom pouzdanosti od 10,24 do 29,26 s.

Tablica 7. Rezultati t-testa za zavisne uzorke za vrijeme do postizanja maksimalnog respiracijskog omjera u TLim testovima u sekundama (prikazane su srednje vrijednosti i standardna devijacija).

Varijabla	TLim-mag	TLim-non	t	p
tRER-TLim (s)	128,75 ± 31,07	109,00 ± 26,87	4,43	0,00

Legenda: tRER-TLim (s) – vrijeme do postizanja maksimalnog respiracijskog omjera izraženo u sekundama; TLim-mag (s) – test u uvjetu s magnezijem; TLim-non – test u uvjetu s placebo; t – t vrijednost t-testa; p – p vrijednost t-testa.



Slika 3. Usporedni prikaz rezultata za vrijeme do postizanja maksimalnog respiracijskog omjera u TLim testovima u sekundama.

5.5. Ventilacijski i respiracijski parametri

5.5.1. Relativni primitak kisika (RVO_2max) tijekom TLim testa

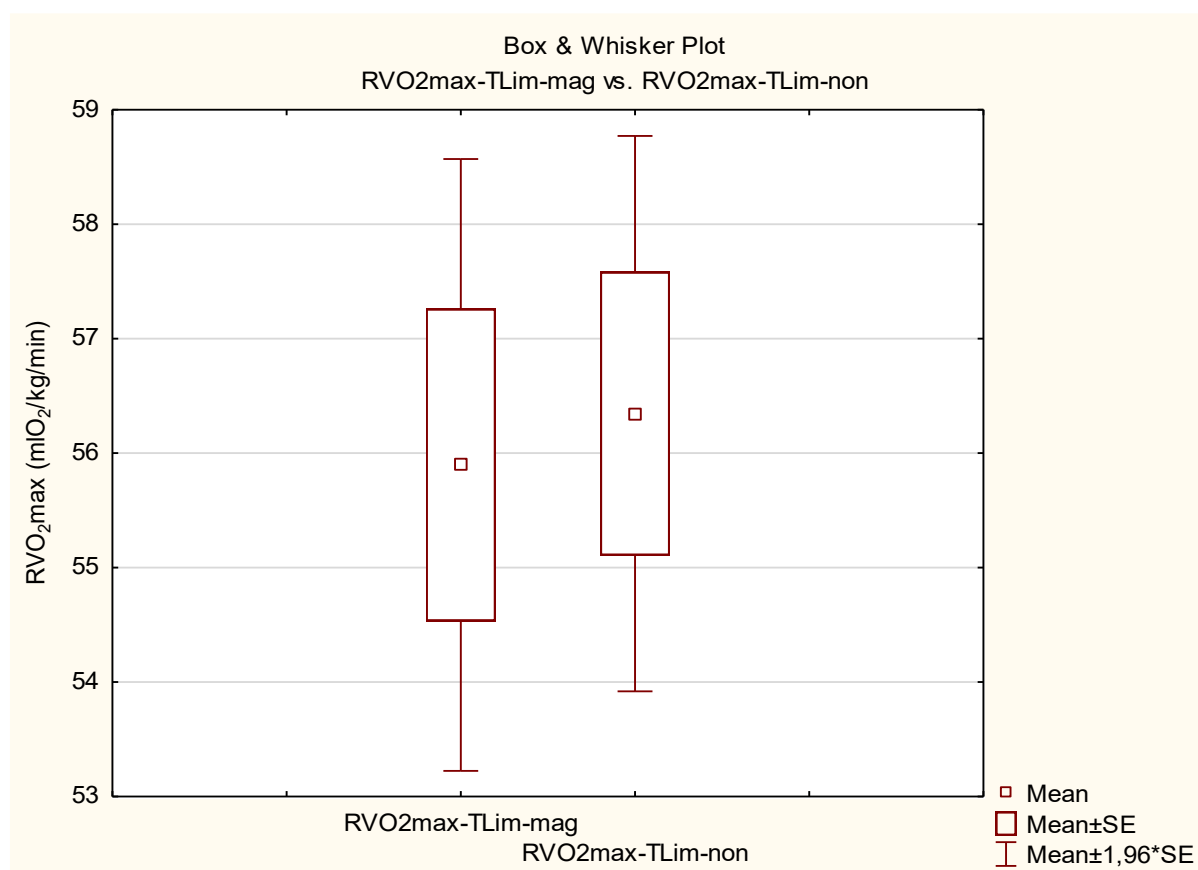
Relativni primitak kisika analiziran je tijekom tlim testa u uvjetu intravenske primjene magnezija i u placebo uvjetu. Rezultati su prikazani u Tablici 8. U uvjetu primjene magnezija prosječna vrijednost RVO_2max iznosila je $55,90 \pm 7,09$ ml/kg/min, dok je u placebo uvjetu iznosila $56,35 \pm 6,43$ ml/kg/min (Slika 4.).

t-test za zavisne uzorke nije pokazao statistički značajnu razliku između uvjeta s magnezijem i placebo ($t = -1,00$; $p = 0,33$). Prosječna razlika između uvjeta iznosila je $-0,45$ ml/kg/min, uz 95 % interval pouzdanosti od $-1,37$ do $0,48$ ml/kg/min. Relativni primitak kisika tijekom tlim testa usporediv je u oba uvjeta, bez statistički značajne razlike.

Tablica 8. Rezultati t-testa za zavisne uzorke za relativni maksimalni primitak kisika u TLim testovima u ml/kg/min (prikazane su srednje vrijednosti i standardna devijacija).

Varijabla	TLim-mag	TLim-non	t	p
RVO2max-TLim (ml/kg/min)	$55,90 \pm 7,09$	$56,35 \pm 6,43$	-1,00	0,33

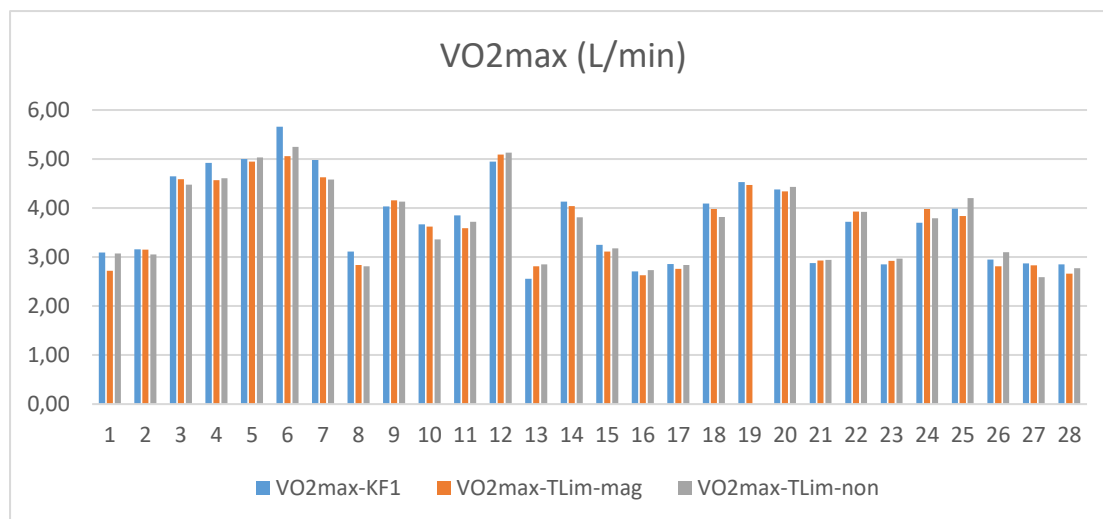
Legenda: RVO2max-TLim (ml/kg/min) – relativni maksimalni primitak kisika u TLim testu izražen u mililitrima po kilogramu, po minuti; TLim-mag – test u uvjetu s magnezijem; TLim-non – test u uvjetu s placebo; t – t vrijednost t-testa; p – p vrijednost t-testa.



Slika 4. Usporedni prikaz rezultata za relativni maksimalni primitak kisika u TLim testovima.

5.5.2. Apsolutni primitak kisika (VO_{2max}) tijekom TLim testa

Slika 5. prikazuje individualne vrijednosti maksimalnog primitka kisika u KF1 testu te tijekom TLim testa u oba eksperimentalna uvjeta.



Slika 5. Individualne vrijednosti maksimalnog primitka kisika u KF1 testu te tijekom TLim testa u oba eksperimentalna uvjeta.

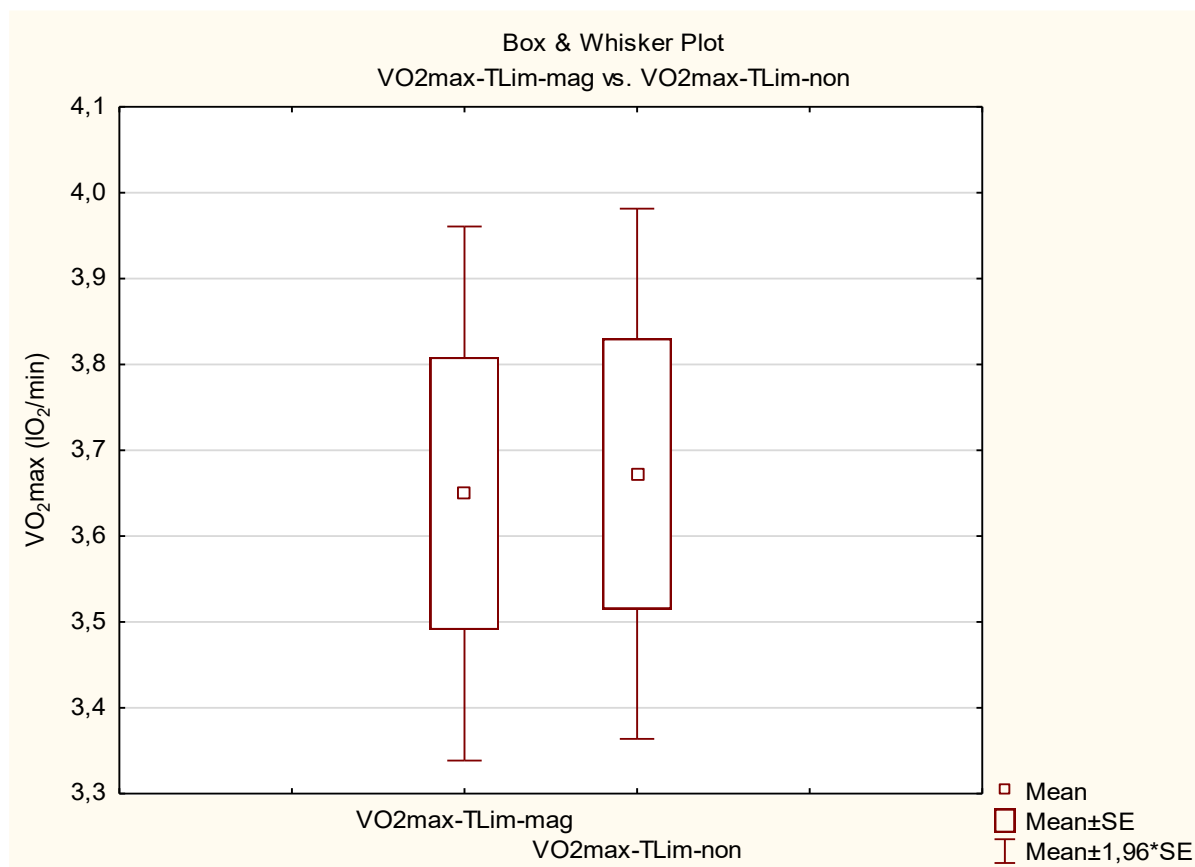
Apsolutni primitak kisika analiziran je tijekom tlim testa u uvjetu intravenske primjene magnezija i u placebo uvjetu. U uvjetu primjene magnezija prosječna vrijednost apsolutnog $VO_2\max$ iznosila je $3,65 \pm 0,82$ L/min, dok je u placebo uvjetu iznosila $3,67 \pm 0,82$ L/min (Tablica 9., Slika 6.).

t-test za zavisne uzorke nije pokazao statistički značajnu razliku između dvaju uvjeta ($t = -0,73$; $p = 0,47$). Prosječna razlika iznosila je $-0,02$ L/min, uz 95 % interval pouzdanosti od $-0,09$ do $0,04$ L/min. Apsolutni primitak kisika tijekom TLim testa usporediv je u oba uvjeta, bez statistički značajne razlike.

Tablica 9. Rezultati t-testa za zavisne uzorke za apsolutni maksimalni primitak kisika u TLim testovima u L/min (prikazane su srednje vrijednosti i standardna devijacija).

Varijabla	TLim-mag	TLim-non	t	p
$VO_2\max\text{-TLim (L/min)}$	$3,65 \pm 0,82$	$3,67 \pm 0,82$	-0,73	0,47

Legenda: $VO_2\max\text{-TLim (L/min)}$ – apsolutni maksimalni primitak kisika u TLim testu izražen u litrama po minuti; TLim-mag – test u uvjetu s magnezijem; TLim-non – test u uvjetu s placebo; t – t vrijednost t-testa; p – p vrijednost t-testa.



Slika 6. Rezultati t-testa za zavisne uzorke za apsolutni primitak kisika u TLim testovima u L/min.

5.5.3. Maksimalna proizvodnja ugljikova dioksida (VCO_2max) tijekom TLim testa

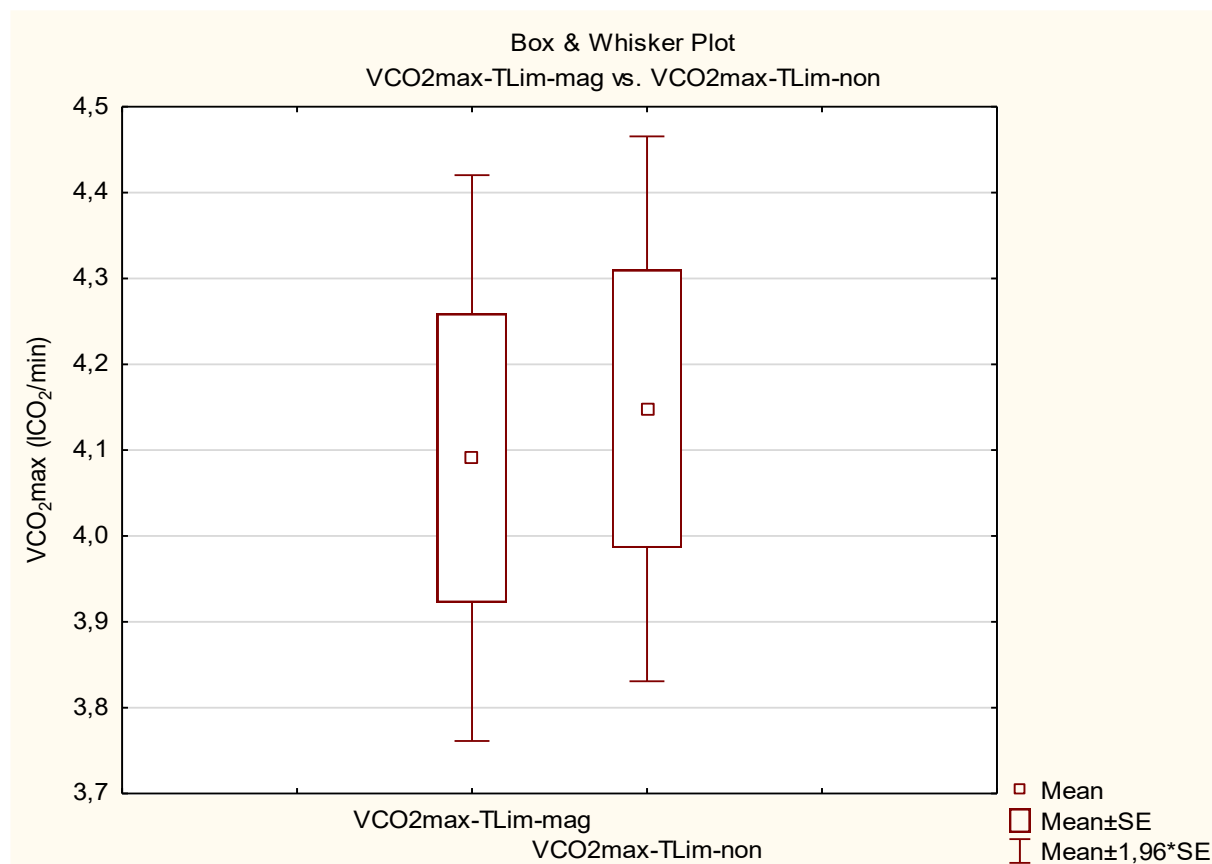
Maksimalna proizvodnja ugljikova dioksida (VCO_2max) analizirana je tijekom TLim testa u uvjetu intravenske primjene magnezija i u placebo uvjetu. U uvjetu s magnezijem prosječna vrijednost VCO_2max iznosila je $4,09 \pm 0,87$ L/min, dok je u placebo uvjetu iznosila $4,15 \pm 0,84$ L/min. Rezultati analize prikazani su u Tablici 10. i na Slici 7.

T-test za zavisne uzorke nije pokazao statistički značajnu razliku između dvaju uvjeta ($t = -1,52$; $p = 0,14$). Prosječna razlika između uvjeta iznosila je $-0,06$ L/min, uz 95 % interval pouzdanosti od $-0,13$ do $0,02$ L/min. Rezultati pokazuju da je maksimalna proizvodnja CO_2 tijekom TLim testa usporediva u oba uvjeta, bez statistički značajnih razlika.

Tablica 10. Rezultati t-testa za zavisne uzorke za maksimalnu proizvodnju ugljikovog dioksida u TLim testovima u L/min (prikazane su srednje vrijednosti i standardna devijacija).

Varijabla	TLim-mag	TLim-non	t	p
VCO ₂ max-TLim (L/min)	4,09 ± 0,87	4,15 ± 0,84	26	0,14

Legenda: VCO₂max-TLim (L/min) – maksimalna proizvodnja ugljikovog dioksida u TLim testu izražena u litrama u minuti; TLim-mag – test u uvjetu s magnezijem; TLim-non – test u uvjetu s placebo; t – t vrijednost t-testa; p – p vrijednost t-testa.



Slika 7. Usporedni prikaz rezultata za maksimalnu proizvodnju ugljikovog dioksida u TLim testovima.

5.5.4. Maksimalna minutna ventilacija (VEmax) tijekom TLim testa

Maksimalna minutna ventilacija (VEmax) analizirana je tijekom TLim testa provedenog u uvjetu intravenske primjene magnezija u placebo uvjetu. U uvjetu s magnezijem prosječna vrijednost VEmax iznosila je 134,86 ± 28,02 L/min, dok je u placebo uvjetu iznosila 134,05 ± 26,71 L/min (Tablica 11.).

T-test za zavisne uzorke nije pokazao statistički značajnu razliku između dvaju uvjeta (t = 0,93; p = 0,36). Prosječna razlika između uvjeta iznosila je 0,81 L/min, uz 95 % interval pouzdanosti od -0,99 do 2,62 L/min.

Rezultati pokazuju da je maksimalna minutna ventilacija tijekom TLim testa usporediva u oba uvjeta, bez statistički značajnih razlika.

Tablica 11. Rezultati t-testa za zavisne uzorke za maksimalnu minutnu ventilaciju u TLim testovima u L/min (prikazane su srednje vrijednosti i standardna devijacija).

Varijabla	TLim-mag	TLim-non	t	p
VEmax-TLim (L/min)	134,86 ± 28,02	134,05 ± 26,71	0,93	0,36

Legenda: VEmax-TLim (L/min) – maksimalna minutna ventilacija u TLim testu izražena u litrama u minuti; TLim-mag – test u uvjetu s magnezijem; TLim-non – test u uvjetu s placebo; t – t vrijednost t-testa; p – p vrijednost t-testa.

5.5.5. Maksimalni dišni volumen (VT_{max}) tijekom TLim testa

Maksimalni dišni volumen (VT_{max}) analiziran je tijekom TLim testa provedenog u uvjetu intravenske primjene magnezija i placebo uvjetu. Rezultati su prikazani u Tablici 12.

U uvjetu s magnezijem prosječna vrijednost VT_{max} iznosila je $2,31 \pm 0,46$ L, dok je u placebo uvjetu iznosila $2,33 \pm 0,48$ L.

t-test za zavisne uzorke nije pokazao statistički značajnu razliku između dvaju uvjeta ($t = -0,74$; $p = 0,46$). Prosječna razlika između uvjeta iznosila je $-0,02$ L, uz 95 % interval pouzdanosti od $-0,07$ do $0,03$ L.

Rezultati pokazuju da je maksimalni dišni volumen tijekom TLim testa usporediv u oba uvjeta, bez statistički značajnih razlika.

Tablica 12. Rezultati t-testa za zavisne uzorke za maksimalni volumen disanja u TLim testovima u litrama (prikazane su srednje vrijednosti i standardna devijacija).

Varijabla	TLim-mag	TLim-non	t	p
VT_{max} -TLim (L)	$2,31 \pm 0,46$	$2,33 \pm 0,48$	-0,74	0,46

Legenda: VT_{max} -TLim (L) – maksimalni dišni volumen tijekom TLim testa izražen u litrama; TLim-mag – test u uvjetu s magnezijem; TLim-non – test u uvjetu s placebo; t – t vrijednost t-testa; p – p vrijednost t-testa.

5.5.6. Maksimalna frekvencija disanja (BF_{max}) tijekom TLim testa

Maksimalna frekvencija disanja (BF_{max}) analizirana je tijekom TLim testa u uvjetu intravenske primjene magnezija placebo uvjetu. U uvjetu s magnezijem prosječna vrijednost BF_{max} iznosila je $60,48 \pm 7,16$ udisaja/min, dok je u placebo uvjetu iznosila $59,44 \pm 7,25$ udisaja/min (Tablica 13.).

t-test za zavisne uzorke pokazao je statistički značajnu razliku između dvaju uvjeta ($t=2,37$; $p=0,03$). Prosječna razlika između uvjeta iznosila je 1,04 udisaja/min, uz 95 % interval pouzdanosti od 0,14 do 1,94 udisaja/min.

Rezultati pokazuju da je maksimalna frekvencija disanja tijekom tlim testa bila statistički značajno viša u uvjetu s magnezijem, iako se objektivno radi o razlici u jednom udahu.

Tablica 13. Rezultati t-testa za zavisne uzorke za maksimalnu frekvenciju disanja u TLim testovima u broju udaha u minuti (prikazane su srednje vrijednosti i standardna devijacija).

Varijabla	TLim-mag	TLim-non	t	p
BFmax-TLim (udah/min)	60,48 ± 7,16	59,44 ± 7,25	2,37	0,03

Legenda: BFmax-TLim – maksimalna frekvencija disanja u TLim testu izražena u broju udaha u minuti; TLim-mag – test u uvjetu s magnezijem; TLim-non – test u uvjetu s placebo; t – t vrijednost t-testa; p – p vrijednost t-testa.

5.5.7. Sažetak rezultata

Ventilacijski i respiratorno-metabolički odgovor tijekom TLim testa procijenjen je analizom maksimalne minutne ventilacije (VEmax), maksimalne frekvencije disanja (BFmax), maksimalnog dišnog volumena (VTmax), apsolutnog i relativnog maksimalnog primitka kisika (VO₂max i rVO₂max) te maksimalne proizvodnje ugljikova dioksida (VCO₂max), u uvjetu nakon intravenske primjene magnezija i u placebo uvjetu.

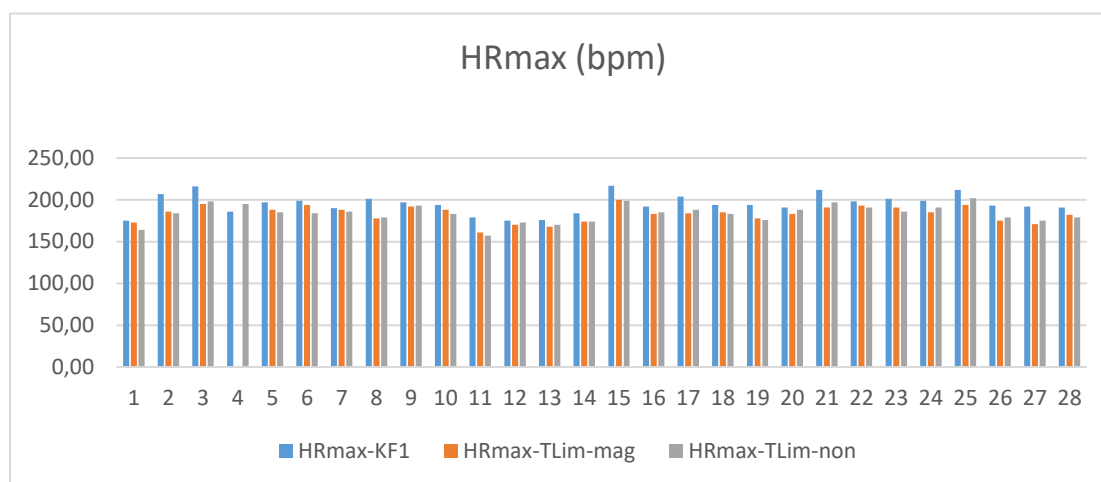
Analiza je pokazala da VEmax, VTmax, VO₂max, rVO₂max i VCO₂max nisu pokazali statistički značajne razlike između uvjeta. Vrijednosti navedenih parametara bile su usporedive u oba testiranja, što upućuje na stabilan ventilacijsko-metabolički odgovor neovisno o primjeni magnezija.

Za razliku od ostalih analiziranih varijabli, maksimalna frekvencija disanja (BFmax) bila je statistički značajno viša u uvjetu s magnezijem u usporedbi s placebo. Međutim, apsolutna razlika u BFmax bila je mala te nije bila praćena promjenama u VEmax ili VTmax, niti promjenama u apsolutnom ili relativnom primitku kisika.

Sveukupno, rezultati pokazuju da intravenska primjena magnezija nije dovela do promjena u većini ventilacijskih i respiratorno-metaboličkih parametara tijekom tlim testa, uz izuzetak blagog povećanja frekvencije disanja, dok su ukupni ventilacijski i oksidativni kapaciteti ostali nepromijenjeni u oba uvjeta.

5.6. Maksimalna frekvencija srca (HRmax) tijekom TLim testa

Slika 8. prikazuje individualne vrijednosti maksimalne frekvencije srca izmjerene u spiroergometrijskom KF1 testu te tijekom TLim testa u oba eksperimentalna uvjeta. Vrijednosti HRmax tijekom TLim testa bile su niže od maksimalnih vrijednosti ostvarenih pri maksimalnom opterećenju u progresivnom KF1 protokolu.



Slika 8. Individualne vrijednosti maksimalne frekvencije srca u KF1 testu te tijekom TLim testa u oba eksperimentalna uvjeta.

Maksimalna frekvencija srca (HRmax) analizirana je tijekom TLim testa u uvjetu intravenske primjene magnezija i u placebo uvjetu. Rezultati su prikazani u Tablici 14.

U uvjetu s magnezijem prosječna vrijednost HRmax iznosila je $183,33 \pm 9,59$ otkucaja/min, dok je u placebo uvjetu iznosila $183,30 \pm 10,54$ otkucaja/min.

t-test za zavisne uzorke nije pokazao statistički značajnu razliku između dvaju uvjeta ($t=0,04$; $p=0,97$). Prosječna razlika između uvjeta iznosila je 0,04 otkucaja/min, uz 95 % interval pouzdanosti od -1,74 do 1,81 otkucaja/min. Rezultati pokazuju da intravenska primjena magnezija nije utjecala na maksimalnu frekvenciju srca tijekom Tlim testa.

Tablica 14. Rezultati t-testa za zavisne uzorke za maksimalnu srčanu frekvenciju u TLim testovima u broju otkucaja u minuti (prikazane su srednje vrijednosti i standardna devijacija).

Varijabla	TLim-mag	TLim-non	t	p
HRmax-TLim (otk/min)	$183,33 \pm 9,59$	$183,30 \pm 10,54$	0,04	0,97

Legenda: HRmax-TLim (otk/min) – maksimalna srčana frekvencija u TLim testu izražena u broju otkucaja u minuti; TLim-mag – test u uvjetu s magnezijem; TLim-non – test u uvjetu s placebo; t – t vrijednost t-testa; p – p vrijednost t-testa.

5.7. Metabolički parametri

5.7.1. Koncentracija laktata

Koncentracija laktata u kapilarnoj krvi praćena je u minuti mirovanja prije TLim testa te u 1., 3. i 5. minuti oporavka nakon tlim testa, u uvjetu intravenske primjene magnezija i u placebo uvjetu.

Laktat u mirovanju prije TLim testa (LACmir)

U uvjetu s magnezijem prosječna koncentracija laktata u mirovanju iznosila je $1,49 \pm 0,88$ mmol/L, dok je u placebo uvjetu iznosila $1,56 \pm 0,85$ mmol/L (Tablica 15.). T-test za zavisne uzorke nije pokazao statistički značajnu razliku između uvjeta ($t = -0,54$; $p = 0,59$), uz prosječnu razliku od $-0,07$ mmol/L (95 % CI: $-0,32$ do $0,19$ mmol/L).

Rezultati pokazuju da su ispitanici započeli TLim testiranje iz usporedivog metaboličkog stanja u oba uvjeta.

Tablica 15. Rezultati t-testa za zavisne uzorke za koncentraciju laktata u minuti mirovanja prije TLim testovima u mmol/L (prikazane su srednje vrijednosti i standardna devijacija).

Varijabla	TLim-mag	TLim-non	t	p
LACmir (mmol/L)	$1,49 \pm 0,88$	$1,56 \pm 0,85$	-0,54	0,59

LACmir (mmol/L) – koncentracija laktata u minuti mirovanja prije TLim testa izražena u milimolima po litri; TLim-mag – test u uvjetu s magnezijem; TLim-non – test u uvjetu s placebom; t – t vrijednost t-testa; p – p vrijednost t-testa

Laktat u 1. minuti oporavka (LAC1)

U 1. minuti oporavka nakon TLi testa, koncentracija laktata u uvjetu s magnezijem iznosila je $13,49 \pm 2,49$ mmol/L, dok je u placebo uvjetu iznosila $13,46 \pm 2,33$ mmol/L (Tablica 16.). T-test za zavisne uzorke nije pokazao statistički značajnu razliku između uvjeta ($t = 0,06$; $p = 0,95$), uz prosječnu razliku od $0,03$ mmol/L (95 % CI: $-0,97$ do $1,03$ mmol/L).

Tablica 16. Rezultati t-testa za zavisne uzorke za koncentraciju laktata u prvoj minuti oporavka nakon TLim testova u mmol/L (prikazane su srednje vrijednosti i standardna devijacija).

Varijabla	TLim-mag	TLim-non	t	p
LAC1 (mmol/L)	$13,49 \pm 2,49$	$13,46 \pm 2,33$	0,06	0,95

LAC1 (mmol/L) – koncentracija laktata u prvoj minuti oporavka nakon TLim testa izražena u milimolima po litri; TLim-mag – test u uvjetu s magnezijem; TLim-non – test u uvjetu s placebom; t – t vrijednost t-testa; p – p vrijednost t-testa.

Laktat u 3. minuti oporavka (LAC3)

U 3. minuti oporavka prosječna koncentracija laktata u uvjetu s magnezijem iznosila je $13,76 \pm 2,20$ mmol/L, dok je u placebo uvjetu iznosila $13,45 \pm 2,29$ mmol/L (Tablica 17.). T-test za zavisne uzorke nije pokazao statistički značajnu razliku između uvjeta ($t = 0,74$; $p = 0,47$), uz prosječnu razliku od 0,31 mmol/L (95 % CI: -0,55 do 1,17 mmol/L).

Tablica 17. Rezultati t-testa za zavisne uzorke za koncentraciju laktata u trećoj minuti oporavka nakon TLim testova u mmol/L (prikazane su srednje vrijednosti i standardna devijacija).

Varijabla	TLim-mag	TLim-non	t	p
LAC3 (mmol/L)	$13,76 \pm 2,20$	$13,45 \pm 2,29$	0,74	0,47

LAC3 (mmol/L) – koncentracija laktata u trećoj minuti oporavka nakon TLim testa izražena u milimolima po litri; TLim-mag – test u uvjetu s magnezijem; TLim-non – test u uvjetu s placebom; t – t vrijednost t-testa; p – p vrijednost t-testa.

Laktat u 5. minuti oporavka (LAC5)

U 5. minuti oporavka koncentracija laktata u magnezijevom uvjetu iznosila je $13,27 \pm 2,22$ mmol/L, dok je u placebo uvjetu iznosila $12,98 \pm 2,59$ mmol/L (Tablica 18.). T-test za zavisne uzorke nije pokazao statistički značajnu razliku između uvjeta ($t = 0,77$; $p = 0,45$), uz prosječnu razliku od 0,29 mmol/L (95 % CI: -0,48 do 1,06 mmol/L).

Tablica 18. Rezultati t-testa za zavisne uzorke za koncentraciju laktata u petoj minuti oporavka nakon TLim testova u mmol/L (prikazane su srednje vrijednosti i standardna devijacija).

Varijabla	TLim-mag	TLim-non	t	p
LAC5 (mmol/L)	$13,27 \pm 2,22$	$12,98 \pm 2,59$	0,77	0,45

LAC5 (mmol/L) – koncentracija laktata u petoj minuti oporavka nakon TLim testa izražena u milimolima po litri; TLim-mag – test u uvjetu s magnezijem; TLim-non – test u uvjetu s placebom; t – t vrijednost t-testa; p – p vrijednost t-testa.

Sažetak:

Bazalne vrijednosti laktata prije TLim testa bile su usporedive u oba uvjeta.

Koncentracije laktata u 1., 3. i 5. minuti oporavka nakon TLim testa nisu se statistički značajno razlikovale između uvjeta.

U Tablici 19. je jasno vidljivo da su u svim mjernim točkama vrijednosti laktata bile slične, što ukazuje na konzistentan metabolički odgovor neovisno o primjeni magnezija.

Tablica 19. Koncentracije laktata u minuti mirovanja prije TLim testova i tijekom oporavka nakon TLim testova u oba eksperimentalna uvjeta (prikazane su srednje vrijednosti i standardna devijacija).

Eksperimentalni uvjet	LACmir (mmol/L)	LAC1 (mmol/L)	LAC3 (mmol/L)	LAC5 (mmol/L)
TLim-mag	1,49 ± 0,88	13,49 ± 2,49	13,76 ± 2,20	13,27 ± 2,22
TLim-non	1,56 ± 0,85	13,46 ± 2,33	13,45 ± 2,29	12,98 ± 2,59

Legenda: TLim-mag – test u uvjetu s magnezijem; TLim-non – test u uvjetu s placebom; LACmir- koncentracija laktata u minuti mirovanja prije TLim testa, LAC 1,3, 5- koncentracije laktata u prvoj, trećoj i petoj minuti oporavka nakon testa.

5.7.2. Koncentracija glukoze

Koncentracija glukoze u kapilarnoj krvi praćena je u minuti mirovanja prije TLim testa te u 1., 3. i 5. minuti oporavka nakon TLim testa, u uvjetu nakon intravenske primjene magnezija i u placebo uvjetu.

Glukoza u mirovanju prije TLim testa (GUKmir)

U uvjetu s magnezijem prosječna koncentracija glukoze u mirovanju iznosila je $5,20 \pm 0,55$ mmol/L, dok je u placebo uvjetu iznosila $5,25 \pm 0,82$ mmol/L (Tablica 20.). T-test za zavisne uzorke nije pokazao statistički značajnu razliku između uvjeta ($t = -0,25$; $p = 0,81$), uz prosječnu razliku od $-0,05$ mmol/L (95 % CI: $-0,47$ do $0,37$ mmol/L). Rezultati pokazuju da su ispitanici započeli TLim testiranje iz usporedivog metaboličkog stanja u oba uvjeta.

Tablica 20. Rezultati t-testa za zavisne uzorke za koncentraciju glukoze u minuti mirovanja prije TLim testova u mmol/L (prikazane su srednje vrijednosti i standardna devijacija).

Varijabla	TLim-mag	TLim-non	t	p
GUKmir (mmol/L)	$5,20 \pm 0,55$	$5,25 \pm 0,82$	-0,25	0,81

Legenda: GUKmir (mmol/L) – koncentracija glukoze u minuti mirovanja prije TLim testa izražena u milimolima po litri; TLim-mag – test u uvjetu s magnezijem; TLim-non – test u uvjetu s placebom; t – t vrijednost t-testa; p – p vrijednost t-testa.

Glukoza u 1. minuti oporavka (GUK1)

U 1. minuti oporavka nakon TLim testa, koncentracija glukoze u uvjetu s magnezijem iznosila je $6,30 \pm 0,89$ mmol/L, dok je u placebo uvjetu iznosila $6,17 \pm 1,11$ mmol/L (Tablica 21.).

T-test za zavisne uzorke nije pokazao statistički značajnu razliku između uvjeta ($t = 0,44$; $p = 0,67$), uz prosječnu razliku od $0,13$ mmol/L (95 % CI: $-0,47$ do $0,72$ mmol/L).

Tablica 21. Rezultati t-testa za zavisne uzorke za koncentraciju glukoze u prvoj minuti oporavka nakon TLim testova u mmol/L (prikazane su srednje vrijednosti i standardna devijacija).

Varijabla	TLim-mag	TLim-non	t	p
GUK1 (mmol/L)	6,30 ± 0,89	6,17 ± 1,11	0,44	0,67

Legenda: GUK1 (mmol/L) – koncentracija glukoze u prvoj minuti oporavka nakon TLim testa izražena u milimolima po litri; TLim-mag – test u uvjetu s magnezijem; TLim-non – test u uvjetu s placebo; t – t vrijednost t-testa; p – p vrijednost t-testa.

Glukoza u 3. minuti oporavka (GUK3)

U 3. minuti oporavka prosječna koncentracija glukoze u uvjetu s magnezijem iznosila je 7,46 ± 0,94 mmol/L, dok je u placebo uvjetu iznosila 7,14 ± 1,06 mmol/L (Tablica 22.). T-test za zavisne uzorke nije pokazao statistički značajnu razliku između uvjeta (t= 1,75; p = 0,09), uz prosječnu razliku od 0,32 mmol/L (95 % CI: –0,06 do 0,69 mmol/L).

Tablica 22. Rezultati t-testa za zavisne uzorke za koncentraciju glukoze u trećoj minuti oporavka nakon TLim testova u mmol/L (prikazane su srednje vrijednosti i standardna devijacija).

Varijabla	TLim-mag	TLim-non	t	P
GUK3 (mmol/L)	7,46 ± 0,94	7,14 ± 1,06	1,75	0,09

Legenda: GUK3 (mmol/L) – koncentracija glukoze u trećoj minuti oporavka nakon TLim testa izražena u milimolima po litri; TLim-mag – test u uvjetu s magnezijem; TLim-non – test u uvjetu s placebo; t – t vrijednost t-testa ; p – p vrijednost t-testa.

Glukoza u 5. minuti oporavka (GUK5)

U 5. minuti oporavka koncentracija glukoze u uvjetu s magnezijem iznosila je 7,37 ± 1,00 mmol/L, dok je u placebo uvjetu iznosila 7,18 ± 1,17 mmol/L (Tablica 23.). T-test za zavisne uzorke nije pokazao statistički značajnu razliku između uvjeta (t= 0,85; p = 0,40), uz prosječnu razliku od 0,19 mmol/L (95 % CI: –0,27 do 0,64 mmol/L).

Tablica 23. Rezultati t-testa za zavisne uzorke za koncentraciju glukoze u petoj minuti oporavka nakon TLim testova u mmol/L (prikazane su srednje vrijednosti i standardna devijacija).

Varijabla	TLim-mag	TLim-non	t	P
GUK5 (mmol/L)	7,37 ± 1,00	7,18 ± 1,17	0,85	0,40

Legenda: GUK5 (mmol/L) – koncentracija glukoze u petoj minuti oporavka nakon TLim testa izražena u milimolima po litri; TLim-mag – test u uvjetu s magnezijem; TLim-non – test u uvjetu s placebo; t – t vrijednost t-testa; p – p vrijednost t-testa.

Sažetak:

Bazalne koncentracije glukoze prije TLim testa bile su usporedive u oba uvjeta.

U 1., 3. i 5. minuti oporavka nakon TLim testa nije utvrđena statistički značajna razlika u koncentraciji glukoze između uvjeta.

Koncentracija glukoze pokazala je očekivani porast tijekom oporavka u oba eksperimentalna uvjeta, uz sličan obrazac promjene, što je jasno vidljivo u Tablici 24.

Tablica 24. Koncentracije glukoze prije TLim testova i tijekom oporavka nakon TLim testova u oba eksperimentalna uvjeta (Prikazane su srednje vrijednosti koncentracije laktata u mmol/L s rasponima) Vrijednosti su prikazane kao aritmetička sredina $\pm$ standardna devijacija).

Eksperimentalni uvjet	GUKmir (mmol/L)	GUK1 (mmol/L)	GUK3 (mmol/L)	GUK5 (mmol/L)
TLim-mag	5,20 $\pm$ 0,55	6,30 $\pm$ 0,89	7,46 $\pm$ 0,94	7,37 $\pm$ 1,00
TLim-non	5,25 $\pm$ 0,82	6,17 $\pm$ 1,11	7,14 $\pm$ 1,06	7,18 $\pm$ 1,17

Legenda: TLim-mag – test u uvjetu s magnezijem; TLim-non – test u uvjetu s placebo; GUKmir – koncentracija glukoze u minuti mirovanja prije TLim testa; GUK 1,3,5 – koncentracija glukoze u prvoj, trećoj i petoj minuti oporavka nakon testa.

Sažetak metaboličkih rezultata (laktat i glukoza)

Analiza metaboličkih parametara pokazala je da su bazalne koncentracije laktata i glukoze prije TLim testa bile usporedive između uvjeta s magnezijem i placebo uvjeta. Tijekom ranog oporavka nakon tlim testa, u 1., 3. i 5. minuti oporavka nije utvrđena statistički značajna razlika niti u koncentraciji laktata niti u koncentraciji glukoze između uvjeta.

Vrijednosti laktata u svim vremenskim točkama oporavka pokazale su sličan obrazac promjene u oba eksperimentalna uvjeta, dok je koncentracija glukoze u oba uvjeta pokazala očekivani porast tijekom oporavka, bez razlika između uvjeta. Ovi rezultati upućuju na konzistentan metabolički odgovor tijekom TLim testa i ranog oporavka, neovisno o primjeni magnezija.

6. RASPRAVA

6.1. Učinak intravenske primjene magnezija na vrijeme izdržaja tijekom TLim testa

Glavni rezultat ovog istraživanja jest da je intravenska primjena magnezija rezultirala statistički značajnim produljenjem vremena izdržaja tijekom TLim testa, dok pritom nije došlo do promjena u većini analiziranih ventilacijskih, kardiovaskularnih i metaboličkih parametara. Ovakav obrazac rezultata upućuje na to da se potencijalni ergogeni učinak magnezija u ovom protokolu ne očituje kroz povećanje maksimalnog fiziološkog kapaciteta, već kroz promjenu tolerancije visokointenzivnog napora. U nastavku rasprave ovi će nalazi biti interpretirani u kontekstu postojeće literature i mogućih fizioloških mehanizama.

Ovi rezultati dodatno su zanimljivi s obzirom na činjenicu da do sada nisu objavljene kontrolirane studije koje bi ispitivale akutni učinak intravenske primjene magnezija na sportsku izvedbu u ovakvom laboratorijskom modelu visokointenzivnog napora.

Vrijeme izdržaja u TLim testu, izraženo i u sekundama i u prijeđenoj udaljenosti, bilo je statistički značajno dulje nakon intravenske primjene magnezija u usporedbi s placebom. Ovaj rezultat dokazuje poboljšanu sposobnost održavanja visokointenzivnog opterećenja pri brzini trčanja koja odgovara brzini na kojoj je zabilježen maksimalni primitak kisika ($\dot{V}O_{2\max}$), a bez promjena u samoj razini maksimalnog aerobnog kapaciteta u provedenom istraživanju.

TLim test je osjetljivi pokazatelj tolerancije visokog intenziteta i integriranog odgovora metaboličkog, ventilacijskog i neuromuskularnog sustava. Za razliku od maksimalnih progresivnih testova, koji prvenstveno kvantificiraju vršne fiziološke vrijednosti, TLim test omogućuje detekciju promjena fizioloških karakteristika, energetskog metabolizma i tolerancije zamora (Billat et al., 1996; Billat & Koralsztejn, 1996; Billat 2001). Stoga je nalaz produljenog vremena izdržaja u uvjetu s magnezijem posebno mjerodavan u kontekstu akutnih intervencija, kod kojih se ne očekuju promjene u $\dot{V}O_{2\max}$, već promjene u toleranciji napora.

Povećanje vremena izdržaja za približno 14,5 sekundi, odnosno za oko 114 metara prijeđene udaljenosti, predstavlja kvantitativno mjerljiv i funkcionalno smislen učinak u laboratorijskom modelu trčanja pri $\dot{V}O_{2\max}$. U literaturi je pokazano da promjene u metaboličkoj učinkovitosti ili neuromuskularnim čimbenicima mogu značajno utjecati na vrijeme do iscrpljenja, osobito pri intenzitetima bliskima maksimalnom aerobnom opterećenju (Poole et al., 2016; Poole & Jones, 2012). U tom smislu, uočena razlika između uvjeta s magnezijem i uvjeta s placebom upućuje na promjenu fiziološkog odgovora na napor, a ne na promjenu maksimalnog kapaciteta.

Jedan od mogućih mehanizama koji može doprinijeti produljenju vremena izdržaja odnosi se na ulogu magnezija u energetske metabolizmu. Magnezij je esencijalni kofaktor u reakcijama koje uključuju ATP, a povećana dostupnost ioniziranog magnezija može doprinijeti učinkovitosti Mg-ATP kompleksa (Mildvan, 1987; Romani, 2013; Costello et al., 2016), a time vjerojatno i učinkovitost fosforilacijskih procesa tijekom visokointenzivnog rada. Takav učinak može smanjiti metabolički trošak kontrakcije i odgoditi pojavu zamora, što se u TLim testu očituje kao dulje vrijeme do iscrpljenja.

Dodatno, magnezij djeluje kao fiziološki antagonist kalcija i sudjeluje u regulaciji neuromuskularne ekscitabilnosti (Romani, 2013). Stabilizacija membranskih potencijala i smanjenje neučinkovite regrutacije motoričkih jedinica mogu doprinijeti ekonomičnijem izvođenju pokreta pri konstantnom visokointenzivnom opterećenju. U tom kontekstu, produljenje vremena izdržaja u TLim testu može odražavati kombinirani metabolički i neuromuskularni učinak intravenske primjene magnezija.

Važno je naglasiti da se poboljšanje vremena izdržaja pojavilo bez istodobnih promjena u maksimalnim ventilacijskim i kardiovaskularnim parametrima, što upućuje na to da uočeni učinak nije posljedica povećanja aerobnog kapaciteta ili promjena u ventilacijskoj mehanici. Takav obrazac odgovara nalazima iz prethodnih istraživanja u kojima pojedine intervencije nisu utjecale na $\text{VO}_{2\text{max}}$, ali su poboljšale toleranciju visokog intenziteta i vrijeme do iscrpljenja (Midgley et al., 2007; Currell & Jeukendrup, 2008).

Usporedba s literaturom o oralnoj suplementaciji magnezija pokazuje da su rezultati dosadašnjih studija često heterogeni, pri čemu se rijetko bilježe jasne promjene u performansama kod sportaša s urednim početnim statusom magnezija (Newhouse & Finstad, 2000; Zhang et al., 2017). U tom smislu, nalaz statistički značajnog produljenja vremena izdržaja nakon intravenske primjene magnezija ukazuje na potencijalnu važnost načina primjene, budući da intravenska injekcija magnezija omogućuje brzu i predvidljivu promjenu koncentracije ioniziranog magnezija u plazmi. Takav farmakokinetički profil omogućuje testiranje akutnog učinka u vremenskom prozoru koji je teško postići oralnom suplementacijom.

U praktičnom smislu, produljenje vremena izdržaja pri $\text{vVO}_{2\text{max}}$ može imati implikacije za discipline u kojima je sposobnost održavanja vrlo visokog intenziteta ključna za rezultat, poput srednjih pruga ili visoko-intenzivnih intervalnih opterećenja. Međutim, važno je naglasiti da ovo istraživanje nije bilo dizajnirano za procjenu izravnog utjecaja na natjecateljski rezultat, već za ispitivanje fiziološkog odgovora u kontroliranim uvjetima.

6.2. *Vrijeme do postizanja maksimalnog respiracijskog omjera (tRER) kao pokazatelj metaboličke tolerancije*

U skladu s produljenim vremenom izdržaja, sljedeći odjeljak razmatra promjene u metaboličkoj dinamici izražene kroz tRER.

Rezultat ove analize jest da je vrijeme potrebno za dostizanje maksimalnog respiracijskog omjera tijekom tlim testa (tRER) statistički značajno dulje u uvjetu intravenske primjene magnezija u usporedbi s placebo uvjetom, s tim da je analiza napravljena u poduzorku ispitanika za koje su bili dostupni potpuni podatci. Ovaj rezultat sugerira promjenu vremenske dinamike metaboličkog odgovora tijekom visokointenzivnog kontinuiranog napora, bez istodobnih promjena u maksimalnim vrijednostima ventilacijskih ili kardiovaskularnih pokazatelja.

Respiracijski omjer (VCO_2/VO_2) je pokazatelj odnosa aerobnoga i anaerobnog metabolizma tijekom opterećenja. Porast RER-a tijekom napora prvenstveno je posljedica povećane proizvodnje ugljikova dioksida povezane s puferiranjem vodikovih iona nastalih tijekom anaerobne glikolize, a ne isključivo povećanja oksidativnog metabolizma (Wasserman et al., 1999; Beaver et al., 1986; Brooks, 2018), što je povezano s progresivnim metaboličkim stresom (Poole & Jones, 2012). Stoga se vrijeme potrebno da se dosegne maksimalni RER može promatrati kao pokazatelj brzine razvoja metaboličkog stresa tijekom napora visokog intenziteta.

U ovom istraživanju produljenje tRER-a u uvjetu primjene magnezija sugerira da su ispitanici dulje zadržali metaboličku ravnotežu pri istom apsolutnom opterećenju (vVO_{2max}). Ovakav obrazac opet upućuje na to da se potencijalni učinak magnezija očituje kroz promjenu tolerancije napora, a ne kroz povećanje maksimalnog aerobnoga kapaciteta jer intravenska primjena magnezija nije dovela do povećanja VO_{2max} .

Jedan od mogućih mehanizama koji može objasniti produljenje tRER-a odnosi se na ulogu magnezija u regulaciji glikolitičkih i oksidativnih metaboličkih puteva. Magnezij je nužan kofaktor za više enzima uključenih u fosforilacijske procese, uključujući heksokinazu, fosfofruktokinazu i piruvat-dehidrogenazu, čime sudjeluje u regulaciji prijelaza između anaerobnog i aerobnog metabolizma (Mildvan, 1987; Garfinkel & Garfinkel, 1985; Romani, 2013). Povećana dostupnost ioniziranog magnezija nakon intravenske primjene mogla bi omogućiti učinkovitije usmjeravanje piruvata prema mitohondrijskoj oksidaciji, smanjujući brzinu akumulacije laktata i pripadajućih protona. Posljedično, dolazi do sporijeg porasta VCO_2 u odnosu na VO_2 , što se očituje kao produljeno vrijeme do dostizanja maksimalnog RER-a.

Dodatno, magnezij djeluje kao fiziološki antagonist kalcija te sudjeluje u regulaciji neuromuskularne ekscitabilnosti i energetske učinkovitosti kontrakcije (Romani, 2013). Smanjenje neučinkovitih kontrakcija i stabilizacija membranskih potencijala mogu posredno smanjiti energetske trošak pri danom intenzitetu, što se može odraziti na sporiji razvoj metaboličkog zamora. Važno je naglasiti da se u ovom istraživanju učinak magnezija očituje bez promjena u maksimalnim ventilacijskim ili kardiovaskularnim varijablama, što dodatno podupire pretpostavku da je riječ o metaboličkom, a ne respiracijskom ili kardiocirkulacijskom učinku.

Nalaz produljenog tRER-a posebno je zanimljiv u kontekstu postojeće literature o magneziju u sportu. Studije koje su se bavile oralnom suplementacijom magnezija često nisu pokazale konzistentne promjene u VO_2max ili performansama, osobito kod sportaša s urednim početnim statusom magnezija (Newhouse & Finstad, 2000; Zhang et al., 2017). Međutim, pojedini autori navode promjene u metaboličkom odgovoru i laktatnoj dinamici, čak i u odsutnosti promjena maksimalnih fizioloških parametara (Cinar et al., 2006). U tom smislu, tRER se može smatrati osjetljivijim pokazateljem akutnih metaboličkih promjena nego klasične maksimalne varijable.

Ograničenje ove analize jest činjenica da je tRER analiziran u poduzorku ispitanika ($n = 16$), zbog dostupnosti potpunih respiracijskih podataka. Ipak, crossover dizajn, u kojem je svaki ispitanik služio kao vlastita kontrola, značajno smanjuje međusubjektivnu varijabilnost i povećava osjetljivost za detekciju razlika između uvjeta. Unatoč tome, buduća istraživanja s većim uzorkom trebala bi potvrditi uočeni učinak te dodatno ispitati odnos između tRER-a, laktatne kinetike i subjektivne percepcije napora.

U praktičnom kontekstu sporta, produljenje vremena do dostizanja maksimalnog RER-a, isto kao i produljenje izdržaja u TLim testu, može imati značenje u poboljšanju sportske izvedbe. Odgoda pojave izraženog metaboličkog stresa može omogućiti dulje održavanje ciljanog intenziteta prije nastupa zamora. Međutim, ove implikacije treba tumačiti oprezno, budući da istraživanje nije bilo dizajnirano za procjenu izravnog učinka na natjecateljski rezultat.

6.3. Anaerobni metabolički odgovor; koncentracija laktata

Kako bi se ispitalo jesu li promjene u izvedbi bile praćene promjenama u koncentraciji metaboličkih markera, analizirane su koncentracije laktata i glukoze u mirovanju prije testa i u ranom oporavku.

Koncentracija laktata mjerena je u mirovanju prije TLim testa te u 1., 3. i 5. minuti oporavka nakon TLim testa u oba eksperimentalna uvjeta. Rezultati su pokazali da se bazalne vrijednosti

laktata u mirovanju prije početka testa nisu razlikovale između uvjeta, čime je potvrđeno da su ispitanici započeli testiranje iz usporedivog metaboličkog stanja. Nadalje, niti u jednoj točki oporavka nije zabilježena statistički značajna razlika u koncentraciji laktata između uvjeta s magnezijem i placebo uvjeta, a i sama vremenska dinamika laktata bila je slična u oba uvjeta. Odsutnost razlika u bazalnim vrijednostima laktata metodološki je važna jer isključuje mogućnost da su kasnije izmjerene vrijednosti tijekom oporavka posljedica početnih razlika u metaboličkom statusu ispitanika. Stabilne vrijednosti laktata u mirovanju u skladu su s očekivanim rasponima budući da je bazalna koncentracija laktata niska i relativno konstantna (Wasserman et al., 1999), osobito kod treniranih sportaša s razvijenim oksidativnim kapacitetom i učinkovitim “lactate shuttle” mehanizmom (Brooks, 2018).

Tijekom oporavka nakon TLim testa, koncentracije laktata u 1., 3. i 5. minuti bile su visoke, ali usporedive između uvjeta s magnezijem i placebo uvjeta, bez značajnih promjena kroz vrijeme oporavka unutar pojedinog uvjeta. Ovakav obrazac upućuje na to da intravenska primjena magnezija nije utjecala na akumulaciju niti na ranu eliminaciju laktata nakon visokointenzivnog kontinuiranog napora. Budući da laktat odražava ravnotežu između brzine njegove proizvodnje i uklanjanja, stabilnost koncentracija tijekom ranog oporavka sugerira da osnovni glikolitički odgovor nije bio moduliran intervencijom.

Ovi nalazi sukladni su većini studija koje su ispitivale učinke magnezija na laktatni odgovor u zdravih i treniranih ispitanika. Dosadašnja literatura pokazuje da suplementacija magnezijem rijetko dovodi do promjena u koncentraciji laktata tijekom ili nakon napora, osobito kada ispitanici nemaju deficit magnezija (Newhouse & Finstad, 2000; Zhang et al, 2017). Iako su u eksperimentalnim modelima i nekim studijama na životinjama zabilježeni učinci magnezija na metabolizam laktata, ti se učinci ne moraju nužno očitovati u treniranoj ljudskoj populaciji s razvijenim mehanizmima metaboličke regulacije.

Ovakav obrazac rezultata zahtijeva pažljivu interpretaciju, jer se na prvi pogled može činiti da odsutnost razlika u koncentraciji laktata isključuje metabolički učinak intervencije.

Međutim, važno je naglasiti da koncentracija laktata izmjerena u oporavku ne predstavlja izravnu mjeru dinamike nakupljanja laktata tijekom samog napora, već odražava kumulativni metabolički stres postignut do trenutka prekida testa, kao i rane procese redistribucije i eliminacije laktata. U tom kontekstu, činjenica da su ispitanici u uvjetu s magnezijem dulje održavali opterećenje, a da su pri tome postigli slične koncentracije laktata kao u placebo uvjetu, može upućivati na bolju toleranciju visokointenzivnog napora nakon primjene magnezija.

Moguće objašnjenje ovog nalaza jest da je u uvjetu s magnezijem tempo nakupljanja laktata bio sporiji, što je omogućilo produljenje vremena izdržaja prije nego što je dosegnuta kritična razina metaboličkog stresa koja dovodi do prekida napora. Alternativno, moguće je da je došlo do bolje tolerancije istog stupnja laktatnog i acidobaznog opterećenja, bez nužnog smanjenja apsolutne koncentracije laktata. Ova dva mehanizma nisu međusobno isključiva i oba su u skladu s poznatom ulogom magnezija u energetske metabolizmu i regulaciji neuromuskularne funkcije.

Literatura potvrđuje da laktat sam po sebi nije izravni uzrok mišićnog zamora, već marker anaerobne glikolize i popratne akumulacije vodikovih iona (Wasserman et al., 1999; Brooks, 2018). Stoga sposobnost sportaša da dulje tolerira visoke koncentracije laktata može odražavati učinkovitije mehanizme puferiranja, poboljšanu intracelularnu regulaciju pH ili stabilniju neuromuskularnu ekscitabilnost. U tom smislu, stabilne vrijednosti laktata u oporavku uz produljeno vrijeme izdržaja ne moraju značiti odsutnost metaboličkog učinka, već mogu ukazivati na pomak praga tolerancije metaboličkog stresa.

Važno je pritom istaknuti metodološko ograničenje ovog istraživanja: laktat nije mjeren kontinuirano tijekom TLim testa, već samo u mirovanju i tijekom ranog oporavka. Zbog toga se ne može izravno utvrditi brzina porasta laktata tijekom napora, niti precizno odrediti trenutak u kojem dolazi do njegove akumulacije u odnosu na trajanje testa. Stoga se interpretacija o sporijem nakupljanju laktata ili boljoj toleranciji može formulirati kao hipoteza utemeljena na obrascu rezultata, a ne kao izravno dokazani mehanizam.

Unatoč tom ograničenju, nalaz stabilnih koncentracija laktata u ranom oporavku uz produljeno vrijeme izdržaja uklapa se u širu sliku rezultata ovog istraživanja. Sličan obrazac uočen je i kod drugih varijabli koje upućuju na promjenu tolerancije napora, poput produljenog vremena do postizanja maksimalnog respiracijskog omjera (tRER), dok istodobno nije došlo do promjena u maksimalnim ventilacijskim i kardiovaskularnim parametrima. Ovakva kombinacija rezultata podupire interpretaciju da se učinak intravenske primjene magnezija u ovom protokolu ne očituje kroz smanjenje intenziteta metaboličkog odgovora, već kroz odgodu pojave metaboličkih ograničenja koja dovode do prekida napora.

6.4. Glikemijski odgovor

Isto kao i koncentracija laktata, koncentracija glukoze mjerena je u minuti mirovanja prije TLim testa te u 1., 3. i 5. minuti oporavka nakon TLim testa, u uvjetu intravenske primjene magnezija i u placebo uvjetu. Rezultati su pokazali da se bazalne vrijednosti glukoze nisu razlikovale između uvjeta, čime je potvrđeno da su ispitanici započeli testiranje iz usporedivog glikemijskog stanja. Nadalje, tijekom ranog oporavka nakon TLim testa nije utvrđena statistički značajna razlika u koncentraciji glukoze između uvjeta s magnezijem i placebo uvjeta niti u jednoj vremenskoj točki. Odsutnost razlika u bazalnoj koncentraciji glukoze metodološki je važna jer isključuje mogućnost da su kasnije promjene u oporavku posljedica početnih razlika u glikemiji. Stabilne vrijednosti glukoze u mirovanju u skladu su s očekivanim fiziološkim rasponima, što odražava učinkovitu regulaciju energetskeg metabolizma, osobito u treniranih ispitanika (Wasserman et al., 1999).

Tijekom oporavka nakon visokointenzivnog kontinuiranog napora zabilježen je porast koncentracije glukoze u 1., 3. i 5. minuti u oba uvjeta, što je očekivani fiziološki odgovor. Ovaj porast odražava aktivaciju simpatičkog živčanog sustava, povećano izlučivanje kateholamina te pojačanu hepatičku glikogenolizu i glukoneogenezu nakon iscrpljujućeg napora (Wasserman et al., 1999, Bracken et al 2010). Ovakav obrazac potvrđuje da je TLim test predstavljao snažan metabolički podražaj neovisno o intervenciji.

Unatoč poznatoj ulozi magnezija u regulaciji inzulinske signalizacije i perifernoj utilizaciji glukoze (Romani, 2013), rezultati ovog istraživanja ne upućuju na akutni učinak intravenske primjene magnezija na glikemijski odgovor u ranom oporavku nakon tlim testa. Već je ranije spomenuto da se učinci magnezija najčešće očituju u kroničnim intervencijama ili u populacijama s lošijim nalazima, dok su u zdravih i treniranih pojedinaca akutni učinci često minimalni ili odsutni (Newhouse & Finstad, 2000; Zhang et al, 2017). Važno je naglasiti da koncentracija glukoze u ranom oporavku predstavlja relativno grub pokazatelj metaboličkog odgovora te ne mora nužno odražavati promjene u perifernoj iskorištenosti glukoze na razini skeletnog mišića.

Rezultat da se koncentracije glukoze tijekom oporavka ne razlikuju između uvjeta nadopunjuje ostale rezultate ovog istraživanja. Iako je u uvjetu s magnezijem zabilježeno dulje vrijeme izdržaja, to produljenje nije bilo praćeno promjenama u glikemijskom odgovoru, što sugerira da se ergogeni učinak magnezija nije ostvario putem promjena u dostupnosti ili regulaciji glukoze u ranom oporavku. Time se dodatno podupire interpretacija da su mehanizmi djelovanja magnezija u ovom istraživačkom protokolu vjerojatnije povezani s tolerancijom

Doktorski rad

visokointenzivnog opterećenja, neuromuskularnom stabilnošću ili metaboličkom dinamikom, a ne homeostazom glukoze.

Iako bi kontinuirano mjerenje glukoze moglo pružiti dodatni uvid u dinamiku glikemijskog odgovora tijekom samog TLim testa, s obzirom na kratko trajanje i supramaksimalni karakter opterećenja, glukoza vjerojatno ne predstavlja limitirajući čimbenik izvedbe u ovom protokolu. Buduća istraživanja s duljim opterećenjima ili kroničnim intervencijama mogla bi razmotriti primjenu kontinuiranog mjerenja glukoze.

6.5. Ventilacijski i respiratorno-metabolički odgovor

S obzirom na nepromijenjene metaboličke pokazatelje, u nastavku se razmatra ventilacijski odgovor.

U ovom je istraživanju uspoređivan primitak kisika tijekom TLim testova provedenih u uvjetu s magnezijem i placebo uvjetu kako bi se procijenilo ima li intravenska primjena magnezija utjecaja na maksimalnu oksidativnu sposobnost tijekom visokointenzivnog kontinuiranog opterećenja. Rezultati su pokazali da su i apsolutne i relativne vrijednosti VO_{2max} bile gotovo identične u oba uvjeta te da intravenska primjena magnezija nije dovela do statistički značajnih razlika u primitku kisika tijekom TLim testa.

Ovakav nalaz je u skladu s poznatom fiziologijom maksimalnog primitka kisika. VO_{2max} je parametar koji je određen centralnim i perifernim čimbenicima, uključujući srčani minutni volumen, sposobnost prijenosa kisika i periferni oksidativni kapacitet mišića (Wasserman et al., 1999). Kratkoročne farmakološke ili nutritivne intervencije, osobito u zdravih i treniranih pojedinaca, rijetko mijenjaju ove komponente u mjeri koja bi bila dovoljna da rezultira promjenama VO_{2max} . Stoga je očekivano da intravenska primjena magnezija, iako može djelovati na neuromuskularnu funkciju ili metabolizam, ne dovodi do promjena maksimalnog oksidativnog kapaciteta (Newhouse & Finstad, 2000; Zhang et al, 2017). Osim toga, uloga magnezija u energetsom metabolizmu prvenstveno je povezana s funkcijom Mg-ATP kompleksa i regulacijom enzima uključenih u procese glikolize i oksidativne fosforilacije (Romani, 2013). Iako ti procesi mogu utjecati na toleranciju napora visokog intenziteta, što se uočilo kroz dulje vrijeme izdržaja u magnezijevom uvjetu, oni ne mijenjaju gornju granicu aerobnoga kapaciteta na koju utječe i kapacitet kardiovaskularnog sustava. Stoga stabilnost VO_{2max} vrijednosti pokazuje da je učinak magnezija bio ograničen na druge fiziološke domene, a ne na maksimalni oksidativni kapacitet.

Dodatno, treba uzeti u obzir metodološke razlike između progresivnog spiroergometrijskog testa i TLim testa. TLim test se izvodi pri konstantnoj brzini $\dot{V}O_{2\max}$ i predstavlja oblik visokointenzivnog opterećenja koje se ne može održavati u stabilnom aerobnom stanju (Billat & Koralsztejn, 1996; Poole et al., 2016). Tijekom takvog protokola $\dot{V}O_2$ se približava maksimalnoj vrijednosti, ali ne mora dosegnuti vrijednosti koje se tipično ostvaruju u progresivnom testu do iscrpljenja (Wasserman et al., 1999; Midgley et al., 2007). Različiti protokoli rezultiraju različitim vremenom provedenim pri ili blizu $\dot{V}O_{2\max}$ (Midgley & McNaughton, 2006). Stoga TLim protokol može rezultirati nešto nižim $\dot{V}O_{2\max}$ vrijednostima u usporedbi s progresivnim testom, što je upravo zabilježeno i u ovom istraživanju.

Interpretacija rezultata $\dot{V}O_{2\max}$ dodatno potvrđuje smjer zaključivanja ovog istraživanja. Dok $\dot{V}O_{2\max}$ ostaje nepromijenjen, parametri poput vremena izdržaja (tTLim) i vremena do postizanja maksimalnog respiracijskog omjera (tRER) pokazuju značajne razlike između uvjeta, što upućuje na to da se učinak magnezija očituje kroz modifikaciju tolerancije napora i metaboličku dinamiku, a ne kroz promjenu aerobne sposobnosti. To je u skladu s literaturom koja potvrđuje da intervencije često djeluju na drugim razinama koje mogu dovesti do poboljšanja izvedbe, a da izvedba može biti bolja bez da je istovremeno došlo do povećanja $\dot{V}O_{2\max}$ (Jones, 1998).

Rezultati mjerenja maksimalne proizvodnje ugljikova dioksida ($\dot{V}CO_{2\max}$) tijekom TLim testova bili su vrlo slični u uvjetu intravenske primjene magnezija i u placebo uvjetu, a statistička analiza nije pokazala značajnu razliku među uvjetima. Ovaj nalaz upućuje na to da primjena magnezija nije utjecala na ventilacijsko-metaboličku komponentu odgovora tijekom visokointenzivnog kontinuiranog opterećenja.

$\dot{V}CO_{2\max}$ također odražava integrirani odgovor oksidativnog metabolizma, ventilacijske regulacije i puferiranja vodikovih iona, budući da povećana proizvodnja CO_2 tijekom visokog intenziteta ne potječe samo iz aerobnog metabolizma, već i iz bikarbonatnog puferiranja laktata (Wasserman et al., 1999), što je dio šireg metaboličkog odgovora karakterističnog za rad u domeni visokog intenziteta (Poole et al., 2016). Zato je $\dot{V}CO_{2\max}$ osjetljiv na metaboličke promjene u uvjetima visokog intenziteta, kao i na promjene acidobazne ravnoteže. Stabilne vrijednosti $\dot{V}CO_{2\max}$ u oba eksperimentalna uvjeta sugeriraju da intravenska primjena magnezija nije utjecala na ventilacijski ili metabolički prag koji definira maksimalnu proizvodnju CO_2 tijekom Tlim testa. Rezultat dodatno potvrđuje da magnezij ne mijenja maksimalni ventilacijsko-metabolički kapacitet organizma. Kako je ranije rečeno, uloga magnezija u energetsom metabolizmu primarno je povezana s funkcijom Mg-ATP kompleksa

Doktorski rad

i aktivnošću ključnih enzimskih sustava glikolize i oksidativne fosforilacije (Romani, 2013). Iako bi ovi mehanizmi potencijalno mogli utjecati na učinkovitost metaboličkih procesa tijekom visokointenzivnog opterećenja, akutna intravenska primjena magnezija u zdravih i treniranih ispitanika u ovom istraživanju nije bila dovoljna da modulira ventilacijski odgovor u mjeri koja bi rezultirala promjenom VCO_2max .

Maksimalna minutna ventilacija (VE_{max}) tijekom TLim testa bila je vrlo slična u uvjetu intravenske primjene magnezija i u placebo uvjetu, a statistička analiza nije pokazala značajne razlike između dvaju mjerenja što dodatno potvrđuje da akutna intravenska primjena magnezija nije utjecala na ventilacijski odgovor tijekom visokointenzivnog kontinuiranog opterećenja.

Minutna ventilacija (VE) tijekom intenzivnog opterećenja također odražava integrirani odgovor respiratornog i metaboličkog sustava na povećanu proizvodnju CO_2 i promjene u acidobaznoj ravnoteži. Povećanje VE tijekom napora regulirano je kombinacijom kemoreceptorskog odgovora na parcijalni tlak CO_2 i pH, i centralnom regulacijom disanja (Wasserman et al., 1999) i odražava i kompenzira progresivni metabolički stres i poremećaj acidobazne ravnoteže tijekom visokointenzivnog opterećenja (Poole & Jones, 2012). U uvjetima visokointenzivnog ili supramaksimalnog opterećenja, poput TLim testa pri vVO_2max , VE se brzo približava maksimalnim vrijednostima, nakon čega daljnje povećanje opterećenja ili produljenje trajanja napora ne dovodi nužno do dodatnog porasta ventilacije.

Stabilnost VE_{max} u oba eksperimentalna uvjeta u skladu je s nalazima za ostale ventilacijske varijable u ovom istraživanju, uključujući BF_{max} , VO_2max i VCO_2max , koje također nisu pokazale razlike između uvjeta s magnezijem i placebo uvjeta. Ovakav obrazac sugerira da ventilacijski sustav nije bio ograničavajući čimbenik izvedbe tijekom TLim testa te da potencijalni ergogeni učinak magnezija nije ostvaren putem modulacije ventilacijskog odgovora.

U literaturi se navodi da magnezij može imati blage bronhodilatacijske i relaksacijske učinke na glatku mišićnu muskulaturu dišnih putova, osobito u kliničkim stanjima obilježenima bronhokonstrikcijom ili ventilacijskim ograničenjem (Noppen et al., 1990; Amaral et al., 2012; Ni et al., 2022). Međutim, u zdravih i treniranih sportaša, kod kojih je ventilacijska rezerva tijekom napora u pravilu očuvana, takvi učinci rijetko rezultiraju mjerljivim promjenama u maksimalnoj ventilaciji. Rezultati ovog istraživanja potvrđuju tu pretpostavku, jer VE_{max} tijekom tlim testa ostaje nepromijenjen neovisno o primjeni magnezija.

Važno je također naglasiti da TLim test predstavlja oblik konstantnog opterećenja, u kojem je ventilacijski odgovor primarno određen intenzitetom rada, a ne njegovim trajanjem. Iako su ispitanici u uvjetu s magnezijem postigli dulje vrijeme izdržaja, to produljenje nije bilo praćeno dodatnim povećanjem VEmax. Time se dodatno potvrđuje da produljenje vremena izdržaja nije posljedica povećanog ventilacijskog kapaciteta.

Vrijednosti maksimalnog dišnog volumena (VTmax) tijekom TLim testa bile su vrlo slične u uvjetu intravenske primjene magnezija i u placebo uvjetu, a statistička analiza nije pokazala značajnu razliku između dvaju mjerenja. Ovaj nalaz ukazuje na to da akutna intravenska primjena magnezija nije utjecala na dubinu disanja tijekom visokointenzivnog kontinuiranog opterećenja.

Dišni volumen predstavlja ključnu komponentu ventilacijskog odgovora tijekom napora te odražava mehanička svojstva respiratornog sustava, funkciju respiratorne muskulature i neuralnu regulaciju disanja (Wasserman et al., 1999). Tijekom progresivnog povećanja intenziteta napora, VT se u početnim fazama povećava kako bi se zadovoljile metaboličke potrebe, no pri visokim intenzitetima dolazi do njegova platoa, nakon čega se daljnje povećanje ventilacije ostvaruje prvenstveno porastom frekvencije disanja. U kontekstu TLim testa, koji predstavlja konstantno visokointenzivno opterećenje, ovakav ventilacijski obrazac je očekivan, a stabilnost VTmax u oba uvjeta upućuje na to da intravenska primjena magnezija nije promijenila mehaničku komponentu ventilacijskog odgovora. Iako magnezij može imati relaksacijske učinke na glatku muskulaturu i potencijalno smanjiti bronhokonstrikciju, u zdravih i treniranih sportaša respiratorni sustav rijetko predstavlja ograničavajući čimbenik ventilacije. Stoga se ne očekuju izražene promjene u volumenu disanja tijekom akutnih intervencija, što potvrđuju i rezultati ovog istraživanja.

Odsutnost razlika u VTmax između uvjeta s magnezijem i placebo uvjeta također je u skladu s nalazima ostalih ventilacijskih parametara u ovom istraživanju, uključujući VEmax i VCO₂max, koji su ostali nepromijenjeni između uvjeta. Ovakav konzistentan obrazac dodatno potvrđuje da ventilacijski kapacitet i mehanička komponenta disanja nisu bili mjesto djelovanja magnezija u uvjetima Tlim testa.

Važno je naglasiti da se potencijalni ergogeni učinak magnezija, zabilježen kroz produljenje vremena izdržaja i promjene u tRER-u, ne mora nužno očitovati kroz promjene u dubini disanja. Iz literature je poznato da ergogene intervencije često djeluju na razini metaboličke učinkovitosti, neuromuskularne koordinacije i tolerancije acidobaznog opterećenja, dok

promjene u ventilacijskim parametrima nisu nužno prisutne, što potvrđuje da sportska izvedba ovisi o više integriranih fizioloških čimbenika (Midgley et al., 2007; Poole et al., 2016). U tom smislu, stabilan i nepromijenjen VT_{max} u oba uvjeta dodatno podupire interpretaciju da magnezij nije djelovao putem promjene ventilacijskih mehanizama.

Poznato je da je ventilacijski odgovor tijekom napora pri intenzitetima bliskima ili iznad vVO_{2max} rezultat integrirane centralne regulacije disanja, perifernih kemoreceptora i mehaničkih svojstava dišnog sustava (Wasserman et al., 1999). Povećanje frekvencije disanja predstavlja jedan od primarnih mehanizama za prilagodbu povećanoj proizvodnji CO_2 i održavanju acidobazne ravnoteže tijekom visokointenzivnog rada. U kontekstu TLim testa, koji predstavlja konstantno supramaksimalno opterećenje, čak i male razlike u ventilacijskom odgovoru mogu odražavati razlike u načinu na koji organizam tolerira metabolički stres. Rezultati analize maksimalne frekvencije disanja (BF_{max}) tijekom TLim testa pokazali su da je ona statistički značajno viša u uvjetu intravenske primjene magnezija u usporedbi s placebo uvjetom. Iako je apsolutna razlika između uvjeta bila relativno mala, ovaj nalaz upućuje na postojanje suptilne promjene u ventilacijskom odgovoru tijekom visokointenzivnog kontinuiranog opterećenja. Viša maksimalna frekvencija disanja u magnezijevom uvjetu može se tumačiti i kao posljedica duljeg trajanja TLim testa u tom uvjetu. Dulje izlaganje visokointenzivnom opterećenju može dovesti do progresivnijeg uključivanja ventilacijskog pogona, što se očituje kroz blago povećanje frekvencije disanja u završnoj fazi testa. Ovakav obrazac u skladu je s literaturom koja pokazuje da tijekom visokointenzivnih protokola ventilacijski parametri ne slijede jednostavan linearni odnos s opterećenjem, već su snažno određeni trajanjem napora i akumuliranim metaboličkim stresom (Wasserman et al., 1999; Poole et al., 2016).

Povećanje BF_{max} u uvjetu s magnezijem nije bilo praćeno promjenama u drugim ventilacijskim parametrima, uključujući maksimalnu minutnu ventilaciju (VE_{max}) i maksimalnu proizvodnju ugljikova dioksida (VCO_{2max}), koji su ostali usporedivi između uvjeta. Ovaj nalaz sugerira da promjena BF_{max} nije rezultat povećanog ventilacijskog zahtjeva u smislu ukupnog volumena ventilacije, već se vjerojatno odnosi na redistribuciju ventilacijskog uzorka, odnosno blago povećanje frekvencije disanja bez promjene ukupne ventilacije.

Uloga magnezija u regulaciji ventilacijskog odgovora može se razmatrati kroz njegove poznate učinke na neuromuskularnu ekscitabilnost i glatku muskulaturu. Magnezij djeluje kao fiziološki antagonist kalcija te može utjecati na kontraktilna svojstva respiratorne muskulature i stabilnost

Doktorski rad

neuromuskularnog prijenosa (Romani, 2011). Međutim, s obzirom na vrlo malu apsolutnu razliku u BFmax te odsutnost promjena u VEmax, ovi mehanizmi u ovom istraživanju vjerojatno imaju sekundarnu ulogu i ne predstavljaju primarni put djelovanja magnezija. Nalaz blago više BFmax u uvjetu s magnezijem treba stoga promatrati u kontekstu cjelokupnog fiziološkog odgovora. Iako je statistički značajan, njegov funkcionalni značaj je ograničen, osobito u usporedbi s izraženijim razlikama zabilježenima u parametrima poput vremena izdržaja u TLim testu i vremena do postizanja maksimalnog respiracijskog omjera (tRER). U tom smislu se BFmax, koji se povisio za samo jedan udah, može interpretirati kao prateći ventilacijski odgovor na produljeno trajanje napora, a ne proglasiti primarnim mehanizmom ergogenog učinka magnezija.

6.6. Kardiovaskularni odgovor

Maksimalna frekvencija srca postignuta tijekom TLim testa bila je vrlo slična u oba testirana uvjeta, s gotovo identičnim prosječnim vrijednostima u testiranjima. Ovi rezultati pokazuju da intravenska primjena magnezija nije imala mjerljiv učinak na kardijalni odgovor tijekom visokointenzivnog kontinuiranog napora pri $v\text{VO}_2\text{max}$. Budući da je frekvencija srca jedan od najosjetljivijih parametara koji odražava akutnu autonomnu regulaciju tijekom opterećenja, odsutnost razlike sugerira da magnezij u ovom testiranju nije promijenio simpatički i hemodinamski odgovor tijekom testa.

Usporedba maksimalne frekvencije srca postignute tijekom TLim testa s onom izmjerenom tijekom inicijalnog progresivnog spiroergometrijskog testiranja (KF1) pokazuje da su vrijednosti HRmax tijekom TLim testa bile niže od maksimalnih vrijednosti ostvarenih pri maksimalnom opterećenju u progresivnom protokolu. Ovakav nalaz je očekivan i u skladu je s literaturom, jer je poznato da naponi pri konstantnom intenzitetu ne rezultiraju uvijek dostizanjem maksimalne frekvencije srca, što se može pripisati ograničenom trajanju testa i različitoj dinamici fiziološkog odgovora u odnosu na progresivne protokole opterećenja. Literatura također pokazuje da odnos između srčane frekvencije i VO_2 ovisi o karakteristikama protokola opterećenja, što dodatno objašnjava varijabilnost maksimalnih vrijednosti postignutih u različitim testovima (Wasserman et al., 1999; Dalleck & Kravitz, 2006). Stoga razlika između HRmax u KF1 i HRmax tijekom TLim testa ne treba biti tumačena kao fiziološki utjecaj magnezija, nego kao posljedica različite prirode testova.

Također, činjenica da je HRmax u TLim testu bio gotovo identičan u uvjetu s magnezijem i uvjetu s placeboom, unatoč duljem vremenu izdržaja u uvjetu s magnezijem, sugerira da

produljenje izdržaja u TLim testu nije bilo posljedica promjene u srčanoj frekvenciji ili hemodinamičkoj regulaciji. U literaturi je opisano da magnezij djeluje kao fiziološki antagonist kalcija i može imati kardiovaskularne učinke poput smanjenja tonusa glatkih mišića i stabilizacije ritma (Romani, 2011; Marabelli et al., 2025), no u zdravih, treniranih mladih osoba u istraživanju, ovi učinci često nisu bili dovoljno izraženi da bi rezultirali promjenama maksimalne frekvencije srca u uvjetima akutnog napora.

Ovi rezultati podržavaju tezu da se potencijalni ergogeni učinak magnezija, koji je u ovom istraživanju zabilježen kroz dulje vrijeme izdržaja, nije ostvario putem kardijalnih mehanizama iako magnezij kao mineral sudjeluje u regulaciji energetske homeostaze i kontraktilne funkcije. Međutim, budući da srčana frekvencija nije bila promijenjena nakon primjene magnezija, može se zaključiti da kardiovaskularni sustav nije bio posrednik u promjeni vremena izdržaja u ovom istraživanju.

6.7. Subjektivni doživljaj napora

U ovom istraživanju velika većina ispitanika subjektivno je doživjela TLim test kao lakši u uvjetu intravenske primjene magnezija. Iako subjektivni dojam napora ne predstavlja kvantitativnu mjeru izvedbe, njegova konzistentnost među ispitanicima upućuje na promjenu u percepciji napora tijekom visokointenzivnog opterećenja.

Jedno od mogućih objašnjenja ovog nalaza može biti u neurofiziološkoj ulozi magnezija, osobito u njegovoj interakciji s NMDA (N-metil-D-aspartat) receptorima. Magnezij djeluje kao fiziološki antagonist NMDA receptora, pri čemu u stanju mirovanja blokira ionski kanal, ograničava ulazak kalcija te smanjuje ekscitacijsku glutamatergičku neurotransmisiju i neuronalnu ekscitabilnost (Kirkland et al., 2018; Pickering et al., 2020). Tijekom intenzivnog fizičkog napora, povećana ekscitatorna aktivnost u središnjem živčanom sustavu može doprinijeti razvoju centralnog umora i povećanoj percepciji napora. Magnezij može modulirati ovu ekscitacijsku aktivnost i time smanjiti subjektivni osjećaj napora, bez nužne promjene u perifernim metaboličkim pokazateljima.

Ovakva interpretacija u skladu je s literaturom koja opisuje ulogu magnezija u regulaciji neuromuskularne ekscitabilnosti i središnje neurotransmisije, uključujući modulaciju NMDA receptora i smanjenje pretjerane neuronske depolarizacije. Time se subjektivni dojam manjeg napora u uvjetu s magnezijem može promatrati kao odraz poboljšane centralne tolerancije napora.

Ovaj rezultat može se tumačiti kao potporni, kvalitativni pokazatelj, koji dodatno osnažuje interpretaciju glavnih rezultata pa tako izraženi subjektivni dojam lakšeg izvođenja TLim testa u uvjetu s magnezijem, u kombinaciji s produljenim vremenom izdržaja i nepromijenjenim perifernim metaboličkim markerima, upućuje na mogućnost da intravenska primjena magnezija djelomično djeluje putem centralnih mehanizama regulacije napora i tako dodatno podupire koncept da se ergogeni učinak magnezija u ovom protokolu očituje kroz poboljšanu toleranciju napora, a ne povećanjem maksimalnog energetskog kapaciteta.

7. ZAKLJUČCI

Na temelju provedenog istraživanja i dobivenih rezultata, u odnosu na postavljene ciljeve i hipoteze mogu se iznijeti sljedeći zaključci:

1. Akutna intravenska primjena magnezija dovela je do statistički značajnog produljenja vremena izdržaja tijekom TLim testa, čime se potvrđuje da magnezij može poboljšati izvedbu u uvjetima visokointenzivnog kontinuiranog napora.
2. Intravenska primjena magnezija nije dovela do promjena u klasičnim pokazateljima anaerobnoga energetskeg kapaciteta, uključujući koncentracije laktata u mirovanju te tijekom ranog oporavka nakon TLim testa. Time se potvrđuje hipoteza H1, prema kojoj akutna intravenska primjena magnezija ne utječe na poboljšanje pokazatelja anaerobnog energetskeg kapaciteta.
3. Produljenje vremena izdržaja uz nepromijenjene koncentracije laktata u oporavku sugerira da se učinak magnezija ne očituje kroz povećanje anaerobne produkcije energije, već vjerojatno kroz poboljšanu toleranciju visokointenzivnog opterećenja ili odgođeni razvoj metaboličkog stresa.
4. Akutna intravenska primjena magnezija nije dovela do povećanja maksimalne aerobne aktivacije tijekom izvođenja TLim testa, što je potvrđeno nepromijenjenim vrijednostima apsolutnog i relativnog $\text{VO}_{2\text{max}}$ te nepromijenjenom maksimalnom proizvodnjom ugljikova dioksida ($\text{VCO}_{2\text{max}}$). Time se potvrđuje hipoteza H2, prema kojoj intravenska primjena magnezija ne utječe na poboljšanje pokazatelja aerobnoga energetskeg kapaciteta.
5. Ventilacijski i kardiovaskularni parametri tijekom TLim testa, uključujući VE_{max} , VT_{max} , HR_{max} i većinu ventilacijskih pokazatelja, nisu se razlikovali između uvjeta. Uočen je statistički značajan, ali mali porast maksimalne frekvencije disanja (BF_{max}) u uvjetu s magnezijem, bez promjene ukupnog ventilacijskog kapaciteta.
6. Vrijeme do postizanja maksimalnog respiracijskog omjera (tRER) bilo je značajno dulje u uvjetu s magnezijem, što upućuje na promjenu dinamike metaboličkog odgovora tijekom napora, neovisno o čimbenicima aerobnog i anaerobnog kapaciteta.

7. Koncentracije glukoze u mirovanju prije TLim testa te tijekom ranog oporavka nisu se razlikovale između uvjeta, što pokazuje da akutni ergogeni učinak magnezija nije posredovan promjenama u glikemijskom odgovoru.
8. Sveukupno, rezultati ovog istraživanja pokazuju da se potencijalni ergogeni učinak akutne intravenske primjene magnezija ne ostvaruje kroz promjene pokazatelja aerobnoga ili anaerobnoga energetskeg kapaciteta, već se najvjerojatnije očituje kroz poboljšanu toleranciju visokointenzivnog kontinuiranog napora i promjenu metaboličke dinamike, što omogućuje dulji izdržaj tijekom visokointenzivnog opterećenja, odnosno bolju sportsku izvedbu.

8. OGRANIČENJA ISTRAŽIVANJA

Pri interpretaciji rezultata ovog istraživanja potrebno je uzeti u obzir nekoliko metodoloških ograničenja.

Iako je veličina uzorka bila statistički dovoljna, osobito uzimajući u obzir crossover dizajn istraživanja, relativno mali apsolutni broj ispitanika i specifičnost uzorka (mladi, trenirani sportaši) mogu ograničiti mogućnost generalizacije rezultata na širu populaciju, uključujući rekreativne vježbače, stariju populaciju ili kliničke skupine. Ovo ograničenje odnosi se na vanjsku valjanost rezultata, a ne na njihovu statističku pouzdanost.

Intervencija u ovom istraživanju bila je akutna intravenska primjena magnezija, provedena neposredno prije izvođenja TLim testa. Stoga se dobiveni rezultati odnose isključivo na kratkoročne učinke takvog načina primjene i ne mogu se izravno ekstrapolirati na kroničnu suplementaciju magnezijem ili na dugotrajnije adaptacijske procese.

U istraživanju nisu mjerene koncentracije ioniziranog magnezija (Mg^{2+}) u plazmi prije i nakon intervencije. Iako su doza i način primjene magnezija bili standardizirani, izostanak ovih mjerenja onemogućuje izravnu povezanost farmakokinetičkog profila magnezija s uočenim promjenama u izvedbi i fiziološkom odgovoru. Uz izostanak mjerenja ioniziranog magnezija u plazmi, dodatno ograničenje ovog istraživanja jest i činjenica da nije mjereno eritrocitni (RBC) magnezij, koji se u literaturi često navodi kao osjetljiviji pokazatelj dugoročnog intracelularnog statusa magnezija u usporedbi sa serumskim vrijednostima. Ipak, s obzirom na akutni karakter intervencije i dizajn istraživanja izostanak ovih mjerenja ne umanjuje osnovne zaključke istraživanja, već prvenstveno ograničava mogućnost dublje interpretacije mehanizama djelovanja magnezija na staničnoj razini.

Metabolički pokazatelji poput laktata i glukoze nisu mjereni kontinuirano tijekom samog TLim testa, već u mirovanju i tijekom ranog oporavka. Zbog toga nije bilo moguće izravno procijeniti dinamiku nakupljanja laktata ili promjene u glukoznom odgovoru tijekom samog opterećenja. Međutim, s obzirom na konzistentne vrijednosti metabolita i jasno izražen učinak na izvedbu, ovaj nedostatak ne umanjuje osnovne zaključke istraživanja.

Iako u istraživanju nije provedeno kontinuirano mjerenje glukoze tijekom TLim testa, izostanak takvog mjerenja ne predstavlja ključno ograničenje u kontekstu korištenog protokola. TLim test predstavlja visokointenzivni oblik opterećenja u kojem krvna glukoza ne predstavlja primarni limitirajući energetske supstrat, dok dominantnu ulogu imaju mišićni glikogen, fosfokreatinski sustav i anaerobna glikoliza. Nadalje, sustavi za kontinuirano mjerenje glukoze mjere

intersticijsku, a ne kapilarnu glukozu, uz inherentno vremensko kašnjenje, što ograničava njihovu primjenjivost u protokolima vrlo kratkog trajanja. S obzirom na to da su u ovom istraživanju bazalne vrijednosti glukoze te vrijednosti tijekom ranog oporavka bile usporedive između magnezijevog i placebo uvjeta, može se zaključiti da glukoza nije bila mehanizam djelovanja intervencije, čime se dodatno smanjuje značaj izostanka kontinuiranog mjerenja.

Na kraju, TLim test predstavlja laboratorijski model visokointenzivnog kontinuiranog napora, koji omogućuje visoku razinu standardizacije, ali ne odražava u potpunosti kompleksnost stvarnih natjecateljskih uvjeta, u kojima dodatnu ulogu imaju taktički, psihološki i okolišni čimbenici.

Unatoč navedenim ograničenjima, istraživanje je provedeno uz strogo kontrolirane uvjete, jasno definirane protokole i odgovarajuće statističke metode, čime je osigurana valjanost dobivenih rezultata i reproducibilnost.

9. PRAKTIČNE I ZNANSTVENE IMPLIKACIJE

Rezultati ovog istraživanja predstavljaju važan znanstveni doprinos razumijevanju mehanizama koji utječu na sportsku izvedbu u uvjetima visokointenzivnog kontinuiranog napora. Pokazano je da akutna intravenska primjena magnezija može dovesti do poboljšanja izvedbe, izraženog kroz produljenje vremena izdržaja tijekom TLim testa, bez istodobnih promjena u klasičnim pokazateljima aerobnoga i anaerobnoga energetskeg kapaciteta. Ovaj nalaz naglašava važnost razlikovanja pojmova maksimalnog energetskeg kapaciteta i tolerancije napora, te ukazuje da se ergogeni učinak može ostvariti promjenom dinamike metaboličkog odgovora, a ne nužno povećanjem maksimalnih fizioloških vrijednosti.

Posebna znanstvena vrijednost ovog istraživanja leži u činjenici da je učinak magnezija ispitan u standardiziranom laboratorijskom modelu TLim testa, koji omogućuje preciznu kontrolu opterećenja i izolaciju fizioloških odgovora. Time je omogućeno jasno razgraničenje između promjena u izvedbi i promjena u ventilacijskim, kardiovaskularnim i metaboličkim markerima, koji su u ovom istraživanju u najvećoj mjeri ostali nepromijenjeni. Ovakav obrazac nalaza pridonosi suvremenim raspravama u sportskoj fiziologiji o ograničenjima tradicionalnih biomarkera u objašnjenju izvedbe pri vrlo visokim intenzitetima opterećenja.

Rezultati također imaju važnu implikaciju za razumijevanje uloge magnezija u fiziološkoj regulaciji tijekom napora. Iako magnezij nije utjecao na maksimalnu aerobnu aktivaciju, ventilacijski kapacitet ili koncentracije laktata i glukoze u oporavku, produljenje vremena izdržaja i odgođeno postizanje maksimalnog respiracijskog omjera upućuju na promjenu tolerancije metaboličkog stresa, što otvara prostor za daljnja istraživanja neuromuskularnih, ionskih i staničnih mehanizama djelovanja magnezija.

Važna znanstvena implikacija ovog rada odnosi se i na regulatorni i etički aspekt intervencija u sportu. Iako intravenska primjena magnezija prema važećoj Listi zabranjenih supstanci i metoda Svjetske antidopinške agencije (WADA) ne predstavlja zabranjenu metodu, rezultati ovog istraživanja pokazuju da takva intervencija može utjecati na sportsku izvedbu u laboratorijskim uvjetima. Time se otvara važno pitanje granice između medicinski opravdane primjene intravenskih pripravaka i njihove potencijalne ergogene uporabe. Dobiveni nalazi ne mogu se tumačiti kao preporuka za primjenu u natjecateljskom sportu, već kao znanstveni doprinos raspravi o tome kako pojedine intervencije mogu utjecati na toleranciju napora i sportsku izvedbu.

Na temelju ovih rezultata, buduća istraživanja trebala bi se usmjeriti na dodatno razjašnjavanje mehanizama djelovanja magnezija, uključujući mjerenje ioniziranog magnezija, neuromuskularnih parametara i kontinuirane metaboličke dinamike tijekom opterećenja, kao i na procjenu sigurnosnih, etičkih i regulatornih aspekata intervencija u sportu. Na taj način bit će moguće preciznije definirati ulogu magnezija u regulaciji sportske izvedbe i postaviti jasne granice između terapijske i ergogene primjene.

10. REFERENCE

- Al-Ghamdi, S. M., Cameron, E. C., & Sutton, R. A. (1994). Magnesium deficiency: pathophysiologic and clinical overview. *American journal of kidney diseases : the official journal of the National Kidney Foundation*, 24(5), 737–752.
- Almoznino-Sarafian, D., Sarafian, G., Berman, S., Shteinshnaider, M., Tzur, I., Cohen, N., & Gorelik, O. (2009). Magnesium administration may improve heart rate variability in patients with heart failure. *Nutrition, metabolism, and cardiovascular diseases : NMCD*, 19(9), 641–645.
- Altura, B. M., & Altura, B. T. (1994). Role of magnesium and calcium in alcohol-induced hypertension and strokes as probed by in vivo television microscopy, digital image microscopy, optical spectroscopy, ³¹P-NMR, spectroscopy and a unique magnesium ion-selective electrode. *Alcoholism, clinical and experimental research*, 18(5), 1057–1068.
- Amaral, A. F., Gallo, L., Jr, Vannucchi, H., Crescêncio, J. C., Vianna, E. O., & Martinez, J. A. (2012). The effect of acute magnesium loading on the maximal exercise performance of stable chronic obstructive pulmonary disease patients. *Clinics (Sao Paulo, Brazil)*, 67(6), 615–622.
- Amaral, A. F., Gallo, L., Jr, Vannucchi, H., Crescêncio, J. C., Vianna, E. O., & Martinez, J. A. (2012). The effect of acute magnesium loading on the maximal exercise performance of stable chronic obstructive pulmonary disease patients. *Clinics (Sao Paulo, Brazil)*, 67(6), 615–622.
- Beaver, W. L., Wasserman, K., & Whipp, B. J. (1986). Bicarbonate buffering of lactic acid generated during exercise. *Journal of applied physiology (Bethesda, Md. : 1985)*, 60(2), 472–478.
- Billat, L. V., & Koralsztejn, J. P. (1996). Significance of the velocity at VO₂max and time to exhaustion at this velocity. *Sports medicine (Auckland, N.Z.)*, 22(2), 90–108.
- Billat, V., Faina, M., Sardella, F., Marini, C., Fanton, F., Lupo, S., Faccini, P., de Angelis, M., Koralsztejn, J. P., & Dalmonte, A. (1996). A comparison of time to exhaustion at VO₂ max in elite cyclists, kayak paddlers, swimmers and runners. *Ergonomics*, 39(2), 267–277.
- Billat L. V. (2001). Interval training for performance: a scientific and empirical practice. Special recommendations for middle- and long-distance running. Part I: aerobic interval training. *Sports medicine (Auckland, N.Z.)*, 31(1), 13–31.
- Bohl, C. H., & Volpe, S. L. (2002). Magnesium and exercise. *Critical reviews in food science and nutrition*, 42(6), 533–563.
- Bracken, R. M., Edavalath, M., Morton, R., West, D., Fielding, A., Luzio, S., Underwood, P., & Stephens, J. W. (2010). Exercise-induced hyperglycaemia in the absence of diabetes. *Diabetic medicine : a journal of the British Diabetic Association*, 27(6), 723–724.
- Brilla, L. R., & Haley, T. F. (1992). Effect of magnesium supplementation on strength training in humans. *Journal of the American College of Nutrition*, 11(3), 326–329.
- Brooks G. A. (2018). The Science and Translation of Lactate Shuttle Theory. *Cell metabolism*, 27(4), 757–785.
- Cairns, C. B., & Kraft, M. (1996). Magnesium attenuates the neutrophil respiratory burst in adult asthmatic patients. *Academic emergency medicine : official journal of the Society for Academic Emergency Medicine*, 3(12), 1093–1097.
- Chen, H. Y., Cheng, F. C., Pan, H. C., Hsu, J. C., & Wang, M. F. (2014). Magnesium enhances exercise performance via increasing glucose availability in the blood, muscle, and brain during exercise. *PloS one*, 9(1), e85486.

- Cheng, S. M., Yang, L. L., Chen, S. H., Hsu, M. H., Chen, I. J., & Cheng, F. C. (2010). Magnesium sulfate enhances exercise performance and manipulates dynamic changes in peripheral glucose utilization. *European journal of applied physiology*, 108(2), 363–369.
- Cinar, V., Nizamlioglu, M., & Moğulkoc, R. (2006). The effect of magnesium supplementation on lactate levels of sportsmen and sedanter. *Acta physiologica Hungarica*, 93(2-3), 137–144.
- Connolly, E., & Worthley, L. I. (1999). Intravenous magnesium. *Critical care and resuscitation : journal of the Australasian Academy of Critical Care Medicine*, 1(2), 162–172.
- Costello, R. B., Elin, R. J., Rosanoff, A., Wallace, T. C., Guerrero-Romero, F., Hruby, A., Lutsey, P. L., Nielsen, F. H., Rodriguez-Moran, M., Song, Y., & Van Horn, L. V. (2016). Perspective: The case for an evidence-based reference interval for serum magnesium: The time has come. *Advances in Nutrition*, 7(6), 977–993.
- Costill, D. L., Coté, R., & Fink, W. (1976). Muscle water and electrolytes following varied levels of dehydration in man. *Journal of applied physiology*, 40(1), 6–11.
- Currell, K., & Jeukendrup, A. E. (2008). Validity, reliability and sensitivity of measures of sporting performance. *Sports medicine (Auckland, N.Z.)*, 38(4), 297–316.
- Dalleck, L. C., & Kravitz, L. (2006). Relationship Between %Heart Rate Reserve And %VO₂ Reserve During Elliptical Crosstrainer Exercise. *Journal of sports science & medicine*, 5(4), 662–671.
- de Baaij, J. H., Hoenderop, J. G., & Bindels, R. J. (2015). Magnesium in man: implications for health and disease. *Physiological reviews*, 95(1), 1–46.
- de Haan, A., van Doorn, J.E., & Westra, H.G. (1985). Effects of Potassium + Magnesium Aspartate on Muscle Metabolism and Force Development during Short Intensive Static Exercise. *International Journal of Sports Medicine*, 06, 44 - 49.
- DiNicolantonio, J. J., O'Keefe, J. H., & Wilson, W. (2018). Subclinical magnesium deficiency: a principal driver of cardiovascular disease and a public health crisis. *Open heart*, 5(1), e000668.
- Dominguez, L. J., Veronese, N., Ragusa, F. S., Baio, S. M., Sgrò, F., Russo, A., Battaglia, G., Bianco, A., & Barbagallo, M. (2025). The Importance of Vitamin D and Magnesium in Athletes. *Nutrients*, 17(10), 1655.
- Dørup, I., & Clausen, T. (1991). Effects of magnesium and zinc deficiencies on growth and protein synthesis in skeletal muscle and the heart. *The British journal of nutrition*, 66(3), 493–504.
- Egelund, T. A., Wassil, S. K., Edwards, E. M., Linden, S., & Irazuzta, J. E. (2013). High-dose magnesium sulfate infusion protocol for status asthmaticus: a safety and pharmacokinetics cohort study. *Intensive care medicine*, 39(1), 117–122.
- Fawcett, W. J., Haxby, E. J., & Male, D. A. (1999). Magnesium: physiology and pharmacology. *British journal of anaesthesia*, 83(2), 302–320.
- Garfinkel, L., & Garfinkel, D. (1985). Magnesium regulation of the glycolytic pathway and the enzymes involved. *Magnesium*, 4(2-3), 60–72.
- Geiger, H., & Wanner, C. (2012). Magnesium in disease. *Clinical kidney journal*, 5(Suppl 1), i25–i38.
- Gröber, U., Schmidt, J., & Kisters, K. (2015). Magnesium in Prevention and Therapy. *Nutrients*, 7(9), 8199–8226.

- Hashimoto, Y., Nishimura, Y., Maeda, H., & Yokoyama, M. (2000). Assessment of magnesium status in patients with bronchial asthma. *The Journal of asthma : official journal of the Association for the Care of Asthma*, 37(6), 489–496.
- Heffernan, S. M., Horner, K., De Vito, G., & Conway, G. E. (2019). The Role of Mineral and Trace Element Supplementation in Exercise and Athletic Performance: A Systematic Review. *Nutrients*, 11(3), 696.
- Jones A. M. (1998). A five year physiological case study of an Olympic runner. *British journal of sports medicine*, 32(1), 39–43.
- Kass, L. S., & Poeira, F. (2015). The effect of acute vs chronic magnesium supplementation on exercise and recovery on resistance exercise, blood pressure and total peripheral resistance on normotensive adults. *Journal of the International Society of Sports Nutrition*, 12, 19.
- Kirkland, A. E., Sarlo, G. L., & Holton, K. F. (2018). The Role of Magnesium in Neurological Disorders. *Nutrients*, 10(6), 730.
- Laursen, P. B., Shing, C. M., Peake, J. M., Coombes, J. S., & Jenkins, D. G. (2002). Interval training program optimization in highly trained endurance cyclists. *Medicine and science in sports and exercise*, 34(11), 1801–1807.
- Laursen, P. B., Shing, C. M., Peake, J. M., Coombes, J. S., & Jenkins, D. G. (2005). Influence of high-intensity interval training on adaptations in well-trained cyclists. *Journal of strength and conditioning research*, 19(3), 527–533.
- Lu, J. F., & Nightingale, C. H. (2000). Magnesium sulfate in eclampsia and pre-eclampsia: pharmacokinetic principles. *Clinical pharmacokinetics*, 38(4), 305–314.
- Marabelli, C., Santiago, D. J., & Priori, S. G. (2025). The Yin and Yang of Heartbeats: Magnesium-Calcium Antagonism Is Essential for Cardiac Excitation-Contraction Coupling. *Cells*, 14(16), 1280.
- Midgley, A. W., McNaughton, L. R., & Jones, A. M. (2007). Training to enhance the physiological determinants of long-distance running performance: can valid recommendations be given to runners and coaches based on current scientific knowledge?. *Sports medicine (Auckland, N.Z.)*, 37(10), 857–880.
- Midgley, A. W., & Mc Naughton, L. R. (2006). Time at or near VO₂max during continuous and intermittent running. A review with special reference to considerations for the optimisation of training protocols to elicit the longest time at or near VO₂max. *The Journal of sports medicine and physical fitness*, 46(1), 1–14.
- Mildvan A. S. (1987). Role of magnesium and other divalent cations in ATP-utilizing enzymes. *Magnesium*, 6(1), 28–33.
- Minnich, V., Smith, M. B., Brauner, M. J., & Majerus, P. W. (1971). Glutathione biosynthesis in human erythrocytes. I. Identification of the enzymes of glutathione synthesis in hemolysates. *The Journal of clinical investigation*, 50(3), 507–513.
- Mooren, F. C., Golf, S. W., Lechtermann, A., & Völker, K. (2005). Alterations of ionized Mg²⁺ in human blood after exercise. *Life sciences*, 77(11), 1211–1225.
- Moslehi, N., Vafa, M., Sarrafzadeh, J., & Rahimi-Foroushani, A. (2013). Does magnesium supplementation improve body composition and muscle strength in middle-aged overweight women? A double-blind, placebo-controlled, randomized clinical trial. *Biological trace element research*, 153(1-3), 111–118.

- Newhouse, I. J., & Finstad, E. W. (2000). The effects of magnesium supplementation on exercise performance. *Clinical journal of sport medicine : official journal of the Canadian Academy of Sport Medicine*, 10(3), 195–200.
- Nielsen, F. H., & Lukaski, H. C. (2006). Update on the relationship between magnesium and exercise. *Magnesium research*, 19(3), 180–189.
- Ni, H., Aye, S. Z., & Naing, C. (2022). Magnesium sulfate for acute exacerbations of chronic obstructive pulmonary disease. *The Cochrane database of systematic reviews*, 5(5), CD013506.
- Noppen, M., Vanmaele, L., Impens, N., & Schandevyl, W. (1990). Bronchodilating effect of intravenous magnesium sulfate in acute severe bronchial asthma. *Chest*, 97(2), 373–376.
- Okusanya, B. O., Oladapo, O. T., Long, Q., Lumbiganon, P., Carroli, G., Qureshi, Z., Duley, L., Souza, J. P., & Gülmezoglu, A. M. (2016). Clinical pharmacokinetic properties of magnesium sulphate in women with pre-eclampsia and eclampsia. *BJOG : an international journal of obstetrics and gynaecology*, 123(3), 356–366.
- Pickering, G., Mazur, A., Trousselard, M., Bienkowski, P., Yaltsewa, N., Amessou, M., Noah, L., & Pouteau, E. (2020). Magnesium Status and Stress: The Vicious Circle Concept Revisited. *Nutrients*, 12(12), 3672.
- Pollock, N., Chakraverty, R., Taylor, I., & Killer, S. C. (2020). An 8-year Analysis of Magnesium Status in Elite International Track & Field Athletes. *Journal of the American College of Nutrition*, 39(5), 443–449.
- Poole, D. C., Burnley, M., Vanhatalo, A., Rossiter, H. B., & Jones, A. M. (2016). Critical Power: An Important Fatigue Threshold in Exercise Physiology. *Medicine and science in sports and exercise*, 48(11), 2320–2334.
- Poole, D. C., & Jones, A. M. (2012). Oxygen uptake kinetics. *Comprehensive Physiology*, 2(2), 933–996.
- Potter, J. D., Robertson, S. P., & Johnson, J. D. (1981). Magnesium and the regulation of muscle contraction. *Federation proceedings*, 40(12), 2653–2656.
- Rosanoff, A., Dai, Q., & Shapses, S. A. (2016). Essential Nutrient Interactions: Does Low or Suboptimal Magnesium Status Interact with Vitamin D and/or Calcium Status?. *Advances in nutrition (Bethesda, Md.)*, 7(1), 25–43.
- Rosanoff, A., West, C., Elin, R. J., Micke, O., Baniasadi, S., Barbagallo, M., Campbell, E., Cheng, F. C., Costello, R. B., Gamboa-Gomez, C., Guerrero-Romero, F., Gletsu-Miller, N., von Ehrlich, B., Iotti, S., Kahe, K., Kim, D. J., Kisters, K., Kolisek, M., Kraus, A., Maier, J. A., ... MaGNet Global Magnesium Project (MaGNet) (2022). Recommendation on an updated standardization of serum magnesium reference ranges. *European journal of nutrition*, 61(7), 3697–3706.
- Romani A. M. (2011). Cellular magnesium homeostasis. *Archives of biochemistry and biophysics*, 512(1), 1–23.
- Romani A. M. (2013). Magnesium in health and disease. *Metal ions in life sciences*, 13, 49–79.
- Santos, D. A., Matias, C. N., Monteiro, C. P., Silva, A. M., Rocha, P. M., Minderico, C. S., Bettencourt Sardinha, L., & Laires, M. J. (2011). Magnesium intake is associated with strength performance in elite basketball, handball and volleyball players. *Magnesium research*, 24(4), 215–219.

- Saris, N. E., Mervaala, E., Karppanen, H., Khawaja, J. A., & Lewenstam, A. (2000). Magnesium. An update on physiological, clinical and analytical aspects. *Clinica chimica acta; international journal of clinical chemistry*, 294(1-2), 1–26.
- Setaro, L., Santos-Silva, P. R., Nakano, E. Y., Sales, C. H., Nunes, N., Greve, J. M., & Colli, C. (2014). Magnesium status and the physical performance of volleyball players: effects of magnesium supplementation. *Journal of sports sciences*, 32(5), 438–445.
- Song, W. J., & Chang, Y. S. (2012). Magnesium sulfate for acute asthma in adults: a systematic literature review. *Asia Pacific allergy*, 2(1), 76–85.
- Swaminathan R. (2003). Magnesium metabolism and its disorders. *The Clinical biochemist. Reviews*, 24(2), 47–66.
- Tarsitano, M. G., Quinzi, F., Folino, K., Greco, F., Oranges, F. P., Cerulli, C., & Emerenziani, G. P. (2024). Effects of magnesium supplementation on muscle soreness in different type of physical activities: a systematic review. *Journal of translational medicine*, 22(1), 629.
- Terblanche, S., Noakes, T. D., Dennis, S. C., Marais, D., & Eckert, M. (1992). Failure of magnesium supplementation to influence marathon running performance or recovery in magnesium-replete subjects. *International journal of sport nutrition*, 2(2), 154–164.
- Uwitonze, A. M., & Razzaque, M. S. (2018). Role of Magnesium in Vitamin D Activation and Function. *The Journal of the American Osteopathic Association*, 118(3), 181–189.
- Veronese, N., Berton, L., Carraro, S., Bolzetta, F., De Rui, M., Perissinotto, E., Toffanello, E. D., Bano, G., Pizzato, S., Miotto, F., Coin, A., Manzato, E., & Sergi, G. (2014). Effect of oral magnesium supplementation on physical performance in healthy elderly women involved in a weekly exercise program: a randomized controlled trial. *The American journal of clinical nutrition*, 100(3), 974–981.
- Volpe S. L. (2015). Magnesium and the Athlete. *Current sports medicine reports*, 14(4), 279–283.
- Wang, R., Chen, C., Liu, W., Zhou, T., Xun, P., He, K., & Chen, P. (2017). The effect of magnesium supplementation on muscle fitness: a meta-analysis and systematic review. *Magnesium research*, 30(4), 120–132.
- Wasserman, K., Hansen, J. E., Sue, D. Y., Casaburi, R., & Whipp, B. J. (1999). *Principles of exercise testing and interpretation: Including pathophysiology and clinical applications* (3rd ed.). Lippincott Williams & Wilkins.
- Zanforlini, B. M., Ceolin, C., Trevisan, C., Alessi, A., Seccia, D. M., Noale, M., Maggi, S., Guarnieri, G., Vianello, A., & Sergi, G. (2022). Clinical trial on the effects of oral magnesium supplementation in stable-phase COPD patients. *Aging clinical and experimental research*, 34(1), 167–174.
- Zhang, H., Wang, R., Guo, S., Tian, Q., Zhang, S., Guo, L., Liu, T., & Wang, R. (2023). Lower serum magnesium concentration and higher 24-h urinary magnesium excretion despite higher dietary magnesium intake in athletes: A systematic review and meta-analysis. *Food Science and Human Wellness*, 12(5), 1471–1480.
- Zhang, Y., Xun, P., Wang, R., Mao, L., & He, K. (2017). Can Magnesium Enhance Exercise Performance?. *Nutrients*, 9(9), 946.

11. POPIS KRATICA I OZNAKA

ADP – adenzin-difosfat

AMP – adenzin-monofosfat

ATP – adenzin-trifosfat

BF – frekvencija disanja (breathing frequency)

BF_{max} – maksimalna frekvencija disanja

EKG – elektrokardiogram

FVC – forsirani vitalni kapacitet (forced vital capacity)

GUK – koncentracija glukoze u krvi

GUK_{mir} – koncentracija glukoze u mirovanju

GUK₁ – koncentracija glukoze u 1. minuti oporavka

GUK₃ – koncentracija glukoze u 3. minuti oporavka

GUK₅ – koncentracija glukoze u 5. minuti oporavka

HR – frekvencija srca (heart rate)

HR_{max} – maksimalna frekvencija srca

KF1 – inicijalni progresivni spiroergometrijski test prema protokolu Kineziološkog fakulteta

LAC – koncentracija laktata u krvi

LAC_{mir} – koncentracija laktata u mirovanju

LAC₁ – koncentracija laktata u 1. minuti oporavka

LAC₃ – koncentracija laktata u 3. minuti oporavka

LAC₅ – koncentracija laktata u 5. minuti oporavka

Mg – magnezij

Mg²⁺ – ionizirani magnezij

Mg-ATP – kompleks magnezija i adenzin-trifosfata

NMDA – N-metil-D-aspartat (receptor)

PDH – piruvat-dehidrogenaza

RER – respiracijski omjer (respiratory exchange ratio)

tRER – vrijeme do postizanja maksimalnog respiracijskog ekvivalenta

RVO₂ – relativni primitak kisika ($\text{ml} \cdot \text{kg}^{-1} \cdot \text{min}^{-1}$)

RVO₂max – maksimalni relativni primitak kisika

Tlim – test izdržaja do iscrpljenja pri konstantnoj brzini (time to exhaustion test)

tTlim – vrijeme izdržaja u Tlim testu

SPN – subjektivna procjena napora

VE – minutna ventilacija

VEmax – maksimalna minutna ventilacija

VO₂ – primitak kisika

VO₂max – maksimalni primitak kisika

VCO₂ – proizvodnja ugljikova dioksida

VCO₂max – maksimalna proizvodnja ugljikova dioksida

vVO₂max – brzina trčanja pri postignutom maksimalnom primitku kisika

vVT2 – brzina trčanja na drugom ventilacijskom pragu

vmax – maksimalna postignuta brzina trčanja

VT – dišni volumen

VTmax – maksimalni dišni volumen

WADA – Svjetska antidopinška agencija (World Anti-Doping Agency)

12. ŽIVOTOPIS AUTORICE

Marina Banović rođena je 11.veljače 1982. u Osijeku, gdje je i završila Jezičnu gimnaziju. Diplomirala je na Medicinskom fakultetu Sveučilišta u Zagrebu 2006. godine. Prvo kliničko iskustvo stječe radom u ambulanti obiteljske medicine te potom u Zavodu za hitnu medicinu Krapinsko-Zagorske županije. Specijalističko usavršavanje iz anesteziologije, reanimatologije i intenzivne medicine započinje 2015.godine u Kliničkoj bolnici Sveti Duh, gdje je i danas zaposlena. Tijekom specijalizacije upisuje i poslijediplomski stručni studij i stiče naziv sveučilišnog magistra. Specijalistički ispit iz anesteziologije polaže 2020. godine. Asistentica je pri Fakultetu za dentalnu medicinu i zdravstvo Sveučilišta J.J.Strossmayera u Osijeku, a sudjeluje i u nastavi Medicinskog fakulteta Sveučilišta u Zagrebu i Studija sestrinstva. Uže područje njenog interesa je regionalna anestezija i minimalno invazivne metode za liječenje boli iz čega se educirala na brojnim tečajevima prve kategorije u inozemstvu i kroz studijske boravke u renomiranim klinikama. Članica je Europskog društva za regionalnu anesteziju i medicinu boli te pozvana predavačica i edukatorica na nekoliko skupova koji se bave tematikom.

Bila je dugogodišnja aktivna atletičarka i natjecateljica, članica nacionalne reprezentacije i državna rekorderka. Na temelju postignutih rezultata Hrvatski olimpijski odbor dodijelio joj je status vrhunske sportašice. Uspješno surađuje s nizom aktivnih sportaša. Članica je Upravnog odbora Hrvatskog paraatletskog saveza i podpredsjednica Zagrebačkog parasportskog saveza. Zadnjih 14 godina radi kao voditeljica zdravstvene službe World Athletics Continental tour Gold Boris Hanžeković memorijala.

OBJAVLJENI RADOVI

1. **Banović, M., & Delalić, Đ.** (2025). Ultrasound-guided genitofemoral nerve block for pain relief in a patient with postoperative left testicular pain: A case report. *Regional Anesthesia & Pain Medicine*, 50(Suppl. 1), A73.
2. **Banović, M., & Adam, V. N.** (2023). Regional anesthesia as the primary choice for postoperative pain control in an opioid-sensitized patient: A case report. *Regional Anesthesia & Pain Medicine*, 48(Suppl. 1), A309–A310.
3. **Banović, M., Milanović, L., & Golubiček, I.** (2019). Tenziomiografija kao dijagnostička metoda u sportu – pregled literature. In V. Babić (Ed.), *Zbornik radova 28. Ljetne škole kineziologa* (pp. 676–685). Zagreb, Croatia.

4. **Banović, M.**, Vučetić, V. (2019). Differences in breathing patterns of male and female 400 m runners. In *5th International Scientific Conference on Exercise and Quality of Life* (p. 37). Novi Sad, Serbia.
5. **Banović, M.**, Neseć Adam, V., & Marin, D. (2019). Poslijeoperacijska analgezija nakon konstrukcijskih zahvata koljena – usporedba različitih kombinacija perifernih živčanih blokova. *Acta Medica Croatica*, 73(Suppl. 1), 17–21.
6. Šakić-Zdravčević, K., Bernatović, N., Danilović, M., Draguljić, M., Štefak Jadrijević, A., Jakšić, M., Klancir, T., Leko, I., Kvaternik, I., Slunjski, K., et al. (2017). Dani poslijediplomskog specijalističkog studija Anesteziologija, reanimatologija i intenzivna medicina. *Medica Jadertina*, 47, 1–48.
7. **Banović, M.** (2022). Dijagnostički testovi za procjenu respiracijske funkcije. In V. Neseć Adam & M. Filipec (Eds.), *Perioperacijska fizioterapija* (pp. 69–81). Quo Vadis Tisak.