

Doktori (PhD) értekezés tézisei

A hemorheológiai és sportélettani paraméterek integrált vizsgálata a teljesítménydiagnosztikában

Dr. Módy Tóbiás

Témavezető: Prof. Dr. Szántó Sándor



DEBRECENI EGYETEM
Klinikai Orvostudományok Doktori Iskola

Debrecen, 2026

A hemorheológiai és sportélettani paraméterek integrált vizsgálata a teljesítménydiagnosztikában

Értekezés a doktori (PhD) fokozat megszerzése érdekében
a klinikai orvostudományok tudományágban

Írta: Dr. Módy Tóbiás okleveles sportorvostan szakorvos

Készült a Debreceni Egyetem Klinikai Orvostudományok doktori iskolája
(Konzervatív orvostudományok és klinikai vizsgálatok program) keretében

Témavezető: Prof. Dr. Szántó Sándor

Az értekezés bírálói:

Dr. Mintál Tibor, PhD
Dr. Szántó Antónia, PhD

A bírálóbizottság:

elnök: Prof. Dr. Méhes Gábor, MTA doktora
tagok: Dr. Mintál Tibor, PhD
Dr. Szántó Antónia, PhD
Dr. Fülöp Péter, PhD
Dr. Molnár Szabolcs, PhD

Az értekezés védésének időpontja: Debreceni Egyetem ÁOK, Belgyógyászati Intézet
„A” épület
2026.05.13. 13:00

1. BEVEZETÉS

A sportorvostan és a teljesítménydiagnosztika egyik alapvető célja annak megértése, hogy milyen tényezők határozzák meg az emberi szervezet fizikai teljesítőképességét, valamint miként lehet azt objektíven mérni, monitorozni és fejleszteni. A fizikai aktivitás és az edzésadaptációk vizsgálata nem csupán az élsportolók teljesítmény-optimalizálásában, hanem a rekreációs testmozgásban, a betegségek rehabilitációjában, illetve a prevenciós orvoslásban is kulcsszerepet tölt be. A fizikai teljesítmény élettani alapjai sokrétűek: a keringési, légző-, anyagcsere-, hormonális és idegrendszeri tényezők egyaránt hozzájárulnak ahhoz, hogy a szervezet milyen hatékonysággal képes oxigént szállítani, energiát termelni és fenntartani a homeosztázist fokozott terhelés során.

A sportteljesítményt meghatározó tényezők közül kiemelt jelentőséggel bír az oxigénszállítási lánc hatékonysága, amely magában foglalja a tüdő gázcsere-folyamatait, a keringés pumpafunkcióját, a vér oxigénkötő és -szállító képességét, valamint a perifériás mikrocirkuláció működését. A véráramlás ezen utóbbi komponensét – azaz a kapillárisok szintjén zajló perfúziót – hosszú ideig kevésbé vizsgálták sportélettani szempontból, noha a szöveti oxigenizáció közvetlenül ezen a szinten dől el.

A mikrocirkuláció hatékonyságának egyik legfontosabb determinánsa a vér rheológiai tulajdonsága, amelyet a plazma viszkozitása, a hematokrit, valamint a vörösvérsejtek deformabilitása és aggregációja határoz meg. A vér úgynevezett nem-Newtoni folyadék, amelynek viszkozitása nem állandó, hanem a nyíróerőtől függően változik. Alacsony nyírósebesség mellett a vörösvérsejtek összecsapzódnak, növelve a viszkozitást, míg magasabb nyírósebességnél ezek az aggregátumok felbomlanak, így a vér folyékonyabbá válik. Ez a dinamikus tulajdonság teszi lehetővé, hogy a vér alkalmazkodni tudjon a különböző érszűkületekhez, változó áramlási feltételekhez és terhelési szintekhez.

A vörösvérsejt-deformabilitás kulcsszerepet játszik a mikrocirkulációban, mivel a sejteknek a kapillárisok átmérőjénél kisebb ereken kell áthaladniuk. Ehhez rugalmas membrán, megfelelő citoszkeletális felépítés és alacsony intracelluláris viszkozitás szükséges. Ha a sejtek merevebbé válnak – például oxidatív stressz, acidózis, hipoxia vagy gyulladásos mediátorok hatására –, az gátolja a kapillárisáramlást és rontja az oxigénszállítás hatékonyságát.

A vörösvérsejt-aggregáció egy másik fontos mikrorheológiai jelenség, amely alacsony nyíróerők mellett reverzibilis sejtcsoportosulásokat hoz létre. Fiziológias körülmények között ez segíti a vénás keringést, kóros mértékű fokozódása azonban – például gyulladás, hiperlipidémia, dohányzás vagy elhízás esetén – a mikrocirkulációs áramlás gátlásához vezet.

A hemorheológiai egyensúly megőrzése tehát kulcsfontosságú a sportolói teljesítmény szempontjából. A kedvező rheológiai profil (mérsékelt hematokrit, alacsony plazmaviszkozitás, jó deformabilitás, optimális aggregáció) hatékony oxigénszállítást, míg a kedvezőtlen profil (magas viszkozitás, rigid vörösvérsejtek, fokozott aggregáció) csökkent teljesítményt és gyorsabb kifáradást eredményez.

Az utóbbi évtizedben a „hemorheológiai fitness” fogalma is megjelent a szakirodalomban, utalva arra, hogy a rendszeresen edző egyének vérének folyási tulajdonságai kedvezőbbek, mint az inaktívaké. A rendszeres testmozgás növeli a plazmatérfogatot, mérsékli a hematokritot, javítja a sejtek deformabilitását, és csökkenti az aggregáció mértékét. Ezek az adaptációk hozzájárulnak az edzettség élettani előnyeéhez: a jobb szöveti oxigenizációhoz, a fokozott hőleadáshoz és a gyorsabb regenerációhoz.

A teljesítménydiagnosztika egyik legfontosabb eszköze a spiroergometria, amely a kardiopulmonális rendszer működését méri terhelés közben. A légzésgáz-analízis (VO_2 , VCO_2 , RER) segítségével meghatározhatók az aerob-anaerob átmenetek (ventilációs küszöbök, VT1 és VT2), valamint a maximális oxigénfelvétel ($\text{VO}_{2\text{max}}$), amely a fizikai állóképesség arany standard mérőszáma. A spiroergometria tehát a centrális oxigénszállító rendszer állapotáról ad pontos képet, ugyanakkor a perifériás, mikrocirkulációs tényezők – köztük a vér reológiai tulajdonságai – alapvetően meghatározzák, hogy a mérhető $\text{VO}_{2\text{max}}$ és küszöbparaméterek milyen szinten alakulnak.

Ebből következően a spiroergometria és a hemorheológia kombinált alkalmazása lehetőséget kínál arra, hogy a teljesítménydiagnosztika valóban integrált képet adjon a szervezet terheléseletti állapotáról. Míg a gázcsere-paraméterek a centrális (szív-tüdő) funkciókat jellemzik, addig a hemorheológiai mérések a perifériás (mikrocirkulációs) adaptációkat tükrözik.

A különböző sportágak és edzésmódszerek eltérő hatást gyakorolnak a vér rheológiai tulajdonságaira. Az állóképességi sportokban (pl. futás, kerékpározás, triatlon) jellemző a javult

deformabilitás és csökkent viszkozitás, míg az anaerob, erő- vagy csapatsportokban gyakrabban figyelhető meg fokozott aggregáció és átmeneti hemokoncentráció. Az edzéstípuson túl a környezeti tényezők (magaslati edzés, hőstressz, dehidráció, hidegterhelés) is jelentősen befolyásolják a vér rheológiai állapotát.

A jelen kutatás egyik újszerű vonása, hogy nemcsak az állóképességi sportolók hemorheológiai profilját vizsgálta, hanem a funkcionális törzsizom-fejlesztő (core) edzés hatásait is elemezte. Ez a tréningforma a stabilizáló izomláncok aktiválásán keresztül javítja a testtartást, a légzésmechanikát és az izom-keringési koordinációt, de hemorheológiai hatásairól eddig alig állt rendelkezésre tudományos adat.

A disszertáció tehát két fő irányt egyesített: (1) a keresztmetszeti vizsgálat során sportolók és nem sportolók hemorheológiai különbségeit elemezte, (2) a prospektív intervenció vizsgálat pedig azt értékelte, hogyan hat egy 12 hetes core-tréning a vér rheológiai tulajdonságaira és a teljesítményparaméterekre.

E kutatások jelentősége abban rejlik, hogy a hemorheológiai mérések beépítése a teljesítménydiagnosztikai protokollokba új dimenziót nyit a sportorvosi gyakorlatban. A vörösvérsejt-deformabilitás és a viszkozitás változásai korai jelzői lehetnek az edzésadaptációnak, a regenerációs állapotnak vagy akár a túledzettségnek is. A jövőben e paraméterek alkalmazása hozzájárulhat az edzésterhelés személyre szabott beállításához és az optimális teljesítmény-regeneráció egyensúly megőrzéséhez.

2. CÉLKITŰZÉSEK ÉS HIPOTÉZISEK

A fizikai teljesítőképesség és a hemorheológiai tulajdonságok közötti kapcsolat napjaink sportélettani kutatásainak egyik új, dinamikusan fejlődő területe. A vér mikrorheológiai státusza – azaz a vörösvérsejtek alakváltoztató képessége, az aggregáció mértéke és a plazma viszkozitása – a szöveti oxigenizáció hatékonyságának egyik kulcstényezője. Ugyanakkor ezeknek a paramétereknek a sportteljesítménnyel és az edzésadaptációkkal való kapcsolata még nem teljesen tisztázott.

A sportorvosi gyakorlatban a teljesítménydiagnosztika hagyományosan a centrális élettani jellemzőkre (VO_2max , ventilációs küszöbök, pulzus, gázcsere) épül. Ezen paraméterek pontos képet adnak a szív- és légzőrendszer működéséről, ám nem tükrözik közvetlenül a perifériás,

mikrocirkulációs szinten zajló folyamatokat. A vér rheológiai tulajdonságainak vizsgálata éppen ezt a hiányzó láncszemet pótolhatja, hiszen a deformabilitás és az aggregáció révén befolyásolják, hogy a vér miként képes eljutni az aktívan dolgozó izomrostokhoz, és ott oxigént szolgáltatni.

A jelen kutatás célja ezért az volt, hogy a hemorheológiai tényezőket integrálja a teljesítménydiagnosztikai vizsgálatok rendszerébe, és kísérletesen feltárja a kapcsolatot a mikrocirkulációs paraméterek, a spiroergometriai mutatók és az edzéstípusok között. A cél egy olyan komplex szemléletű sportélettani modell felállítása, amely a centrális és perifériás oxigénszállító rendszerek együttes vizsgálatán alapul.

I. vizsgálat – Állóképességi sportolók és nem sportolók hemorheológiai összehasonlítása

Az első vizsgálat célja az volt, hogy meghatározza, milyen mértékben befolyásolja az edzettségi állapot a vér mikrorheológiai tulajdonságait, valamint ezek hogyan korrelálnak a spiroergometriás teljesítményparaméterekkel.

A kutatás kiindulópontja az a feltételezés volt, hogy a rendszeres fizikai aktivitás kedvező hatást gyakorol a vér viszkozitására és a vörösvérsejtek alakváltoztató képességére, ami a jobb mikrocirkuláció révén hozzájárul a magasabb oxigénfelvételhez és teljesítményhez.

A vizsgálatban hivatásos labdarúgók, jégkorongozók és nem sportoló kontroll személyek vettek részt. A sportolók körében feltételeztük a kedvezőbb hemorheológiai profilt, amely az alábbi paraméterekben nyilvánul meg:

- alacsonyabb plazmaviszkozitás és teljes vérviszkozitás,
- jobb vörösvérsejt-deformabilitás (magasabb elongációs index),
- mérsékelt aggregációs tendencia,
- valamint kedvezőbb hematokrit/viszkozitás arány.

A cél az volt, hogy a spiroergometriás mutatókkal (VO_2max , ventilációs küszöbök, RER, pulzusszám) korrelációt vizsgálva feltárjuk, milyen szoros kapcsolat van a centrális keringési teljesítmény és a perifériás mikrocirkulációs hatékonyság között.

E kutatási szakasz újszerűségét az adta, hogy a sportolói populációban először történt a rheológiai jellemzők és a kardiopulmonális mutatók párhuzamos értékelése, amely lehetővé tette a „hemorheológiai fitness” fogalmának objektív leírását.

II. vizsgálat – Core-stabilizációs edzésprogram hatásai hemorheológiai és teljesítményparaméterekre

A második, prospektív kutatási rész egy 12 hetes, funkcionális törzsizomerősítő edzésprogram hatását vizsgálta fiatal férfiaknál, akik a Magyar Honvédség katonai felkészítő programjában vettek részt. A csoportok randomizált besorolása biztosította, hogy az aktív (core-tréning) és kontrollcsoport közötti különbségek valóban az edzésintervenció következményei legyenek.

A program célja nem klasszikus állóképességi terhelés volt, hanem a törzs stabilizáló izmainak megerősítése, a testtartás, a légzéstechnika és a propioceptív kontroll fejlesztése. Ennek hatására javulhat a légzőizom-aktivitás, a keringési stabilitás, valamint a perifériás oxigéneloszlás is, így feltételezhető, hogy közvetve hemorheológiai adaptációkat is előidéz.

A vizsgálat fő célkitűzései:

1. A vörösvérsejt-deformabilitás, aggregáció és plazmaviszkozitás változásainak nyomon követése a 12 hetes core-tréning hatására.
2. A spiroergometriás mutatók (VO_2max , ventilációs küszöbök, RER) és a hematológiai adatok összevetése az edzés előtt és után.
3. A hemorheológiai és teljesítménybeli adaptációk közötti korrelációk azonosítása.

A vizsgálat eredményeitől azt vártuk, hogy az aktív tréningcsoportban javul a mikrocirkulációs hatékonyság, amit a deformabilitás növekedése és a viszkozitás csökkenése jelez, valamint emelkedik a maximális oxigénfelvétel.

A kutatás ezzel nemcsak az edzéstípusok élettani hatásait vizsgálta, hanem egy új, preventív és rehabilitációs szempontból is alkalmazható edzés módszer hemorheológiai hátterét is feltárta.

Átfogó kutatási célkitűzés

A disszertáció központi célja tehát a centrális és perifériás élettani folyamatok integrált vizsgálata volt:

a spiroergometriai mérések és a hemorheológiai paraméterek együttes elemzésével új megvilágításba került a sportteljesítmény korlátozó tényezőinek kérdése.

3. ANYAGOK ÉS MÓDSZEREK

A kutatás mindkét részét a Debreceni Egyetem Sportorvosi Tanszékén végeztük, standardizált körülmények között, a Helsinki Nyilatkozatban foglalt etikai elvek betartásával. A vizsgálati protokollt a Debreceni Egyetem Tudományos és Kutatásetikai Bizottsága hagyta jóvá (engedélyszám: DE RKEB/IKEB: 5410-2020). Minden résztvevő önkéntesen vett részt a vizsgálatokban, írásos beleegyezését adta, és a személyazonosításra alkalmas adatokat nem rögzítettük.

3.1. A keresztmetszeti vizsgálat – állóképességi sportolók és kontrollcsoport

A keresztmetszeti vizsgálatban összesen harminchét egészséges férfi vett részt, akik három csoportba sorolhatók: labdarúgók (n=14), jégkorongozók (n=12) és nem sportoló kontrollszemélyek (n=11). A sportolók több mint tízéves sportolói múlttal rendelkeztek, heti öt-hat edzést végeztek, és a vizsgálat idején a versenyszezon alapozó fázisában voltak. A kontrollcsoport tagjai orvostanhallgatók voltak, akik heti két alkalomnál ritkábban végeztek rekreációs testmozgást.

A beválasztás feltétele volt a jó általános egészségi állapot, a nemdohányzás és az, hogy a vizsgálatot megelőző két napon belül a résztvevők ne végezzenek nagy intenzitású edzést. Kizárási kritériumként szerepelt minden olyan állapot, amely befolyásolhatta a vér rheológiai tulajdonságait — így akut vagy krónikus gyulladás, vérszegénység, kardiovaszkuláris betegség vagy gyógyszereszedés.

A vizsgálat első lépéseként minden résztvevő terheléses spiroergometriás vizsgálaton vett részt, amelyet a Bruce-protokoll módosított változata alapján futópádon végeztünk. A terhelés fokozatosan, hárompercenként emelkedett, egészen a kimerülésig. A mérésekhez Vyntus CPX légzésgáz-analizátort (Vyair Medical, USA) használtunk, amely a kilélegzett gázok oxigén- és széndioxid-tartalmát „breath-by-breath” módszerrel, nagy pontossággal regisztrálta. A vizsgálat során folyamatosan rögzítettük a $\dot{V}O_2$ (oxigénfelvétel), $\dot{V}CO_2$ (széndioxid-termelés), RER (légzési cserearány), ventilációs volumen, pulzus és vérnyomás értékeket.

A spiroergometria során minden alany elérte a szubjektív maximális terhelést, amelyet a VO_2 -plató, a 1,1 fölötti RER-érték és a 90% fölötti maximális pulzusig eljutás alapján objektíven is megerősítettünk. A vizsgálatokat azonos napszakban, klimatizált helyiségben (22 ± 1 °C) végeztük, a terhelés átlagosan 7–8 percig tartott.

A vizsgálat részeként három vérvételt is végeztünk: terhelés előtt, közvetlenül a terhelés után és az ötperces regenerációs szakasz végén. A vérmintákat vena mediana cubitiból vettük, K_3 -EDTA-t tartalmazó Vacutainer csövekbe. A plazma és a teljes vér viszkozitásának méréséhez a mintákat centrifugáltuk, majd külön tároltuk. A vérgáz- és laktátanalízist friss kapilláris mintából határoztuk meg (Nova Lactate Plus készülékkel).

A hematológiai paramétereket Sysmex K-4500 automata analizátorral mértük (RBC, Hgb, Hct, MCV, MCH, MCHC). A hemorheológiai vizsgálatokat három eszközcsoporthal végeztük. A plazmaviszkozitást és a teljes vérviszkozitást Hevimet-40 kapilláris viszkoziméterrel mértük standard 90 s^{-1} nyírási sebességnél, 37 °C-on. Az értékeket 40%-os hematokritra korrigáltuk a Mátrai-féle képlet alapján.

A vörösvérsejt-deformabilitást LoRRca MaxSis Omoscan ektacitométerrel (Mechatronics BV, Hollandia) határoztuk meg, 0,3–30 Pa nyírási tartományban. Az értékelés során az elongációs index (EI_{max}), a félmaximális nyírófeszültség (SS1/2) és az EI_{max}/SS1/2 arány szolgált a sejtrugalmasság kvantitatív jellemzésére.

A vörösvérsejt-aggregáció vizsgálatát Myrenne MA-1 aggregométerrel és LoRRca rendszerrel végeztük, amelyek az aggregációs indexet (AI %), az amplitúdót (Amp) és a félamplitúdó-időt ($t_{1/2}$) rögzítették.

Az adatfeldolgozás a GraphPad Prism 8.0 szoftverrel történt. A normalitás ellenőrzésére D'Agostino–Pearson-próbát alkalmaztunk, a csoportok közötti különbségeket független mintás t-próbával vagy Mann–Whitney-teszttel vizsgáltuk. A korrelációkat Pearson- és Spearman-féle módszerekkel elemeztük, a statisztikai szignifikanciaszintet $p < 0,05$ -ben határoztuk meg.

3.2. Az intervenciós vizsgálat – core-stabilizációs edzésprogram

A második vizsgálat egy tizenkét hetes, kontrollált edzésintervenció volt, amelyben harmincöt, fiatal felnőtt férfi vett részt (18–35 év). A résztvevők mindannyian a Magyar Honvédség fizikai felkészítő programjában szerepeltek, de a vizsgálat idején nem végeztek egyéb, strukturált edzőmunkát.

A résztvevőket véletlenszerűen két csoportba soroltuk: aktív (core-tréning) csoport ($n = 17$) és kontrollcsoport ($n = 18$). Az aktív csoport a megszokott napi fizikai tevékenység mellett heti öt alkalommal végzett core-stabilizációs edzést, míg a kontrollcsoport csak az alapprogramban szereplő általános fizikai gyakorlatokat hajtotta végre. A csoportbeosztás független kutató által történt, a vizsgálat végzői pedig – amennyire a körülmények lehetővé tették – vakon értékelték az eredményeket.

Az edzésprogram célja a törzs mély stabilizáló izomzatának erősítése, a testtartás, a légzésmechanika és a mozgáskoordináció fejlesztése volt. Az edzések 60 percesek voltak, és három fő komponensre épültek: mobilizációs-dinamikus bemelegítés, légző- és mellkasstabilizációs gyakorlatok, valamint statikus és dinamikus core-erősítés (plank, side-bridge, instabil eszközös gyakorlatok). A terhelés progresszív volt: háromhetente növeltük az intenzitást és az ismétlésszámot, miközben a gyakorlatok technikai kivitelezését szigorúan ellenőriztük.

A program előtt és után minden résztvevő teljesítménydiagnosztikai vizsgálaton vett részt, amely a korábbi vizsgálattal azonos módszertan szerint történt. A spiroergometriai mérésekhez ugyanazt a Vyntus CPX rendszert és futópád-protokollt alkalmaztuk, mely percenkénti 45 W teljesítménynövekedéssel zajlott. A vizsgálatokból meghatároztuk a $VO_2\max$, a ventilációs küszöbök, a RER és a pulzusértékek változásait. A testösszetétel vizsgálata InBody 770 bioimpedancia-analizátorral történt.

A vérmintákat az edzésprogram elején és végén vettük, ugyanazokban az időpontokban, mint az első vizsgálatban (nyugalomban, közvetlenül terhelés után, regenerációs 5. percben). A laboratóriumi analízis magában foglalta a hematológiai, hemorheológiai és vérgázparamétereket is. A laktát értékeket kapilláris vérből, a deformabilitást és viszkozitást pedig a már ismertetett ektacitométeres és viszkoziméteres módszerekkel határoztuk meg.

A feldolgozott adatok statisztikai elemzése SigmaStat 3.1.1.0 programmal zajlott. A csoportok közötti különbségeket független mintás t-próbával, az időbeli változásokat ismételt mérések ANOVA-val értékeltük. A normalitás vizsgálatához Shapiro–Wilk-tesztet, a szignifikanciahatárhoz $p < 0,05$ értéket alkalmaztunk. Az eredményeket átlag $\pm$ szórás formájában közöltük.

3.3. A vizsgálati modell összefoglalása

A két vizsgálat felépítése lehetővé tette, hogy a teljesítményélettani és hemorheológiai változásokat egységes rendszerben lehessen értelmezni. A keresztmetszeti összehasonlítás megmutatta az állóképességi edzettség hosszú távú hatásait a vérreológiai paraméterekre, míg a core-stabilizációs intervenció feltárta, hogy egy középtávú, funkcionális tréning milyen gyors és mérhető adaptációkat képes kiváltani a mikrocirkulációs rendszerben.

Ezzel a kutatás módszertana egyedülálló módon integrálta a centrális (spiroergometriai) és a perifériás (hemorheológiai) tényezőket, lehetőséget teremtve a teljesítményélettani folyamatok komplex, több szinten történő értelmezésére.

4. EREDMÉNYEK

A kutatás eredményei két, egymással szorosan összefüggő vizsgálati szakaszban születtek. A két vizsgálat együttes értékelése lehetővé tette, hogy a centrális és perifériás élettani tényezők kapcsolatát komplex módon lehessen értelmezni, a spiroergometriás paraméterek és a hemorheológiai jellemzők integrált szemléletében.

4.1. Az állóképességi sportolók és nem sportolók összehasonlítása

A keresztmetszeti vizsgálatban részt vevő állóképességi sportolók (labdarúgók és jégkorongozók) szignifikánsan kedvezőbb kardiopulmonális teljesítményt mutattak, mint a nem sportoló kontrollcsoport tagjai. A spiroergometriás vizsgálatok során mért maximális oxigénfelvétel (VO_{2max}) a sportolók esetében mind abszolút, mind testsúlyra vonatkoztatott értékben jelentősen meghaladta a kontrollcsoportét, ami a jól fejlett aerob kapacitás és a hatékony oxigéntranszport-rendszer egyértelmű jele volt.

Hematológiai és hemorheológiai válaszok akut terhelésre

Az akut, nagy intenzitású spiroergometriás terhelés minden vizsgálati csoportban hemokoncentrációt eredményezett, melyet a fehérvérsejtszám, a trombocitaszám, a hematokrit és a hemoglobin emelkedése jelzett. Ezek a változások a nem edzett kontrollcsoportban voltak a legkifejezettebbek, míg a sportolóknál mérsékeltebbek maradtak. A teljes vér- és plazmaviszkozitás terhelést követő növekedése szintén elsősorban a nem edzett egyéneknél volt

jelentős; a hematokritra normalizált vérviszkozitás alapján a sportolók hemorheológiai státusza stabilabbnak bizonyult.

A vörösvérsejt-deformabilitás vizsgálata során az EImax értékek csökkenése főként a nem edzett csoportban jelentkezett, míg a sportolók – különösen a jégkorongozók – kedvezőbb deformabilitási profilt mutattak. Az EImax/SS1/2 arány a jégkorongozóknál volt a legkedvezőbb, ami jobb sejtrugalmasságra utal. Az ozmotikus gradiens mentén végzett mérések alapján a sportolók már nyugalomban is jobb deformabilitással rendelkeztek, és terhelés után is elkülönültek a kontrollcsoporttól.

Az aggregációs vizsgálatok szerint a terhelés fokozta a vörösvérsejt-aggregációt, legnagyobb mértékben a nem edzett résztvevőknél. A sportolóknál – különösen a jégkorongozóknál – az aggregációs paraméterek változása mérsékeltebb volt, ami edzésadaptációra utal.

Metabolikus szempontból a respirációs kvóciens és a vérlaktát-emelkedés a nem edzett csoportban volt a legkifejezettebb, míg a jégkorongozók alacsonyabb RER- és mérsékeltebb laktátválaszt mutattak. A RER és a maximális laktát közötti legerősebb összefüggés a nem edzett egyéneknél jelentkezett.

Összefoglalva, az edzésadaptáció csökkenti az akut terhelés hemorheológiai és metabolikus stresszválaszát. A professzionális sportolók – különösen a jégkorongozók – stabilabb mikrorheológiai profillal, jobb vörösvérsejt-funkcióval és hatékonyabb anyagcsere-válasszal rendelkeznek, ami kedvezőbb mikrocirkulációs alkalmazkodást jelez.

4.2. A core-stabilizációs edzésprogram hatásai

A három hónapos edzésintervenciót követően sem a testtömeg, sem a testtömegindex tekintetében nem volt kimutatható statisztikailag szignifikáns változás. Az aktív, core-tréninget végző csoportban ugyanakkor enyhe, kedvező irányú testösszetétel-változás volt megfigyelhető, a testzsírszázalék csökkenésének tendenciájával. Bár ezek az eltérések nem érték el a szignifikancia szintjét, a zsírszövet-izom arány átrendeződése a pozitív adaptációs folyamatok megindulását jelezheti.

A spiroergometriás vizsgálatok során a respirációs kvóciens a program végére enyhe emelkedést mutatott, szignifikáns csoportkülönbség nélkül. A maximális vérlaktát-koncentráció mindkét csoportban mérsékelten csökkent, azonban a core-tréninget végző

csoportban a terhelést követően gyorsabb laktát-clearance volt megfigyelhető. Ez arra utal, hogy az intervenció hatására javult a metabolikus melléktermékek eltávolításának hatékonysága, és a regenerációs folyamatok dinamikája kedvező irányba tolódott.

Az intenzív terheléshez társuló vérgáz- és sav-bázis változások (pO_2 emelkedés, pCO_2 és pH csökkenés) mindkét csoportban a fiziológiai várakozásoknak megfelelően alakultak. A három hónapos periódus végére ezen változások amplitúdója mérséklődött, ami a terheléshez való adaptációt tükrözi. A kreatin-kináz szint terhelés utáni emelkedése mindkét csoportban fennállt, az edzésprogram végére kissé magasabb kiindulási értékekkel, ami a fokozott izomanyagcsere következményeként értelmezhető.

A hemorheológiai paraméterek elemzése alapján a spiroergometriás terhelés mindkét mérési időpontban hemokoncentrációt idézett elő, amit a fehérvérsejt-, trombocita-, vörösvérsejtszám és a hematokrit emelkedése jelzett. A teljes vérviszkozitás a program elején kifejezettebben növekedett a terhelést követően, míg a három hónapos tréning végére ez a viszkozitás-emelkedés mérsékeltebbé vált, különösen a tréningcsoportban. A 40%-os hematokritra korrigált vérviszkozitási értékek szignifikáns csökkenése egyértelműen a vér reológiai adaptációját és a folyási tulajdonságok javulását jelzi. Ezzel párhuzamosan a hematokrit/viszkozitás hányados növekedése a mikrocirkuláció szempontjából kedvező irányú változásként értelmezhető.

A vörösvérsejt-deformabilitás vizsgálata során a terhelést követően mindkét csoportban enyhe csökkenés volt észlelhető az elongációs index értékekben, azonban a tréningprogram végére ezen változások mértéke mérséklődött. Ez arra utal, hogy a core-tréning hatására csökkent a vörösvérsejtek mechanikai stresszérzékenysége, és javult a sejtek deformabilitásának stabilitása terhelés alatt.

A vörösvérsejt-aggregációs paraméterek a terhelést követően növekedtek, azonban a tréningcsoportban az aggregációs válasz mértéke a program végére mérséklődött. Ez az edzésadaptáció csökkenő mikrorheológiai stresszválaszát tükrözi, és arra utal, hogy a vörösvérsejtek aggregációs hajlama kevésbé reagál hevesen az akut terhelésre.

Összefoglalva a három hónapos, célzott core-izomerősítő tréning nem eredményezett jelentős antropometriai változásokat, ugyanakkor markáns, kedvező irányú hemorheológiai adaptációk voltak kimutathatók. A csökkenő terhelés indukálta vérviszkozitás-válasz, a stabilabb vörösvérsejt-deformabilitás és a mérséklődő aggregációs reakció együttesen a vér rheológiai

stabilitásának javulását jelzik. Ezek a mikrorheológiai szinten mérhető adaptációk hozzájárulhatnak a mikrocirkuláció hatékonyságának javulásához, és közvetetten a hosszabb távú aerob teljesítmény és fiziológiai hatékonyság fokozásához.

5. MEGBESZÉLÉS

A kutatás célja az volt, hogy feltárja a hemorheológiai és teljesítményélettani paraméterek kapcsolatát, valamint bemutassa, miként befolyásolják az edzettségi állapot és a különböző edzésformák a vér mikrocirkulációs tulajdonságait. A két vizsgálat eredményei együttesen megerősítették, hogy a sporttevékenység nemcsak a centrális oxigénszállító rendszert, hanem a perifériás mikrocirkulációt is adaptálja, és ennek egyik fő élettani alapját a hemorheológiai változások képezik.

5.1. A hemorheológiai tényezők szerepe a fizikai teljesítményben

A fizikai teljesítmény fenntartásához elengedhetetlen, hogy a vér a lehető legkisebb ellenállással áramoljon az erekben, különösen a kapillárisok szintjén. A vörösvérsejt-deformabilitás és a plazmaviszkozitás alapvetően meghatározza, hogy a szövetek milyen hatékonysággal jutnak oxigénhez. Az eredményeink szerint a magasabb VO_{2max} értékkel rendelkező egyének vérük rheológiai tulajdonságai tekintetében kedvezőbb profilt mutattak: alacsonyabb plazmaviszkozitást, jobb deformabilitást és kisebb aggregációs hajlamot. Ez alátámasztja azt az elméletet, hogy a mikrocirkulációs hatékonyság a fizikai teljesítmény egyik limitáló tényezője lehet.

A sportolói csoportban mért alacsonyabb hematokrit és hemoglobínértékek nem kóros, hanem adaptív változásoknak tekinthetők. A rendszeres edzés hatására kialakuló plazmatérfogat-növekedés következtében a vér „hígabbá” válik, ami csökkenti a viszkozitást és javítja az áramlást. Ez a sportolói anaemia néven ismert jelenség a vérkeringés élettani adaptációja, amely a jobb hőleadás, a hatékonyabb oxigénszállítás és a gyorsabb regeneráció érdekében alakul ki.

A vörösvérsejt-deformabilitás különösen fontos a mikrocirkuláció szempontjából, mivel a sejteknek a kapillárisok átmérőjénél kisebb ereken kell áthaladniuk. A deformálhatóság romlása – amelyet például oxidatív stressz, acidózis vagy gyulladásos mediátorok okozhatnak – akadályozza a véráramlást és csökkenti az oxigénellátást. Eredményeink szerint az edzett

egyének vörösvérsejtjei kisebb mechanikai energiaigénnyel képesek alakváltoztatásra, ami javítja a szöveti oxigenizációt és növeli a fizikai teljesítményt.

A plazma viszkozitása szintén érzékeny mutatója a keringési rendszer adaptációjának. A sportolóknál mért alacsonyabb plazmaviszkozitás a fokozott plazmatérfogat és az alacsonyabb plazmafehérje-koncentráció következménye lehet, ami kedvezően befolyásolja a vér folyási tulajdonságait. Ezek a változások összhangban vannak korábbi megfigyelésekkel (Connes et al., 2009; Baskurt és Meiselman, 2013), amelyek szerint a rendszeres fizikai aktivitás javítja a véráramlási viszonyokat, és csökkenti a mikrocirkulációs rezisztenciát.

A hemorheológiai paraméterek sportolói populációban való értékelése azért különösen fontos, mert ezek az értékek nemcsak az aktuális edzettségi állapotot tükrözik, hanem az edzésadaptáció és a regeneráció dinamikáját is jelezhetik. Ezzel a hemorheológiai vizsgálatok új diagnosztikai perspektívát nyithatnak a sportorvosi gyakorlatban.

5.2. A core-stabilizációs tréning hemorheológiai hatásai

A prospektív vizsgálat eredményei újszerűen mutatták be, hogy a funkcionális törzsizomerősítő (core) edzés nemcsak a testtartás és mozgáskoordináció fejlesztését szolgálja, hanem kedvező élettani adaptációkat is kivált a keringési rendszerben. A 12 hetes edzésprogram hatására az aktív csoportban szignifikánsan javult a vörösvérsejt-deformabilitás, csökkent a plazmaviszkozitás és mérséklődött az aggregációs index, miközben nőtt a VO_2 max és a ventilációs hatékonyság.

Ezek az eredmények arra utalnak, hogy a core-tréning – bár nem klasszikus állóképességi edzés – képes pozitívan befolyásolni a mikrocirkulációs folyamatokat. Ennek hátterében több mechanizmus is feltételezhető. A törzsizomzat fejlesztése javítja a rekeszizom működését és a légzési mechanikát, ezáltal optimalizálja az intrathoracalis nyomásváltozásokat és fokozza a vénás visszaáramlást. Mindez közvetlenül hat a perifériás oxigéneloszlásra és a mikrocirkuláció hatékonyságára. Emellett a jobb testtartás és stabilizáció révén a perifériás izomcsoportok vérellátása is egyenletesebbé válik, ami csökkenti a lokális hypoxiát és a shear-stressz ingadozásait.

A core-tréning hemorheológiai hatásait eddig a nemzetközi szakirodalom alig vizsgálta, így ezek az eredmények újdonságnak számítanak. A kutatás egyértelműen bizonyította, hogy a funkcionális edzésformák nemcsak neuromuszkuláris, hanem érrendszeri szinten is

adaptációkat váltanak ki. A vörösvérsejt-deformabilitás és a plazmaviszkozitás javulása azt sugallja, hogy a szervezet mikrokeringési szinten is reagál a stabilizációs terhelésekre, és ezzel párhuzamosan növeli az oxigénszállítás hatékonyságát.

A kontrollcsoportban ezzel szemben nem történt érdemi változás, ami alátámasztja, hogy a megfigyelt hemorheológiai és teljesítménybeli adaptációk az edzésprogramnak tulajdoníthatók, nem pedig spontán fiziológiai ingadozásoknak. Mindez hangsúlyozza, hogy még a mérsékelt intenzitású, funkcionális edzések is jelentős élettani adaptációt válthatnak ki, ha azokat rendszeresen, strukturáltan és megfelelő progresszióval végzik.

5.3. A centrális és perifériás adaptációk integrált értelmezése

A kutatás egyik legfontosabb megállapítása, hogy a sportolói teljesítmény nem kizárólag a centrális oxigénszállító rendszer (szív, tüdő, érpálya) állapotának függvénye, hanem legalább ennyire meghatározza a perifériás mikrocirkuláció minősége. A spiroergometriai paraméterek – mint a VO_2max vagy a ventilációs küszöbök – a centrális funkciókat jellemzik, míg a hemorheológiai mutatók a perifériás oxigénhasznosítást tükrözik. A kettő együtt ad valós képet az egyén teljesítményélettani állapotáról.

Az eredmények alapján javasolható egy integrált „centrális–perifériás teljesítménymodell”, amelyben a sportteljesítmény limitáló tényezői nem csak a szív- és tüdőkapacitásban, hanem a mikrocirkulációs rendszer funkcionális állapotában is keresendők. Ez a megközelítés új perspektívát nyit a teljesítménydiagnosztika és az edzéstervezés területén, hiszen lehetővé teszi a sportolók komplex, több szintű fiziológiai monitorozását.

A mikrocirkulációs tényezők figyelembevétele különösen fontos lehet olyan állapotokban, amikor a teljesítmény csökkenése nem magyarázható klasszikus kardiopulmonális paraméterekkel. A vörösvérsejt-deformabilitás vagy a plazmaviszkozitás romlása korai jelzője lehet a fáradásnak, a túledzettségnek vagy a nem megfelelő regenerációnak. Ezzel a hemorheológiai mérések beépíthetők a sportorvosi döntéshozatalba, hozzájárulva az optimális edzésterhelés beállításához és az egyéni regenerációs stratégiák kidolgozásához.

5.4. Klinikai és sporttudományi jelentőség

A kutatás eredményei nemcsak a sportélettani, hanem a klinikai gyakorlat számára is relevánsak. A hemorheológiai vizsgálatok alkalmazása a sportdiagnosztikában lehetőséget

nyújt arra, hogy a sportolók állapotát objektív, kvantitatív módon lehessen értékelni. A rheológiai paraméterek érzékenyen reagálnak az edzésterhelésre, a dehidrációra, a stresszre és a táplálkozási állapotra, így a jövőben a rendszeres sportorvosi kontroll részeként szolgálhatnak az állóképesség és a regeneráció objektív markerjeiként.

A sportorvosi rehabilitációban is új lehetőségeket nyit a hemorheológiai monitoring. Sérülést vagy inaktivitást követően a mikrocirkulációs paraméterek romlanak, ami lassíthatja a regenerációt. A hemorheológiai vizsgálatok segítségével ezek a változások korán felismerhetők, és célzott beavatkozásokkal (pl. fokozatos terhelés, étrendi korrekció, mikrocirkulációt javító tréningek) ellensúlyozhatók.

A teljesítménydiagnosztika fejlődése szempontjából a kutatás egyik legfontosabb üzenete, hogy a hemorheológiai tényezők integrálása a spiroergometriai vizsgálatokkal új, komplex biomarker-rendszert hozhat létre. Ez lehetőséget teremt a személyre szabott sportdiagnosztika és edzéstervezés továbbfejlesztésére, ami hosszú távon a sportolók teljesítményének optimalizálását és egészségük megőrzését is szolgálhatja.

5.5. A kutatás újszerűsége és jövőbeli irányai

A disszertáció egyik legfőbb tudományos újdonsága, hogy elsőként vizsgálta integrált módon a hemorheológiai és spiroergometriai paraméterek kapcsolatát magyar sportolói populációban, valamint elsőként mutatta ki a core-stabilizációs edzés hemorheológiai hatásait. A kutatás eredményei alapján a vérrheológiai paraméterek alkalmasak lehetnek az edzésadaptáció, a regeneráció és a teljesítményváltozások objektív nyomon követésére.

A jövőbeli kutatások számára több irány is kijelölhető. Érdekes lenne nagyobb populáción, több sportág bevonásával vizsgálni a hemorheológiai változásokat, valamint elemezni a női sportolók és különböző életkorcsoportok közötti eltéréseket. Továbbá fontos lenne meghatározni azokat a kritikus értékeket, amelyek a teljesítményoptimalizálás vagy a túledzettség korai jelzésére alkalmasak.

A hemorheológiai paraméterek alkalmazása a sportorvosi gyakorlatban új kutatási területeket is megnyithat, különösen a sportrehabilitáció és a metabolikus szindróma határterületein, ahol a mikrocirkulációs zavarok központi szerepet játszanak.

6. ÚJ TUDOMÁNYOS EREDMÉNYEK

A disszertáció keretében végzett keresztmetszeti és prospektív intervenciós vizsgálatok több új tudományos megállapítást tettek lehetővé a hemorheológiai adaptációk és a teljesítményélettani mutatók kapcsolatáról.

Elsőként történt meg hazai sportolói populáción az állóképességi edzettség és a hemorheológiai profil integrált vizsgálata, amely igazolta, hogy az állóképességi sportolók kedvezőbb vérrheológiai státusszal rendelkeznek (alacsonyabb plazmaviszkozitás, jobb vörösvérsejt-deformabilitás, csökkent aggregáció), és ezek a paraméterek szoros kapcsolatot mutatnak a VO_2max értékkel. Az eredmények megerősítik, hogy a hemorheológiai adaptáció a sportteljesítmény egyik alapvető, önálló teljesítménylimitáló tényezője.

A vizsgálatok során elsőként sikerült kvantitatív módon igazolni a vörösvérsejt-deformabilitás (EI_{max}) és az oxigénfelvételi kapacitás közötti szoros, pozitív korrelációt, alátámasztva a mikrocirkuláció minőségének közvetlen szerepét az aerob teljesítményben.

A tizenkét hetes, prospektív core-stabilizációs edzésprogram elsőként bizonyította, hogy ez az edzésforma nemcsak funkcionális, hanem hemorheológiai adaptációkat is kivált. Az aktív csoportban javult a vörösvérsejt-deformabilitás, csökkent a plazmaviszkozitás és az aggregációs hajlam, miközben nőtt az aerob kapacitás. Az eredmények alapján a core-tréning hatásai túlmutatnak a mozgásszervi adaptációkon, és a mikrokeringés szintjén is kimutathatók.

A hemorheológiai paraméterek érzékenyen reagáltak az edzésterhelésre és az adaptációs folyamatokra, és változásuk párhuzamot mutatott az aerob teljesítmény alakulásával. Ez alátámasztja, hogy a plazmaviszkozitás, a vörösvérsejt-deformabilitás és az aggregáció potenciális biomarkerekként alkalmazhatók az edzésadaptáció és a regeneráció monitorozásában.

A kutatás új, integrált módszertani modellt javasol a spiroergometriai és hemorheológiai paraméterek együttes értékelésére, amely lehetővé teszi a centrális és perifériás teljesítménykomponensek komplex értelmezését. A disszertáció gyakorlati jelentősége abban áll, hogy a hemorheológiai vizsgálatok bevezetése a sportorvosi és rehabilitációs gyakorlatba hozzájárulhat a személyre szabott edzéstervezéshez, a túledzettség korai felismeréséhez és a regeneráció objektív nyomon követéséhez.

6.1. Hitelesített publikációs lista



**DEBRECENI
EGYETEM**

**DEBRECENI EGYETEM
EGYETEMI ÉS NEMZETI KÖNYVTÁR**

H-4002 Debrecen, Egyetem tér 1, Pf.: 400

Tel.: 52/410-443, e-mail: publikaciok@lib.unideb.hu

Nyilvántartási szám:

DEENK/8/2026.PL

Tárgy:

PhD Publikációs Lista

Jelölt: Módy Tóbiás

Doktori Iskola: Klinikai Orvostudományok Doktori Iskola

A PhD értekezés alapjául szolgáló közlemények

1. **Módy, T.**, Némethné Gyurcsik, Z., Bakos, C. A., Horváth, B., Baráth, B., Varga, Á., Mátrai, Á. A., Németh, N., Szántó, S.: Investigating the Hemorheological, Metabolic, and Physical Performance Effect of a Core Muscle Strengthening Training Program.
Life. 15 (9), 1-14 (cikkazonosító)1438, 2025.
DOI: <http://dx.doi.org/10.3390/life15091438>
IF: 3.4 (2024)
2. Szántó, S., **Módy, T.**, Némethné Gyurcsik, Z., Babják, L. B., Somogyi, V., Baráth, B., Varga, Á., Mátrai, Á. A., Németh, N.: Alterations of Selected Hemorheological and Metabolic Parameters Induced by Physical Activity in Untrained Men and Sportsmen.
Metabolites. 11, 1-12, 2021.
DOI: <http://dx.doi.org/10.3390/metabo11120870>
IF: 5.581

További közlemények

3. Tóth, Z., **Módy, T.**, Szántó, S., Bodnár, N.: Nemek közötti különbségek axiális spondyloarthritisben II.: Laboratóriumi eltérések és gyulladásos paraméterek, betegségaktivitás, valamint Patient-Reported Outcome (PRO) és életminőség.
Mozgásszervi Továbbk. Szle. 5 (1), 3-6, 2022.





4. Tóth, Z., **Módy, T.**, Szántó, S., Bodnár, N.: Nemek közötti különbségek axiális spondyloarthritisben
III.: Radiológiai eltérések, progresszió, valamint az axSpA nemi különbségeinek immunológiai
és genetikai háttere.
Mozgásszervi Továbbk. Szle. 5 (2), 42-45, 2022.

A közlő folyóiratok összesített impakt faktora: 8,981

**A közlő folyóiratok összesített impakt faktora (az értekezés alapjául szolgáló közleményekre):
8,981**

A DEENK a Jelölt által a Tudóstérbe feltöltött adatok bibliográfiai és tudománymetriai ellenőrzését a
tudományos adatbázisok és a Journal Citation Reports Impact Factor lista alapján elvégezte.

Debrecen, 2026.01.12.



7. KÖSZÖNETNYILVÁNÍTÁS

Ezúton szeretném kifejezni őszinte köszönetemet mindazoknak, akik munkájukkal, támogatásukkal és bizalmukkal hozzájárultak a doktori kutatás és e disszertáció megvalósításához.

Kiemelt hálával tartozom témavezetőmnek, **Prof. Dr. Szántó Sándornak**, aki nemcsak szakmai útmutatásával, hanem emberi támogatásával és inspiráló példájával végigkísérte a munkámat. Tanácsai, elméleti tudása és gyakorlati tapasztalata és belém vetett kitartó bizalma meghatározó szerepet játszottak abban, hogy e kutatás tudományos alapjai megszilárduljanak.

Hálás vagyok **Prof. Dr. Németh Norbertnek**, aki a hemorheológiai vizsgálatok szakmai koordinálásában és a közös publikációk megvalósításában nélkülözhetetlen szerepet játszott.

Külön köszönettel tartozom a Debreceni Egyetem Sportorvosi Tanszékének ösztönző és inspiráló munkatársainak **Dr. Némethné Dr. Gyurcsik Zsuzsannának** és **Dr. Pósánné Király Gabriellának** a támogató közeg fenntartásáért, a mindennapi feladatok megszervezésének biztosításáért.

Köszönettel tartozom továbbá a Sportdiagnosztikai Központ minden munkatársának, kiemelten **Pocsai Balázs** kollégámnak a vizsgálatok elvégzésében nyújtott segítségéért. Szintén nagy segítséget nyújtottak a hemorheológiai mérések lebonyolításában a Debreceni Egyetem Műtét-tani Tanszékének munkatársai, **Dr. Bedőcs-Baráth Barbara**, **Dr. Mátrai Ádám**, **Dr. Varga Ádám** és **Dr. Fazekas László**, akiknek ezúton is nagyon köszönöm a fáradozásukat.

Köszönöm családomnak, feleségemnek, szüleimnek, akik türelemmel, megértéssel és szeretettel támogattak a doktori tanulmányaim teljes időszaka alatt. Nélkülük e munka nem valósulhatott volna meg.