

**DOKTORI (PhD) ÉRTEKEZÉS**

**Dr. Módy Tóbiás**

**A hemorheológiai és sportélettani paraméterek integrált vizsgálata a teljesítménydiagnosztikában**

**DEBRECENI EGYETEM**

**KLINIKAI ORVOSTUDOMÁNYOK DOKTORI ISKOLA**

**Debrecen, 2026**

**DOKTORI (PhD) ÉRTEKEZÉS**

**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**

# Tartalomjegyzék

Rövidítések jegyzéke .....	5
<b>1. BEVEZETÉS.....</b>	<b>6</b>
1.1 A vér és a mikrocirkuláció élettani alapjai .....	7
1.2. A teljesítménydiagnosztika és a spiroergometriai vizsgálatok jelentősége .....	9
1.3. Fizikai terhelés és hemorheológiai változások .....	11
1.4. Sportág-specifikus hemorheológiai különbségek .....	12
1.5. Élettani szélsőségek és környezeti tényezők hatása a hemorheológiára .....	14
1.6. Hemorheológia és teljesítménydiagnosztika .....	16
<b>2. CÉLKITŰZÉSEK .....</b>	<b>18</b>
I. vizsgálat – Állóképességi sportolók és nem sportolók hemorheológiai összehasonlítása .....	18
II. vizsgálat – Core-stabilizációs edzésprogram hatásai hemorheológiai és teljesítmény paraméterekre .....	19
<b>3. ANYAGOK ÉS MÓDSZEREK.....</b>	<b>20</b>
3.1. Keresztmetszeti vizsgálat: állóképességi sportolók és kontrollok összehasonlítása.....	20
3.1.1. Vizsgálati személyek.....	20
3.1.2. Spiroergometriás vizsgálat és vérvétel .....	20
3.1.3. Laboratóriumi módszerek .....	21
3.1.4. Statisztikai elemzés .....	22
3.2. Kiegészítő vizsgálati módszerek –második vizsgálat (core training program) .....	22
3.2.1. Résztvevők.....	23
3.2.2. Core-izomerősítő edzésprogram.....	23
3.2.3. Testösszetétel és spiroergometriás vizsgálat .....	25
3.2.4. Vérminták és laboratóriumi vizsgálatok .....	25
3.2.5. Statisztikai elemzés .....	25
<b>4. EREDMÉNYEK .....</b>	<b>26</b>
4.1. Keresztmetszeti vizsgálat eredményei.....	26
4.1.1. Hematológiai változások .....	26
4.1.2. Vér- és plazmaviszkozitás .....	27
4.1.4. Vörösvérsejt-aggregáció .....	29
4.1.5. Laktát- és légzési paraméterek.....	31
4.1.6. Összefoglalás.....	31
4.2. Intervenciós vizsgálat eredményei (core-edzésprogram).....	32
4.2.1. Testösszetétel és testtömeg-paraméterek.....	32
4.2.2. Spiroergometriás vizsgálat.....	32
4.2.3. Végáz-, sav-bázis- és anyagcsere-paraméterek.....	33
4.2.4. Hematológiai és hemorheológiai paraméterek.....	33
4.2.5. Összegzés .....	36
<b>5. MEGBESZÉLÉS.....</b>	<b>37</b>
5.1. Hemorheológiai adaptációk és élettani összefüggések a keresztmetszeti vizsgálatunkban .....	37
5.2. A core-tréning hatásainak élettani magyarázata és teljesítményélettani vonatkozásai .....	39
5.3. A hemorheológiai paraméterek, mint potenciális biomarkerek és diagnosztikai eszközök .....	40

5.4. A kutatás eredményeinek klinikai és gyakorlati jelentősége.....	42
5.5. A kutatás korlátai és limitáló tényezők.....	43
5.6. Új tudományos eredmények.....	45
5.7. Következtetések és javaslatok a jövőbeli kutatásokra.....	46
6. ÖSSZEFOGLALÁS.....	48
7. SUMMARY.....	49
8. IRODALOMJEGYZÉK.....	50
8.1. Hivatkozott közlemények listája.....	50
8.2. Hivatalos publikációs lista.....	58
9. TÁRGYSZAVAK.....	60
10. KÖSZÖNETNYILVÁNÍTÁS.....	63
10. FÜGGELÉK.....	64

## Rövidítések jegyzéke

AI: aggregációs index

WBC: teljes vérkép

EI hyper: maximális elongációs index fele a magas ozmolalitású környezetben

EI max: maximális elongációs index az alacsony ozmolalitású környezetben

EI min: minimális elongációs index az alacsony ozmolalitású környezetben

EI: elongációs index

EImax: maximális elongációs index

Fvs: fehérvérsejt

Hct: haematocrit

Hgb: haemoglobin

HR: szívfrekvencia

MCH: átlagos vörösvérsejt haemoglobin tartalom

MCHC: átlagos vörösvérsejt haemoglobin koncentráció

MCV: átlagos vörösvérsejt térfogat

O (EI max): EI max-hoz tartozó ozmolalitás érték

O hyper: EI hyper-hez tartozó ozmolalitás érték

O min: EI min-hez tartozó ozmolalitás érték

RBC: vörösvérsejt

RER: respirációs kvóciens

SS1/2: maximális elongációs index feléhez tartozó nyírófeszültség

Thr: thrombocyt

TVV: teljes vér viszkozitás

VO<sub>2</sub>max: maximális oxigénfelvétel

## 1. BEVEZETÉS

A sportorvostan és a teljesítménydiagnosztika egyik alapvető célja annak megértése, hogy milyen tényezők határozzák meg az emberi szervezet fizikai teljesítőképességét, illetve miként lehet azt objektíven mérni, monitorozni és fejleszteni. A fizikai aktivitás, valamint a különböző edzésmódszerek hatásának vizsgálata nem csupán az élsportban fontos, hanem a rekreációs testmozgás, illetve a betegségek rehabilitációja során is [1–3]. A sportteljesítményt számos élettani tényező befolyásolja, amelyek közül kiemelt szerepe van az oxigénszállítási lánc hatékonyságának: a keringési és légzőrendszer funkciójának, valamint a vér rheológiai tulajdonságainak [4].

A szöveti oxigénellátás szempontjából döntő jelentősége van a mikro- és makrokeringés egyensúlyának, amelynek egyik kevésbé ismert, ám annál meghatározóbb eleme a hemorheológiai státusz [5]. A vér rheológiai paraméterei – így a plazma viszkozitása, a hematokrit, a vörösvérsejtek deformabilitása és aggregációja – közvetlenül befolyásolják a mikrocirkulációt és a szöveti oxigenizációt [6,7]. Ezen paraméterek változásai nagymértékben meghatározzák szervezet fizikai terhelésre való alkalmazkodásának hatékonyságát, illetve az akut és krónikus edzésadaptációk teljesítményre kifejtett hatását [8].

Az utóbbi évtizedek kutatásai rámutattak, hogy a rendszeres testmozgás és a sportolói állóképesség összefügg a kedvezőbb hemorheológiai profillal: az edzett sportolók vérük „folyékonyságát” tekintve jobb állapotot mutatnak, amely hozzájárul a terhelés alatti jobb szöveti perfúzióhoz és oxigénellátáshoz [9–11]. Ezzel szemben a mozgásszegény életmód, az elhízás és a krónikus betegségek a vér viszkozitásának növekedésével, a vörösvérsejt-deformabilitás romlásával és fokozott aggregációval járhatnak, ami rontja a mikrocirkulációt és növeli a kardiovaszkuláris kockázatot [12].

A sportorvosi gyakorlatban a teljesítménydiagnosztika egyik alappillére a spiroergometria, amely a keringési-, légzési- és gázcsereparaméterek folyamatos nyomon követésével képes objektív képet adni a szervezet oxigénfelvételi kapacitásáról, a ventilációs küszöbokről és a terhelésélettani alkalmazkodásról [13,14,15]. Ugyanakkor a hagyományos kardiopulmonális adatok mellett egyre nagyobb hangsúly kerül a hemorheológiai tényezők vizsgálatára is, hiszen ezek kulcsszerepet játszanak a terhelés alatti mikrocirkuláció fenntartásában [16,17].

Különösen érdekes kérdés, hogy a különböző edzésmódszerek – legyen szó klasszikus állóképességi tréningről, csapatsportok nagy intenzitású, intervall jellegű terheléséről, vagy a funkcionális/core-izomerősítő programokról – milyen hatást gyakorolnak a vér rheológiai tulajdonságaira [18]. Bár az irodalomban számos adat található az állóképességi edzés és a hemorheológia kapcsolatáról, a nem hagyományos edzésmódszerek (pl. core-stabilizációs gyakorlatok, jóga, pilates edzés) e szempontból kevésbé vizsgáltak.

A jelen disszertáció egyik fő célja ezért annak bemutatása, hogy a fizikai aktivitás és az edzésadaptációk milyen összefüggésben állnak a hemorheológiai státusszal. A téma jelentőségét az adja, hogy a sportolók és a katonai állomány számára a mikrocirkuláció hatékonysága nem csupán a teljesítmény, hanem a regeneráció és a sérülésmegelőzés szempontjából is kulcsfontosságú tényező [18,19]. A disszertáció alapját képező két tanulmány – egy keresztmetszeti jellegű vizsgálat sportolók és nem sportolók összehasonlításával, valamint egy prospektív intervenció program, amely a core-izomerősítés, mint aerob jellegű mozgásforma hemorheológiai és teljesítménybeli hatásait elemezte [– egyaránt hozzájárul a sportteljesítményt meghatározó vérrheológiai faktorok mélyebb megértéséhez.

### **1.1 A vér és a mikrocirkuláció élettani alapjai**

A vérkeringés legfontosabb feladata a szövetek oxigén- és tápanyagellátásának biztosítása, valamint az anyagcsere-végtermékek eltávolítása. A makrokeringés (szív, nagyerek) és a mikrocirkuláció (arteriolák, kapillárisok, venulák) közötti egyensúly alapfeltétele a szervezet homeosztázisának, különösen terhelés alatt [19–21]. Míg a keringési rendszer centrális elemei – például a szív perctérfogata és a tüdő gázcsere-folyamatai – viszonylag jól ismertek, addig a perifériás tényezők közül a vér rheológiai sajátosságai gyakran háttérbe szorulnak, noha meghatározó szerepük van a szöveti oxigenizációban [5,22].

A vér sajátossága, hogy úgynevezett nem-Newtoni folyadék, azaz viszkozitása nem állandó, hanem a nyíróerő nagyságától függően változik [8,23]. Alacsony nyírósebesség mellett a viszkozitás magasabb, amely nagyrészt a vörösvérsejt-aggregációval magyarázható, míg nagyobb nyíróerők hatására az összezsapzódások megszűnnek, és a vér folyási ellenállása csökken [24]. Ez a dinamikus tulajdonság biztosítja, hogy a vér különböző érátmérőkhöz és áramlási körülményekhez alkalmazkodni tudjon.

A vér viszkozitását alapvetően három tényező határozza meg: a plazma viszkozitása, a hematokrit, valamint a vörösvérsejtek mikrorheológiai tulajdonságai [5,25]. A vörösvérsejt-deformabilitás azt jelenti, hogy a sejt mennyire képes alakját rugalmasan változtatni a mikrocirkuláció során. Ennek kulcsszerepe van, mivel a kapillárisok átmérője sokszor kisebb, mint a vörösvérsejt nyugalmi átmérője (~7–8  $\mu\text{m}$ ) [24,26]. A deformabilitást a sejtváz, a membrán lipidösszetétele, valamint a sejt belső viszkozitása határozza meg. A deformabilitás romlása fokozza a perfúziós ellenállást és gátolja az oxigénszállítást [27].

A vörösvérsejt-aggregáció a sejtek reverzibilis összecsapódása, amely alacsony nyíróerők mellett (pl. vénás keringésben) fiziológias folyamatnak tekinthető [25]. Ugyanakkor kóros körülmények között – magas fibrinogénszint, gyulladás, dohányzás, elhízás – túlzott aggregáció alakulhat ki, amely rontja a mikrocirkuláció hatékonyságát, fokozza a vér viszkozitását és hajlamosít a mikrovaszkuláris keringészavarokra [26,27].

A mikrocirkuláció működésében a vér rheológiai tulajdonságai tehát kulcsfontosságú tényezők. Terhelés alatt a kapillárisok megnyílnak, a lokális perfúzió fokozódik, és ehhez a vérnek rugalmasan kell alkalmazkodnia [28] (1. ábra). A kedvező hemorheológiai profil (alacsonyabb plazmaviszkozitás, mérsékelt hematokrit, jó vörösvérsejt-deformabilitás, optimális aggregáció) elősegíti a hatékony oxigénszállítást, míg a kedvezőtlen profil (magas viszkozitás, rigid vörösvérsejtek) rontja a teljesítményt [29].



**1. ábra**

Vörösvérsejtek egy kapillárisban (emberi központi idegrendszer), transzmissziós elektronmikroszkópos (TEM) felvétel. (Dennis Kunkel Microscopy, Science Photo Library)

Az oxigénszállítás láncolata – szív, tüdő, vér, mikrocirkuláció, mitokondrium – bármely ponton sérülhet, és a vér rheológiai eltérései ezen lánc egyik legfontosabb limitáló tényezőjévé válhatnak [30,31]. Különösen igaz ez extrém körülmények között, például nagy intenzitású terhelés, hypoxia, dehidráció vagy kóros állapotok (pl. diabetes mellitus, gyulladásoos betegségek) során [31].

Összességében elmondható, hogy a hemorheológia a sportteljesítmény egyik „rejtett” szabályozója. Míg a kardiopulmonális paraméterek mérésére a klinikai és sportorvosi gyakorlatban számos standardizált módszer áll rendelkezésre, addig a vér mikrorheológiai jellemzőinek vizsgálata egyelőre kevésbé elterjedt [32]. A tudományos kutatások azonban egyre inkább igazolják, hogy a mikrocirkuláció és a hemorheológiai tényezők vizsgálata nélkül a sportteljesítmény komplex értékelése hiányos maradna [33].

## **1.2. A teljesítménydiagnosztika és a spiroergometriai vizsgálatok jelentősége**

A teljesítménydiagnosztika a sportorvostan egyik alapvető területe, amely az emberi szervezet élettani válaszainak és adaptációinak objektív vizsgálatát célozza fizikai terhelés során. A cél a sportoló aktuális terhelhetőségének, edzetségi állapotának, valamint a teljesítményt korlátozó tényezők azonosítása. A korszerű teljesítménydiagnosztikai eljárások segítségével meghatározhatók a különböző élettani küszöbök, az aerob és anaerob kapacitás, valamint a keringési, légzési és anyagcsere-folyamatok integrált működése.

A sportteljesítményt több élettani alrendszer összehangolt működése határozza meg – köztük a légzés, a keringés, az izomműködés és az energia-anyagcsere. A teljesítménydiagnosztika ennek komplex értékelését teszi lehetővé standardizált körülmények között, ami elengedhetetlen az egyénre szabott edzéstervezéshez, az egészségi állapot monitorozásához és a sportági követelményekhez való optimális adaptáció nyomon követéséhez.

A spiroergometriai vizsgálat (ergospirometria, cardiopulmonalis terheléses vizsgálat – CPET) a teljesítménydiagnosztika egyik legpontosabb és leginformatívabb módszere, amely a légzésen keresztül méri az anyagcsere- és keringési folyamatokat terhelés alatt. A vizsgálat során a kilélegzett levegő oxigén- ( $VO_2$ ) és szén-dioxid-tartalmának ( $VCO_2$ ) folyamatos mérésével következtetni lehet az aerob és anaerob energianyerés arányára, valamint a légzési, keringési és izomrendszeri teljesítmény összehangoltságára. A  $VO_2$  a szervezet oxigénfelhasználásának dinamikus mutatója, amely szoros összefüggésben áll a sejtszintű oxidatív anyagcserével. A

$VO_{2max}$ , vagyis a maximális oxigénfelvétel az egyik legfontosabb mutatója az aerob kapacitásnak, és gyakran tekintik a fizikai állóképesség arany standard mérőszámának. A  $VO_{2max}$  értékét nemcsak a genetikai tényezők, hanem a szív perctérfogata, az izomszövet oxidatív kapacitása, a hemoglobin mennyisége és a mikrocirkuláció hatékonysága is meghatározza.

A vizsgálat során az anaerob (laktát-) küszöbök (ventilációs küszöbök, VT1 és VT2) meghatározása különös jelentőségű, mivel ezek a pontok jelzik, hogy a szervezet mikor kezd fokozatosan anaerob anyagcserére áttérni, ami a tejsav-termelés növekedésével és a sav-bázis egyensúly eltolódásával jár. A küszöbértékek pontos meghatározása elengedhetetlen az edzésintenzitás zónák meghatározásához, a túlterhelés elkerüléséhez és a teljesítmény-optimalizáláshoz. [14]

A spiroergometriai vizsgálat (2. ábra) nemcsak a sportolók edzettségének felmérésére, hanem klinikai diagnosztikában is alkalmazható, például szívelégtelenség, légzőszervi megbetegedések vagy metabolikus szindróma esetén. A terheléses légzésfunkciós paraméterek – például az oxigénpulzus, a ventilációs ekvivalens vagy a légzési cserearány (RER) – a kardiopulmonális rendszer integrált működéséről adnak képet. A RER ( $VCO_2/VO_2$ ) értékének 1,0 fölé emelkedése például jelzi, hogy az energianyerés döntően anaerob módon történik.



**2. ábra**

Spiroergometriai vizsgálat futópad ergométeren (saját forrás)

A modern sportdiagnosztikai gyakorlatban a spiroergometria kiegészülhet további paraméterekkel – például pulzuskontrollal, laktátméréssel, hemorheológiai vagy biokémiai markerekkel –, amelyek lehetővé teszik a terhelésélettani folyamatok multidiszciplináris értelmezését. E kombinált megközelítés különösen hasznos az edzés hatás monitorizálásában, a regenerációs folyamatok értékelésében, valamint az egyéni adaptációs különbségek feltérképezésében.

### **1.3. Fizikai terhelés és hemorheológiai változások**

A fizikai aktivitás hatása a vér rheológiai tulajdonságaira összetett, és eltérően jelentkezik az akut, rövid ideig tartó intenzív terhelés, valamint a hosszabb távú, rendszeres edzésadaptáció esetén. A hemorheológiai státusz változásai nemcsak az oxigénszállítás és a szöveti perfúzió hatékonyságát befolyásolják, hanem visszahatnak a teljesítőképességre, a fáradékonyságra és a regenerációs folyamatokra is [34].

#### ***Akut hatások***

Rövid, nagy intenzitású fizikai terhelés során a szervezetben számos olyan élettani változás zajlik le, amelyek közvetlen hatást gyakorolnak a vér rheológiai paramétereire. Már a 1980-as és 1990-es években végzett vizsgálatok rámutattak arra, hogy az intenzív terhelés következtében emelkedik a hematokrit, a hemoglobinkoncentráció, valamint a teljes vér és plazma viszkozitása [8,9]. Ennek egyik oka a hemokoncentráció, amelyet a fokozott izzadás, a plazmavesztés és a kapilláris szintű folyadékáramlás változásai idéznek elő [35].

Az akut terheléshez társuló acidózis (pH-csökkenés), a laktátkoncentráció emelkedése és az oxidatív stressz szintén kedvezőtlenül befolyásolják a vörösvérsejt-deformabilitást [6,36]. El-Sayed és mtsai kimutatták, hogy a deformabilitás jelentősen romlik, amikor a vér laktátszintje meghaladja a 4 mmol/L-t [37]. Ugyanakkor ez a hatás edzett sportolóknál kevésbé kifejezett, ami adaptív folyamatokra utal [36].

A vörösvérsejt-aggregáció akut terhelés során általában fokozódik, különösen csapatsportot végző egyéneknél, ahol az ismételt nagy intenzitású intervallumok jellemzőek. Ezzel szemben állóképességi sportolóknál – például futóknál – bizonyos vizsgálatok nem találtak jelentős aggregációs változást, ami arra utal, hogy a sportág-specifikus terhelés jellege is befolyásolja a hemorheológiai választ [29].

### ***Krónikus adaptációk***

A rendszeres fizikai aktivitás hosszabb távon kedvező változásokat eredményez a hemorheológiai státuszban. A „hemorheológiai fitness” fogalma a 2000-es évek elején került be a szakirodalomba, utalva arra, hogy a rendszeresen edző személyeknél alacsonyabb a vér és plazma viszkozitása, mérsékeltebb a hematokrit, javul a vörösvérsejtek deformabilitása és mérséklődik az aggregáció [11].

Romain és mtsai metaanalízise megerősítette, hogy a rendszeres állóképességi edzés csökkenti a hematokritot és a vörösvérsejt-aggregációt, ugyanakkor hangsúlyozta, hogy az eredmények heterogének, és az edzés típusa, intenzitása, valamint a vizsgált populáció (élsportoló vs. rekreációs egyén) nagyban befolyásolja a kimeneteket [38].

Állóképességi tréning hatására a vörösvérsejt-deformabilitás javulását többen leírták, ami a membrán tulajdonságainak és az intracelluláris metabolikus adaptációknak tulajdonítható [36,39]. Banfi és munkatársai állóképességi sportolóknál alacsonyabb vérviszkozitást és jobb deformabilitást mutattak ki a kontrollcsoporthoz képest [10]. Ezzel szemben csapatsportolóknál a hemorheológiai paraméterek kevésbé voltak kedvezőek, ami feltehetően a rövidebb, de intenzívebb edzésingerekhez kapcsolódik.

A rendszeres tréning egyik legfontosabb hosszútávú hatása a plazmatérfogat-expanzió, amely javítja a vér folyékonyságát és csökkenti a relatív hematokritot [35]. Ez a változás nemcsak a teljesítményt segíti elő, hanem védi a szervezetet a terhelés indukálta hyperviszkozitástól is [34].

### ***Limitáló tényezők***

Bár a rendszeres fizikai aktivitás alapvetően kedvező hatású, túlzott vagy nem megfelelő edzésterhelés esetén kedvezőtlen irányú változások is kialakulhatnak. A kimerítő edzések, a dehidratáció, a túl gyors regeneráció nélküli ismételt intenzív terhelés a vér viszkozitásának fokozódásához, a vörösvérsejt-deformabilitás romlásához és a mikrocirkulációs funkció csökkenéséhez vezethet [40]. Ezért az edzésterhelés egyéni adaptációhoz igazítása alapvető feltétel a teljesítmény optimalizálásában és a hemorheológiai szempontból is kedvező adaptációk elérésében.

## **1.4. Sportág-specifikus hemorheológiai különbségek**

A fizikai aktivitás hemorheológiai hatásait nemcsak az edzés intenzitása és időtartama, hanem a sportág jellege és az ahhoz kapcsolódó edzés módszerek is jelentősen befolyásolják. Az

állóképességi, erősportok és csapatsportok eltérő fiziológiai követelményeket támasztanak, amelyekhez a szervezet, köztük a vér és a mikrocirkuláció is specifikus módon alkalmazkodik.

### ***Állóképességi sportok***

Az állóképességi sportolóknál (pl. futók, kerékpárosok, úszók) számos tanulmány igazolta a kedvező hemorheológiai profilt: alacsonyabb vér- és plazmaviszkozitás, javult vörösvérsejt-deformabilitás és mérsékelt aggregáció jellemzi őket [6]. Ezen változások adaptív jelleggel járulnak hozzá a hosszútávú teljesítményhez, hiszen a mikrocirkuláció hatékonyabb működése jobb oxigénszállítást és energiaszubsztrát-ellátást biztosít a működő izmok számára [41,42].

A hosszútávfutók és triatlonisták esetében különösen fontos a plazmatérfogat-expanzió, amely csökkenti a hematokritot és ezzel a viszkozitást, ugyanakkor fenntartja a megfelelő oxigénszállító kapacitást [35,43]. A tartós edzésekhez társuló adaptációk közül kiemelhető még a vörösvérsejtek antioxidáns rendszerének javulása, amely mérsékli az oxidatív stressz okozta deformabilitás-romlást [44].

### ***Csapatsportok***

A csapatsportok (pl. labdarúgás, kosárlabda, jégkorong) jellegzetessége a változó intenzitás, a gyakori sprint–pihenő ciklusok és a kontakt jellegű terhelés. Ezek a tényezők eltérő hemorheológiai választ eredményeznek, mint az állóképességi sportokban. Számos vizsgálat kimutatta, hogy a csapatsportolóknál a vörösvérsejt-aggregáció gyakran magasabb, különösen intenzív edzések vagy mérkőzések után [45,46]. Emellett az akut hemokoncentráció is jelentősebb lehet, ami átmenetileg fokozott viszkozitást eredményez [47].

Mindezek ellenére a rendszeresen edző csapatsportolók hosszabb távon szintén mutatnak kedvező adaptációkat: a plazmatérfogat növekedése és a nyugalmi hematokrit csökkenése mérsékli a hyperviszkózitás kockázatát [48]. Azonban az állóképességi sportolókhöz képest a deformabilitás és aggregáció mutatók kevésbé kedvezőek maradhatnak, ami a sportág-specifikus terhelés különbségeire vezethető vissza [49].

### ***Erősportok és anaerob jellegű terhelések***

Az erősportok (pl. súlyemelés, erőemelés, testépítés) és a rövid, anaerob jellegű terhelések szintén eltérő hatással vannak a hemorheológiára. Az irodalom szerint ezekben a sportágakban gyakrabban figyelhető meg emelkedett hematokrit, fokozott vörösvérsejt-aggregáció és magasabb plazmaviszkozitás [50]. Ennek hátterében az ismételt Valsalva-manőverek, a nagy

intravaszkuláris nyomásemelkedések, valamint az edzésekhez társuló mikrosérülések és gyulladásos folyamatok állhatnak [51].

Bár az akut válasz kedvezőtlenebbnek tűnik, hosszabb távon ezeknél a sportolópopulációknál is megfigyelhetők adaptív folyamatok, például a fokozott izomtömeghez igazodó keringési alkalmazkodás. Ugyanakkor a mikrocirkuláció hatékonysága kevésbé optimalizált, mint az állóképességi sportokban, és az oxidatív stressz, valamint a gyulladásos mediátorok magasabb szintje kedvezőtlen hatással lehet a vörösvérsejt-deformabilitásra [52].

### **1.5. Élettani szélsőségek és környezeti tényezők hatása a hemorheológiára**

A sportolók teljesítményét és a szervezet élettani válaszait számos külső tényező befolyásolja. A környezeti hőmérséklet, a magasság, a páratartalom, a folyadékbevitel és a környezeti oxigénszint mind hatással vannak a keringési rendszerre és a vér rheológiai tulajdonságaira. Ezek az alkalmazkodási mechanizmusok döntő szerepet játszanak a teljesítmény alakulásában, de extrém körülmények között akár kóros irányba is eltolódhatnak.

#### ***Magaslati edzés és hypoxia***

A magaslati edzések az állóképességi sportok egyik leggyakrabban alkalmazott teljesítményfokozó módszerét jelentik. Az alacsony környezeti oxigénnyomás hatására a szervezet fokozott eritropoetikus választ ad, amely a vörösvérsejt-tömeg és a hemoglobinkoncentráció növekedéséhez vezet [53]. Ez javítja az oxigénszállító kapacitást, ugyanakkor a megnövekedett hematokrit és hemoglobin szint a vér viszkozitásának fokozódását eredményezi [54].

A krónikus hypoxiás expozíció során kialakuló hyperviszkozitás a mikrocirkuláció romlásához és fokozott kardiovaszkuláris terheléshez vezethet [55]. Ezért a magaslati edzések élettani előnyeit mindig össze kell vetni a hemorheológiai kockázatokkal: ha a hematokrit túlzottan emelkedik, az oxigénszállítás hatékonysága paradox módon csökkenhet a fokozott áramlási ellenállás miatt [56].

Több vizsgálat kimutatta, hogy az akklimatizáció során a szervezet részben kompenzálja a fokozott viszkozitást: nő a plazmatérfogat, javul a vörösvérsejt-deformabilitás és az endotheliális funkció [57]. Ezek az adaptációk hozzájárulnak ahhoz, hogy a sportolók teljesítménye hosszabb távon ne romoljon, hanem stabilizálódjon vagy akár javuljon is a magaslati tréninget követően.

### ***Hőterhelés és dehidráció***

A magas környezeti hőmérséklet és a vele járó fokozott izzadás a testfolyadék-veszteségen keresztül közvetlen hatást gyakorol a vér rheológiai tulajdonságaira. Már 2–3%-os testtömegvesztés is kimutathatóan fokozza a hemokoncentrációt, növeli a hematokritot és a plazmaviszkozitást [58,59]. A dehidráció mértékétől függően ez akár 10–20%-kal is emelheti a teljes vér viszkozitását [60].

A hőstressz továbbá fokozza az oxidatív folyamatokat, ami rontja a vörösvérsejt-membrán rugalmasságát, és csökkenti a deformabilitást [61]. Ugyanakkor a megfelelő folyadék- és elektrolitpótlás, valamint a hőadaptációval járó edzésprogramok képesek mérsékelni ezeket a hatásokat [62].

A hőhöz való adaptáció egyik kulcsmechanizmusa a plazmatérfogat-expanzió, amely javítja a hőleadást és csökkenti a viszkozitást, ezáltal tehermentesíti a keringést [63]. Ez a mechanizmus hasonló a rendszeres állóképességi edzés során megfigyelthez, ami a hemorheológiai profil javulásához is hozzájárul.

### ***Hideg környezet és perifériás keringés***

A hideg környezetben végzett fizikai aktivitás (pl. sífutás, jégkorong, műkorcsolya) esetén a perifériás vazokonstriktió és a csökkent bőrperfúzió miatt a mikrocirkuláció jelentősen módosul. A vér viszkozitása a hőmérséklet csökkenésével exponenciálisan nő, mivel a plazma és a sejtek folyási tulajdonságai is hőmérsékletfüggőek [64].

Ráadásul a hideg hatására fokozódik a vörösvérsejt-aggregáció, ami – különösen extrém körülmények között – mikrocirkulációs károsodást és fagyási sérüléseket idézhet elő [65]. A sportolók esetében azonban az ismételt hidegexpozíció adaptációt vált ki: javul a perifériás keringés szabályozása, és a hőmérsékletre való alkalmazkodás révén a viszkozitásváltozások mértéke mérséklődik [66].

### ***Oxidatív stressz és rheológiai válasz***

A hypoxia, a hő- és hidegterhelés közös jellemzője az, hogy fokozza az oxidatív stresszt, amely kulcsszerepet játszik a vörösvérsejt-membrán károsodásában és a deformabilitás romlásában [67]. A szabadgyökök fokozott képződése oxidálja a membrán lipidjeit és fehérjéit, ezáltal növeli a sejt merevségét. A megfelelő antioxidáns-védelem (endogén enzimszerek és exogén antioxidáns bevitel) segíthet a hemorheológiai egyensúly fenntartásában [68].

A környezeti és élettani szélsőségek tehát komplex módon befolyásolják a vér rheológiai tulajdonságait. A sportolók számára ezért a megfelelő folyadékpótlás, az edzésprogram

optimalizálása és a környezeti tényezők figyelembevétele elengedhetetlen a teljesítmény és az egészség megőrzéséhez.

## **1.6. Hemorheológia és teljesítménydiagnosztika**

A sportteljesítmény komplex fiziológiai folyamat, amelyben a kardiovaszkuláris, respiratorikus és hematológiai rendszerek összehangolt működése szükséges az optimális oxigénellátás és energiatermelés biztosításához. Az utóbbi években egyre nagyobb figyelmet kap a hemorheológia mint a teljesítmény egyik „rejtett” limitáló tényezője, hiszen a vér mikrorheológiai tulajdonságai közvetlenül befolyásolják a szöveti oxigénfelvételt, a perifériás keringést és a regeneráció hatékonyságát [69,70].

A teljesítménydiagnosztika során alkalmazott modern eszközök – például a spiroergometria, a laktátmérés és az oxigénfelvétel-analízis ( $VO_2\max$ ) – precíz képet adnak a szervezet centrális és perifériás oxigénszállító kapacitásáról. Ezek az adatok azonban csak részben tükrözik a véráramlás és az oxigéntranszport valódi hatékonyságát, amelyet a hemorheológiai állapot döntően meghatároz [71].

### ***A hemorheológia és az oxigéntranszport kapcsolata***

Az oxigénszállítás hatékonyságát nemcsak a hemoglobinkoncentráció és a kardiopulmonális funkciók határozzák meg, hanem az, hogy a vörösvérsejtek mennyire képesek rugalmasan haladni a mikrocirkulációs hálózaton. A vörösvérsejt-deformabilitás és a plazma viszkozitás egyaránt meghatározza a véráramlási ellenállást a kapilláris szinten [72,73].

Állóképességi sportolók esetében a jobb deformabilitás és a mérsékelt hematokrit csökkenti a viszkozitást, ezáltal javítja az izomperfúziót és a szöveti oxigenizációt nagy intenzitású terhelés során is [74]. Ennek eredményeként a  $VO_2\max$  és a vér reológiai jellemzői között pozitív összefüggés figyelhető meg [75].

Banfi és munkatársai [76] igazolták, hogy azoknál az állóképességi sportolóknál, akiknél alacsonyabb plazmaviszkozitás és jobb vörösvérsejt-deformabilitás volt mérhető, szignifikánsan magasabb maximális oxigénfelvételi értékeket regisztráltak. Más szerzők [77] szerint a hematokrit optimális zónája sportolóknál 42–47% között van – ennél alacsonyabb érték csökkenti az oxigénszállító kapacitást, míg a magasabb érték hyperviszkozitást és perfúziós korlátozást okozhat.

### ***Spiroergometria és hemorheológiai indikátorok***

A spiroergometria lehetőséget biztosít a ventilációs küszöbök, az oxigénfogyasztás ( $VO_2$ ), a szén-dioxid-termelés ( $VCO_2$ ) és a respiratorikus kvóciens folyamatos mérésére. Ezen paraméterek a centrális teljesítményt tükrözik, míg a hemorheológiai változások a perifériás oxigénhasznosítás szintjén fejtik ki hatásukat [78].

Kísérletes vizsgálatokban kimutatták, hogy a vörösvérsejt-deformabilitás javulása párhuzamosan növeli a laktátküszöb-intenzitást, azaz a sportoló nagyobb terhelést képes elviselni az anaerob anyagcsere beindulása előtt [79]. Ez az összefüggés különösen releváns a terhelésdiagnosztikában, hiszen a laktátküszöb a teljesítmény-fokozás egyik legfontosabb mutatója [80].

A hemorheológiai mérések (ektacytometriával mért deformabilitás-index, aggregációs görbe, plazmaviszkozitás) és a spiroergometriás adatok integrált értékelése új lehetőséget kínál a teljesítmény élettani korlátainak pontosabb feltérképezésére [81].

### ***Hemorheológiai biomarkerek a sportdiagnosztikában***

Az utóbbi években felmerült, hogy a hemorheológiai jellemzők önmagukban is biomarkerként alkalmazhatók a sportolói állapot és adaptáció monitorozására. A vörösvérsejt-deformabilitás, az aggregáció mértéke és a plazmaviszkozitás olyan dinamikus paraméterek, amelyek edzés hatására rövid időn belül megváltozhatnak, és így alkalmasak az edzésadaptációk objektív követésére [82,83].

A hemorheológiai változások akár az overtraining-szindróma korai jeleiként is értelmezhetők, mivel a túlzott terhelés a mikrocirkuláció romlásához és fokozott oxidatív stresszhez vezethet [84]. Hasonlóképpen, a regenerációs szakaszban a vér „újr rugalmassága” jól tükrözi a szervezet adaptációs állapotát.

Ezek alapján egyre több kutató javasolja a hemorheológiai paraméterek integrálását a komplex sportorvosi monitorozásba, kiegészítve a szokásos kardiopulmonális, biokémiai és neuromuszkuláris mutatókat [85,86].

## 2. CÉLKITŰZÉSEK

A sportteljesítményt meghatározó élettani tényezők vizsgálata során az utóbbi években egyre nagyobb hangsúlyt kapott a vér mikrorheológiai tulajdonságainak, különösen a vörösvérsejt-deformabilitás és -aggregáció, valamint a plazma viszkozitás szerepének feltárása. Bár korábbi kutatások kimutatták, hogy a rendszeres fizikai aktivitás kedvezően befolyásolja e paramétereket, a pontos mechanizmusok, az edzésadaptáció időbeli lefutása, valamint az edzéstípusok közötti különbségek még nem tisztázottak teljeskörűen.

A doktori értekezés célja ezen összefüggések részletes vizsgálata, különös tekintettel a hemorheológiai faktorok és a teljesítménydiagnosztikai mutatók ( $VO_2\text{max}$ , laktátküszöb, ventilációs paraméterek) kapcsolatára, valamint a különböző edzéstípusok által kiváltott adaptív változásokra.

A kutatás két egymásra épülő vizsgálati részre tagolódik, amelyek önálló, nemzetközi folyóiratban megjelent tanulmányként is publikálásra kerültek.

### **I. vizsgálat – Állóképességi sportolók és nem sportolók hemorheológiai összehasonlítása**

Az első vizsgálat célja annak meghatározása volt, hogy az edzettségi állapot milyen mértékben befolyásolja a vér mikrorheológiai jellemzőit.

A kutatás specifikus céljai a következők voltak:

1. **A vörösvérsejt-deformabilitás, aggregáció és plazmaviszkozitás összehasonlítása** rendszeresen edző állóképességi sportolók és inaktív, egészséges kontrollszemélyek között.
2. **A hemorheológiai paraméterek korrelációjának vizsgálata** a teljesítménydiagnosztikai mutatókkal ( $VO_2\text{max}$ , laktátküszöb, pulzus-, ventilációs és terhelés-időtartam adatok).
3. **A hemorheológiai státusz és a kardiopulmonális teljesítmény közötti kapcsolat feltérképezése**, különös tekintettel a mikrocirkulációs hatékonyság élettani jelentőségére.

E vizsgálat célja tehát a „hemorheológiai fitnessz” fogalmának kísérletes alátámasztása, valamint annak bizonyítása, hogy a kedvezőbb vérreológiai profil az állóképességi edzettség egyik markere lehet.

## **II. vizsgálat – Core-stabilizációs edzésprogram hatásai hemorheológiai és teljesítmény paraméterekre**

A második kutatási rész egy prospektív intervenciós program keretében vizsgálta, hogy a funkcionális, core-izomzatot fejlesztő tréning milyen mértékben befolyásolja a hemorheológiai tulajdonságokat, valamint a spiroergometriás teljesítményjellemzőket.

A konkrét célkitűzések a következők voltak:

1. **A 12 hetes core-tréning hatásának értékelése** a vörösvérsejt-deformabilitás, aggregáció és plazmaviszkozitás változásain keresztül.
2. **A hemorheológiai és kardiopulmonális változások közötti összefüggések feltárása**, a funkcionális edzés által kiváltott perifériás adaptációk értelmezése céljából.
3. **A hemorheológiai paraméterek validálása mint potenciális biomarkerek**, amelyek az edzésadaptáció és a teljesítményfejlődés objektív visszajelzői lehetnek.

A vizsgálat hosszú távú célja annak igazolása volt, hogy a vér rheológiai tulajdonságai nem csupán a teljesítmény következményei, hanem aktív modulátorai is lehetnek az edzésadaptációnak, és így beépíthetők a sportolók teljesítménydiagnosztikai protokolljába.

### ***Összefoglaló kutatási hipotézisek***

1. A rendszeres, állóképességi jellegű fizikai aktivitás javítja a hemorheológiai profilt, amely pozitívan korrelál a  $VO_2$ max és a ventilációs küszöb értékeivel.
2. A core-izomzatot célzó funkcionális edzésprogram kedvező perifériás adaptációkat idéz elő a mikrocirkulációban és a vörösvérsejtek deformabilitásában.
3. A hemorheológiai paraméterek alkalmasak a sportolói adaptáció és regeneráció objektív nyomon követésére, így a jövőben potenciális biomarkerként integrálhatók a sportorvosi teljesítménydiagnosztikába.

### **3. ANYAGOK ÉS MÓDSZEREK**

A doktori kutatás két, egymásra épülő vizsgálati szakaszból állt. Az első keresztmetszeti vizsgálat célja az volt, hogy feltárja a hemorheológiai különbségeket állóképességi sportolók és nem sportoló kontrollszemélyek között.

A második, prospektív intervenciós vizsgálat egy 12 hetes core-izomfejlesztő program hatását értékelte a vér rheológiai tulajdonságaira és a teljesítménydiagnosztikai mutatókra. Mindkét vizsgálatot a Debreceni Egyetem Sportorvosi Tanszékén, standardizált laboratóriumi körülmények között végeztük.

A kutatás minden résztvevője önkéntesen vett részt a vizsgálatokban, a Helsinki Nyilatkozat elveinek megfelelően. A vizsgálati protokollt a Debreceni Egyetem Tudományos és Kutatásetikai Bizottsága hagyta jóvá, a vizsgálatok során személyazonosítható adatot nem rögzítettünk.

#### **3.1. Keresztmetszeti vizsgálat: állóképességi sportolók és kontrollok összehasonlítása**

##### **3.1.1. Vizsgálati személyek**

Harminchét férfi önkéntes (etikai engedély száma: DE RKEB/IKEB:5410-2020) vett részt a vizsgálatban, három különböző csoportba sorolva. A nem edzett kontrollcsoport 11 orvostanhallgatóból állt, akik hobbiszinten végeztek fizikai aktivitást (életkor:  $25,1 \pm 2,6$  év; BMI:  $26,4 \pm 3,4$  kg/m<sup>2</sup>).

A második csoportot 14 hivatásos labdarúgó alkotta (életkor:  $22,7 \pm 3,4$  év; BMI:  $23,6 \pm 1,1$  kg/m<sup>2</sup>; versenysportban eltöltött idő:  $14,4 \pm 3,4$  év).

A harmadik csoportban 12 hivatásos jégkorongozó vett részt (életkor:  $24,3 \pm 4,3$  év; BMI:  $25,4 \pm 1,7$  kg/m<sup>2</sup>; versenysportban eltöltött idő:  $15,9 \pm 4,5$  év).

##### **3.1.2. Spiroergometriás vizsgálat és vérvétel**

A spiroergometriás terhelés megkezdése előtt 5 perccel vénás vérmintát vettünk a résztvevőktől (vena mediana cubiti, 23G tű, K<sub>3</sub>-EDTA Vacutainer csövek). Ezt követően minden vizsgálati személy a Bruce-protokoll (Vitamaxima 12) szerint futószalagos terhelést végzett. A terhelés során az ötödik percben érték el a 12 km/h sebességet, miközben az emelkedési szög folyamatosan nőtt 0°-tól 20°-ig. A terhelés alatt a sportolók Vyntus CPX rendszerhez (Vyair Medical, Mettawa IL, USA) csatlakoztak arcmaszkon keresztül, amely percenkénti ventilációt,

légzésszámot, oxigénfelvételt, szén-dioxid-termelést és további respiratorikus adatokat rögzített. A pulzusszámot Polar H9 mellkasi érzékelő (Polar Electro, Finnország) mérte, Bluetooth-kapcsolaton keresztül valós időben megjelenítve az adatokat. A vizsgálatot 20 °C hőmérsékletű laboratóriumban végeztük. A protokollt a maximális teljesítmény elérésekor állítottuk le. Az átlagos terhelési idő 7 perc 31 másodperc  $\pm$  55 másodperc volt.

Rögzített paraméterek: teljesítmény [W], idő [min], pulzusszám [1/min], ventilációs volumen [L/min], légzésszám [1/min], oxigénfelvétel ( $VO_2$  [mL/min]), szén-dioxid-termelés ( $VCO_2$  [mL/min]), respirációs cserearány ( $RER = VCO_2/VO_2$ ), valamint a szisztolés és diasztolés vérnyomás [mmHg].

A terhelés azonnali befejezése után ismét vénás vérmintát vettünk, valamint további 5 percen keresztül mértük a pulzusszámot és vérnyomást. A pihenési periódus 1. és 5. percében kapilláris vérmintát is vettünk ujjbegyből, a vér laktátkoncentrációjának meghatározására [mmol/L].

### **3.1.3. Laboratóriumi módszerek**

#### ***Hematológiai paraméterek***

A hematológiai vizsgálatokat Sysmex K-4500 automata analizátorral (TOA Medical Electronics Co., Ltd., Kobe, Japán) végeztük. Meghatározott paraméterek: vörösvérsejt-szám (RBC [ $10^{12}/\mu\text{L}$ ]), fehérvérsejt-szám (WBC [ $10^9/\mu\text{L}$ ]), limfocita-százalék (Lymph [%]), granulocita + monocita arány (Gr+Mo [%]), trombocitaszám (Plt [ $10^9/\mu\text{L}$ ]), hematokrit (Hct [%]), hemoglobin (Hgb [g/dL]), átlagos vörösvérsejt-térfogat (MCV [fL]), átlagos hemoglobintartalom (MCH [pg]), átlagos hemoglobinkoncentráció (MCHC [g/L]) és átlagos thrombocyta-térfogat (MPV [fL]).

#### ***Hemorheológiai paraméterek***

A teljes vér- és plazmaviszkozitást Hevimet-40 kapilláris viszkoziméterrel (Hemorex Ltd., Budapest, Magyarország) mértük  $90 \text{ s}^{-1}$  nyírási sebességnél. A teljes vér viszkozitást a Mátrai-képlet alapján normalizáltuk 40% hematokritra:  $WBV_{40\%/PV} = (WBV_{Hct} / PV) \times 40 / Hct$  ahol  $WBV_{Hct}$  a mért teljes vérviszkozitás [mPas]  $90 \text{ s}^{-1}$ -nél, PV a plazmaviszkozitás [mPas], Hct pedig a hematokrit [%]. A vörösvérsejt-deformabilitást LoRRca MaxSis Osmoscan ektacitóméterrel (Mechatronics BV, The Netherlands) vizsgáltuk.

A hagyományos deformabilitási tesztekhez  $10 \mu\text{L}$  vérmintát 2 mL PVP/PBS oldatban (viszkozitás = 29,6 mPas; ozmolaritás = 293 mOsm/kg; pH = 7,2) hígítottunk.

Az elongációs indexet (EI) 0,3–30 Pa nyírófeszültség-tartományban határoztuk meg. A kapott EI–SS görbék alapján kiszámított paraméterek: EI(3 Pa), maximális elongációs index (EI<sub>max</sub>), az EI<sub>max</sub> feléhez tartozó nyírófeszültség (SS<sub>1/2</sub> [Pa]) és arányuk (EI<sub>max</sub>/SS<sub>1/2</sub>), a Lineweaver–Burk-egyenlet alapján.

Az ozmotikus gradiens-deformabilitási (osmoscan) vizsgálatokhoz 250 µL vérmintát 5 mL PVP/PBS oldatba szuszpendáltunk. A nyírófeszültség itt állandó (30 Pa) volt, miközben az ozmolalitás 0–500 mOsm/kg tartományban változott. A görbék főbb paraméterei: EI<sub>min</sub>, EI<sub>max</sub>, EI<sub>hyper</sub>, valamint a hozzájuk tartozó ozmolalítási értékek (O<sub>min</sub>, O(EI<sub>max</sub>), O<sub>hyper</sub>) és az EI–O görbe alatti terület.

A vörösvérsejt-aggregációt két különböző elvű eszközzel vizsgáltuk:

- Myrenne MA-1 aggregométerrel (Myrenne GmbH, Németország), fénytranszmissziós módszerrel, 20 µL vérminta diszaggregálását követően (600 s<sup>-1</sup> nyírási sebesség). Az aggregációs indexet a 5. és 10. másodpercben, M (0 s<sup>-1</sup>) és M1 (3 s<sup>-1</sup>) módban határoztuk meg (M<sub>5s</sub>, M<sub>10s</sub>, M1<sub>5s</sub>, M1<sub>10s</sub>).
- LoRRca MaxSis Osmoscan ektacitométerrel (lézeres visszaszóráson alapuló Couette-rendszer), ahol a rotor leállása után a vörösvérsejtek újraaggregálódása közben a szillegtogram-görbéből származó paramétereket elemeztük: amplitúdó (Amp [au]), aggregációs index (AI [%]) és félamplitúdó-idő (t<sub>1/2</sub> [s]).

### 3.1.4. Statisztikai elemzés

Az adatokat átlag ± szórás (S.D.) formában adtuk meg. A statisztikai elemzéseket GraphPad Prism 8.0 szoftverrel (GraphPad Software Inc., La Jolla, CA, USA) végeztük. A csoporton belüli különbségek vizsgálatához páros t-tesztet vagy Wilcoxon-próbát alkalmaztunk, az adatok eloszlásának normalitása szerint, amelyet D’Agostino–Pearson-teszttel ellenőriztünk. A csoportok közötti különbségek értékelésére független t-tesztet vagy Mann–Whitney-tesztet használtunk. A statisztikai szignifikancia szintjét p < 0,05-ben határoztuk meg.

## 3.2. Kiegészítő vizsgálati módszerek –második vizsgálat (core training program)

A második vizsgálat (Módy et al., 2025) módszertani felépítése alapjaiban megegyezett az előző fejezetben ismertetett protokollal. A vizsgálat fő célja egy alacsonyabb intenzitású, a

core-izomzat fejlesztésére irányuló edzésprogram hemorheológiai és teljesítményélettani hatásainak feltárása volt. A mérési eljárások, laboratóriumi módszerek és spiroergometriás protokoll alapvetően megegyeztek az első vizsgálatban alkalmazottakkal, az alábbi különbségekkel és kiegészítésekkel.

### 3.2.1. Résztevők

A vizsgálatban 35 férfi vett részt, akik a Magyar Honvédség katonai felkészítő programjára jelentkeztek. A résztvevők a toborzás után önkéntes alapon kerültek beválogatásra, majd egy számítógépes blokkrandomizációs eljárással (block size = 4) osztottuk őket két csoportba:

- **Aktív (core training) csoport** (n=17): kiegészítő törzsizomerősítő edzésprogramban vettek részt a 3 hónapos alapkiképzés mellett.

- **Kontrollcsoport** (n=18): kizárólag az alapkiképzés fizikai tréningjét végezte. A randomizációs folyamatot független kutató végezte, a csoportbesorolást sem a tréninget vezető szakemberek, sem a résztvevők nem befolyásolhatták. A kimeneti értékeléseket végző kutatócsoport tagjai, lehetőség szerint, vakon értékelték az adatokat.

### 3.2.2. Core-izomerősítő edzésprogram

A beavatkozás időtartama 12 hét (napi 1 óra) volt, kifejezetten a törzsizmok funkcionális fejlesztését és szinergikus aktivitásának javítását célozva.

A program három fő komponensből állt:

1. Dinamikus nyújtás és mobilizálás álló és kúszó testhelyzetekben – az izomláncok és propriocepciós koordináció fejlesztése érdekében.
2. Mellkasmobilizáció, amely javította a légzéstechnikát és a törzs stabilizációs funkcióját (a rekeszizom hatékonyabb, szinergista aktiválásával).
3. Célzott törzsizomerősítés különböző kúszó- és támaszhelyzetekben, statikus és progresszív gyakorlatokkal, a gerinc stabilitásának és terhelésmegoszlásának optimalizálása érdekében (I. és II. táblázat).

A gyakorlatok tervezésekor a Functional Movement Screen (FMS) alapelveit vettük figyelembe.

I. táblázat: A core-izomerősítő program részletes leírása

A core tréning koncepciója	A gyakorlatok hatása	Alkalmazott gyakorlatok
<b>Dinamikus bemelegítés</b>	<ul style="list-style-type: none"> <li>• mobilizációs gyakorlatok alkalmazása az ízületi mozgástartomány (ROM) növelésére</li> <li>• fizikai teljesítmény javítása a rugalmasság növelésével</li> <li>• vérkeringés fokozása – csökkenti az izomláz kialakulását</li> <li>• sérülés- és szövetsérülés-kockázat csökkentése edzés során</li> <li>• izomláncok aktiválása</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>• kar- és láblendítések</li> <li>• mellkasi mobilizáció négykézláb helyzetben</li> <li>• kúszó és kitörés gyakorlatok törzsrotációval <ul style="list-style-type: none"> <li>• előre haladó „inch worm” gyakorlat</li> <li>• cossack guggolás csípőrotációval</li> <li>• inverz kúszógyakorlatok</li> </ul> </li> <li>• előrehajlítás és lefelé néző kutya pozíció</li> </ul>
<b>Mellkasmobilizáció</b>	<ul style="list-style-type: none"> <li>• a helyi stabilizátorok aktiválása, amelyekhez a rekeszizom is tartozik</li> <li>• a gerinc mozgástartományának növelése</li> <li>• bordakosár mobilitásának fokozása</li> <li>• hasi–rekeszi légzésmintázat javítása</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>• lassú, halk orron át történő belégzés</li> <li>• légzés megtartása 4 másodpercig</li> <li>• excentrikus rekeszkontrollal végzett kilégzés</li> </ul>
<b>Célzott core erősítés</b>	<ul style="list-style-type: none"> <li>• szegmentális stabilitás javítása és fenntartása</li> <li>• a pelvico-lumbo-hip komplexum védelme terhelés alatt</li> <li>• globális core izmok erősítése, az optimális szinergista izomműködés és funkció érdekében</li> </ul>	<ol style="list-style-type: none"> <li>1. izolált lumbális stabilizáció – tudatos izomaktiváció fejlesztése</li> <li>2. progresszív, mérsékelt lumbális stabilizáció funkcionális gyakorlatokba integrálva álló és mászómozgások során</li> </ol> <ul style="list-style-type: none"> <li>• váltott kar- vagy lábemelés állásban</li> <li>• négykézláb helyzetben kúszómozgások</li> <li>• féltérdelés, aszimmetrikus rotációs izomlanc aktivációval <ul style="list-style-type: none"> <li>• alacsony és magas kúszópozíciók</li> </ul> </li> <li>• előre és oldalra lépés váltott törzs mozgással</li> </ul>

II. táblázat: A core-izomerősítő program felépítése, progresszivitása

CORE TRÉNING / PROGRESSZIVITÁS	1–6. hét	7–12. hét
INTENZITÁS	mérsékelt – a maximális terhelés/szint 70%-a	mérsékelt – a maximális terhelés/szint 70%-a
ISMÉTLÉSSZÁM	5 ismétlés / gyakorlat	5 ismétlés / gyakorlat
SOROZAT	3×	5×
IZOMKONTRAKCIÓ TÍPUSA	koncentrikus és excentrikus izometriás – a végpozíció tartása 5 másodpercig	koncentrikus és excentrikus izometriás – a végpozíció tartása 5 másodpercig
CÉL	<b>gyakorlatok pontos kivitelezése</b>	<b>funkcionalitás fejlesztés fokozatos terheléssel</b>

### **3.2.3. Testösszetétel és spiroergometriás vizsgálat**

A testösszetételt InBody 770 készüléssel határoztuk meg (InBody USA Co., Ltd., Cerritos, CA, USA). A spiroergometriás terhelés során ugyanazt a futószalagos ramp-protokollt (Vitamaxima 12) alkalmaztuk, mint az első vizsgálatban, de itt a terhelés 45 W/perc sebességgel nőtt, a dőlésszög maximum 17,5° volt. A  $VO_2$ max értéket direkt gázcsere-analízis (breath-by-breath) módszerrel határoztuk meg a Vyntus CPX rendszerrel. A vizsgálat átlagos csúcsteljesítménye  $345 \pm 36,5$  W volt. A mért fő paraméterek: terhelés [W], idő [min], pulzusszám [1/min], ventilációs volumen [L/min], légzésszám [1/min],  $VO_2$  [mL/min],  $VCO_2$  [mL/min], RER, valamint a szisztolés és diasztolés vérnyomás [mmHg].

### **3.2.4. Vérminták és laboratóriumi vizsgálatok**

A mintavétel időpontjai megegyeztek az első vizsgálat során alkalmazottakkal (terhelés előtt, után, és a pihenési periódus 5. percében).

A vérminták vizsgálata során azonban kiegészült a laboratóriumi panel az alábbiakkal:

- Vércsere-analízis és biokémiai paraméterek:  $pO_2$ ,  $pCO_2$ , pH, laktát, kreatinin, glükóz – EPOC® Blood Analysis System (Siemens Healthineers AG, Erlangen, Németország).
- Laktátmérés: Nova Lactate Plus készülékkel (Nova Biomedical, USA).
- A viszkozitás, deformabilitás és aggregáció mérése a korábbi módszertannal azonos eszközökkel történt (Hevimet-40, LoRRca MaxSis Osmoscan, Myrenne MA-1).

### **3.2.5. Statisztikai elemzés**

Az adatelemzéshez a SigmaStat 3.1.1.0 szoftvert (Systat Software Inc., USA) alkalmaztuk. A csoportok közötti összehasonlításhoz t-próba vagy Mann–Whitney-teszt, míg az időfüggő változásokhoz ismételt mérések ANOVA-tesztje vagy Kruskal–Wallis-próba szolgált. A statisztikai szignifikancia szintje  $p < 0,05$  volt.

## 4. EREDMÉNYEK

### 4.1. Keresztmetszeti vizsgálat eredményei

#### 4.1.1. Hematológiai változások

A spiroergometriás terhelés minden vizsgálati csoportban szignifikáns változásokat okozott a hematológiai paraméterekben (III. táblázat). A fehérvérsejtszám, a trombocitaszám és a hematokritérték minden esetben nőtt a terhelést követően, jelezve az akut hemokoncentrációt. A legkifejezettebb emelkedés a fehérvérsejtszámban az jégkorongozók körében volt megfigyelhető, míg a vörösvérsejtszám és hematokrit elsősorban a nem edzett kontrollcsoportban emelkedett. A hemoglobín-koncentráció a terhelést követően mindhárom csoportban növekedett, míg az MCV enyhe, de statisztikailag is kimutatható emelkedést mutatott. A MCH és MCHC paraméterek nem változtak érdemben. Az eredmények összességében a rövid idejű, nagy intenzitású terhelés akut vértérfogat-csökkenést és sejtes komponens arány növekedést jeleznek, elsősorban a nem edzett személyeknél.

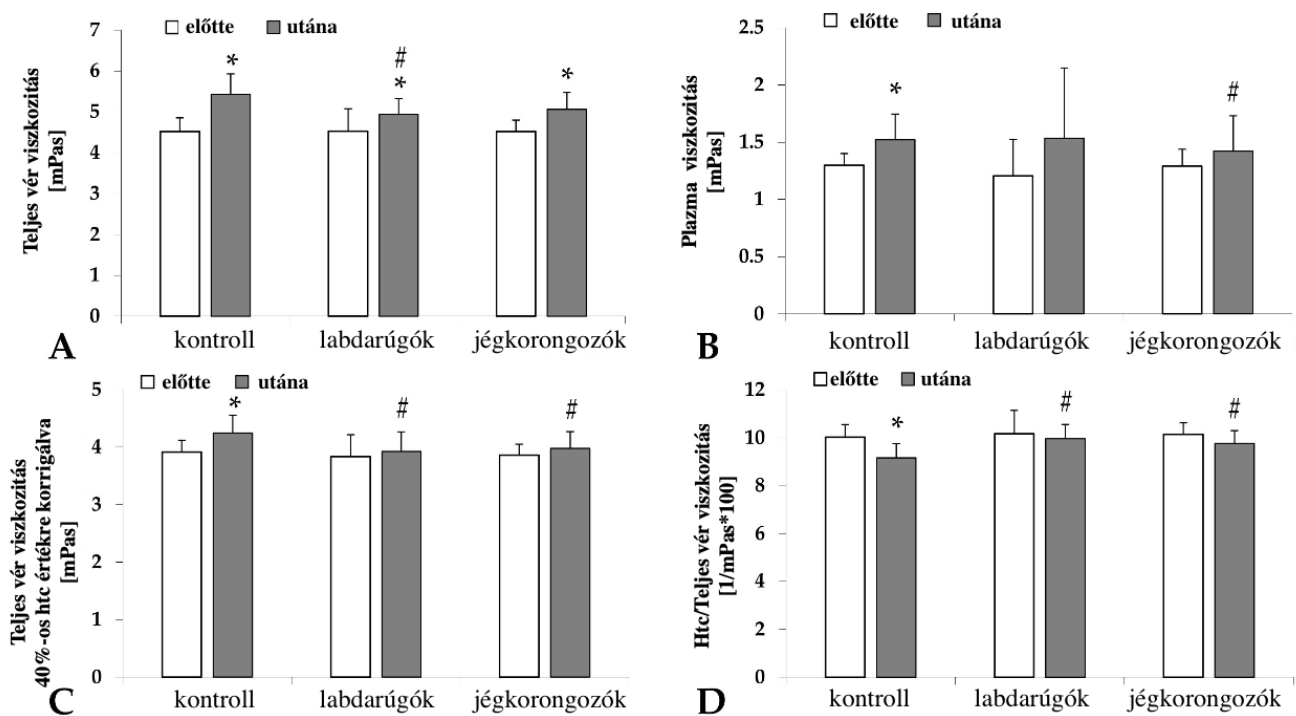
**III. táblázat.** A hematológiai paraméterek változásai a nem edzett kontrollcsoportban, valamint a hivatásos labdarúgók és jégkorongozók csoportjaiban a spiroergometriás vizsgálatnál végzett standardizált fizikai terhelés előtt és után.

Paraméterek	Kontroll csoport			Profi labdarúgók			Profi jégkorongozók		
	Előtte	Utána	Előtte / Utána hányados	Előtte	Utána	Előtte / Utána hányados	Előtte	Utána	Előtte / Utána hányados
WBC [ $\times 10^9$ /L]	6.53 $\pm 0.99$	11.86 $\pm 2.34^*$	1.81 $\pm 0.22$	5.22 $\pm 1.21 \#$	9.28 $\pm 2.39^* \#$	1.78 $\pm 0.37$	5.48 $\pm 0.84 \#$	11.01 $\pm 2.08^*, +$	2.05 $\pm 0.52$
Lymph [%]	37.36 $\pm 10.77$	46.24 $\pm 8.16^*$	1.28 $\pm 0.21$	32.39 $\pm 5.52$	43.47 $\pm 8.34^*$	1.31 $\pm 0.21$	34.12 $\pm 7.99 +$	35.01 $\pm 11.77 \#, +$	1.04 $\pm 0.27 \#, +$
Gr+Mo [%]	10.54 $\pm 2.23$	10.21 $\pm 2.78$	0.97 $\pm 0.16$	9.08 $\pm 2.54 \#$	8.43 $\pm 2.43 \#$	1.06 $\pm 0.47$	13.79 $\pm 3.85 \#, +$	11.44 $\pm 4.45 +$	0.82 $\pm 0.18 \#, +$
RBC [ $\times 10^{12}$ /L]	5.06 $\pm 0.25$	5.45 $\pm 0.25^*$	1.08 $\pm 0.03$	5.24 $\pm 0.19 \#$	5.53 $\pm 0.22^*$	1.06 $\pm 0.03 \#$	5.14 $\pm 0.33$	5.41 $\pm 0.41^*$	1.05 $\pm 0.03 \#$
Hct [%]	45.14 $\pm 2.11$	49.45 $\pm 2.29^*$	1.10 $\pm 0.03$	45.52 $\pm 1.56$	49.02 $\pm 1.42^*$	1.08 $\pm 0.03 \#$	45.71 $\pm 1.74$	49.27 $\pm 2.78^*$	1.08 $\pm 0.03$
Hgb [g/dl]	15.46 $\pm 0.84$	16.77 $\pm 0.97^*$	1.08 $\pm 0.03$	15.68 $\pm 0.73$	16.53 $\pm 1.07^*$	1.06 $\pm 0.06 \#$	15.65 $\pm 0.68$	17.86 $\pm 6.21^*$	1.14 $\pm 0.41 \#$
MCV [fL]	89.24 $\pm 3.05$	90.74 $\pm 2.87^*$	1.02 $\pm 0.01$	86.95 $\pm 3.07 \#$	88.62 $\pm 3.06^* \#$	1.02 $\pm 0.01$	89.09 $\pm 3.25 +$	91.21 $\pm 3.90^*, +$	1.02 $\pm 0.01 \#, +$
MCH [pg]	30.57 $\pm 1.34$	30.76 $\pm 1.49$	1.01 $\pm 0.01$	29.95 $\pm 1.47$	29.91 $\pm 2.33$	1.00 $\pm 0.06$	30.51 $\pm 1.12$	31.98 $\pm 1.15$	1.05 $\pm 0.21$
MCHC [g/L]	34.24 $\pm 0.72$	33.90 $\pm 0.85$	0.99 $\pm 0.02$	34.44 $\pm 0.89$	33.75 $\pm 2.19$	0.98 $\pm 0.06$	34.24 $\pm 0.54$	33.71 $\pm 0.64^*, +$	0.98 $\pm 0.02$
Plt [ $\times 10^9$ /L]	231.45 $\pm 49.71$	301.59 $\pm 66.13^*$	1.31 $\pm 0.08$	215.46 $\pm 22.61$	287.25 $\pm 41.43^*$	1.31 $\pm 0.14$	224.75 $\pm 38.89$	288.67 $\pm 45.53^*$	1.29 $\pm 0.10$
MPV [fL]	10.77 $\pm 0.77$	11.09 $\pm 0.91$	1.03 $\pm 0.03$	10.35 $\pm 1.23$	10.46 $\pm 1.19$	1.03 $\pm 0.03$	10.40 $\pm 0.92$	10.88 $\pm 1.00$	1.05 $\pm 0.04$

Átlag  $\pm$  S.D.; \* p < 0.05 vs. előtte, # p < 0.05 vs. kontroll csoport, és + p < 0.05 vs. profi labdarúgók

#### 4.1.2. Vér- és plazmaviszkozitás

A teljes vér- és plazmaviszkozitás a terhelést követően mindhárom csoportban nőtt, azonban a legnagyobb mértékű emelkedés a nem edzett kontrollcsoportban volt tapasztalható ( $p < 0,001$ ). A sportolói csoportokban – különösen a jégkorongozóknál – a viszkozitás-változás mértéke jóval mérsékeltebb volt. Amikor a teljes vérviszkozitást 40%-os hematokritra normalizáltuk, az eltérések még kifejezettebbé váltak: a korrigált WBV érték a kontrollcsoportban jelentősen emelkedett, míg a sportolók esetében stabil maradt. Ezzel párhuzamosan a hematokrit/viszkozitás arány a nem edzett csoportban szignifikánsan csökkent, ami a vérflow tulajdonságok romlására utal. A sportolók viszkozitási adatai – különösen az EImax/SS1/2 arányokkal együtt – kedvezőbb hemorheológiai állapotot tükröztek (3. ábra).

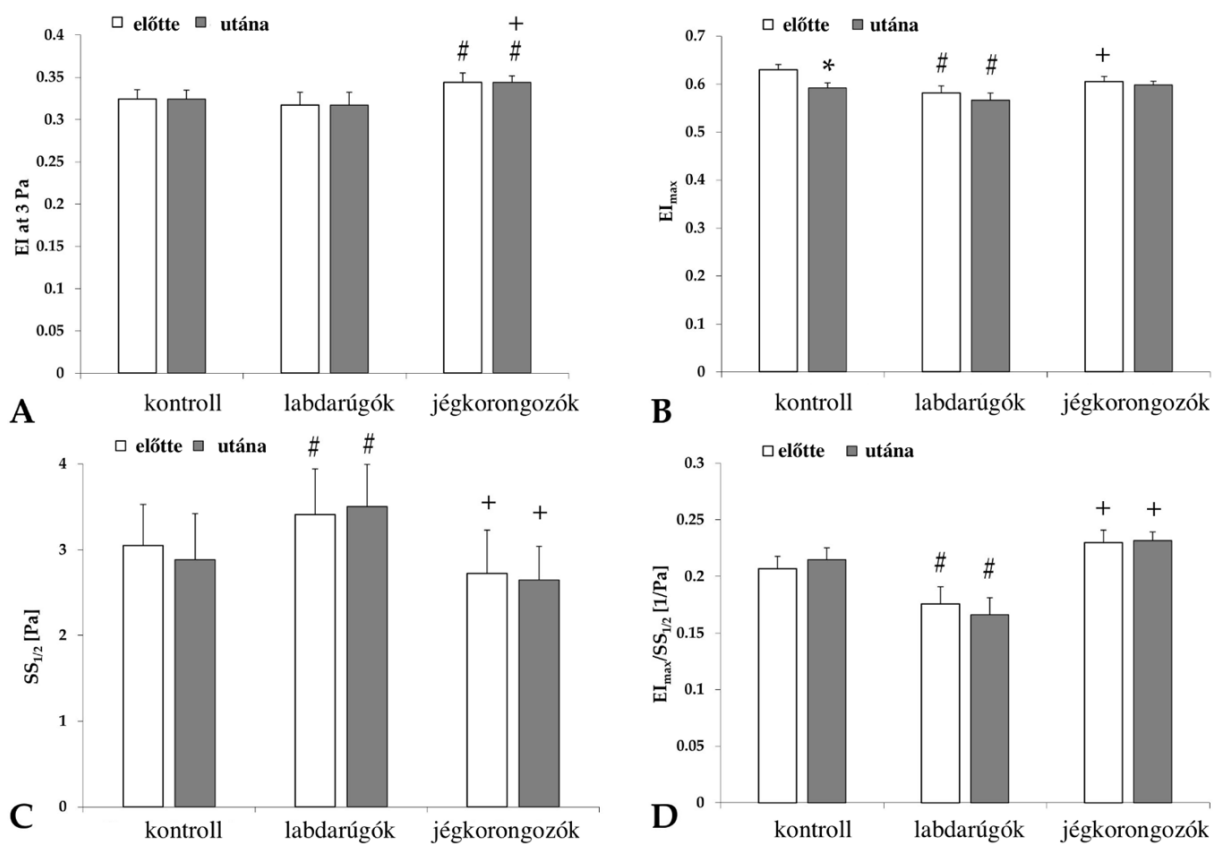


3. ábra

A teljes vér viszkozitásának ([mPas]) (A), a plazmaviszkozitásnak ([mPas]) (B), a 40%-os hematokritra korrigált teljes vérviszkozitásnak (C), valamint a hematokrit/viszkozitás aránynak (D) változásai a nem edzett kontrollcsoportban, illetve a hivatásos labdarúgók és jégkorongozók csoportjaiban, a spiroergometriával végzett standardizált fizikai terhelés előtt és után. Átlag  $\pm$  S.D.; \*  $p < 0,05$  az előtti értékhez képest, #  $p < 0,05$  a nem edzett csoporthoz képest.

### 4.1.3. Vörösvérsejt-deformabilitás

A nyírófeszültség-függő elongációs index (EI) értékek elemzése alapján a 3 Pa-n mért EI nem mutatott szignifikáns változást a terhelés hatására, azonban a maximális elongációs index (EI<sub>max</sub>) csökkenést mutatott, főként a nem edzett egyéneknél (p=0,045). A legmagasabb EI<sub>max</sub> értékeket a jégkorongozóknál mértük, akiknél a sejtek deformálhatósága terhelés után is kedvező maradt. A félmaximális elongációhoz tartozó nyírófeszültség (SS<sub>1/2</sub>) a labdarúgók csoportjában volt a legnagyobb, ami alacsonyabb deformabilitást jelezhet. A EI<sub>max</sub>/SS<sub>1/2</sub> hányados a legkedvezőbb a jégkorongozóknál volt, ami a sejtek mechanikai rugalmasságának jobb megőrzését jelzi (4. ábra).

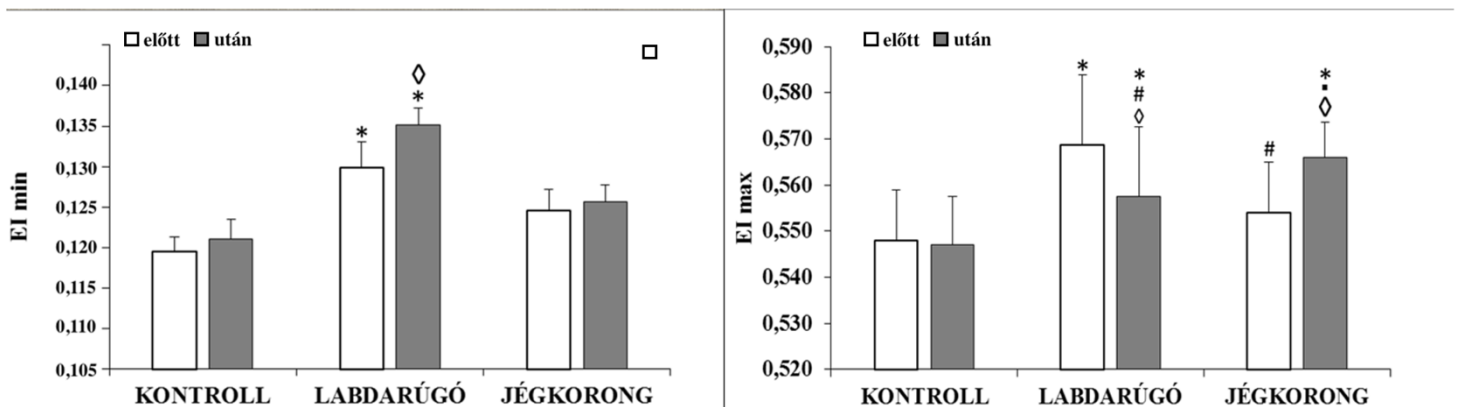


4. ábra

A vörösvérsejt-deformabilitási paraméterek változásai: a 3 Pa nyírófeszültségnél mért elongációs index (EI 3 Pa) (A), a maximális elongációs index (EI<sub>max</sub>) (B), a félmaximális elongációhoz tartozó nyírófeszültség (SS<sub>1/2</sub> [Pa]) (C), valamint az EI<sub>max</sub>/SS<sub>1/2</sub> hányados (D) a nem edzett kontrollcsoportban, illetve a hivatásos labdarúgók és jégkorongozók csoportjaiban, a spiroergometriával végzett standardizált fizikai terhelés előtt és után.

Átlag ± S.D.; \* p < 0,05 az előtti értékhez képest, # p < 0,05 a nem edzett csoporthoz képest, + p < 0,05 a hivatásos labdarúgókhoz képest.

Az ozmotikus gradiens (osmoscan) deformabilitás mérésnél az alkalmazott nyírófeszültség állandó (30Pa), a sejtek körüli ozmotikus közeg változik, egy jellegzetes osmoscan görbét mutatva, amelynek nevezetes pontjait hasonlítottuk össze. Az EI min esetében egyedül a labdarúgóknál volt jelentős különbség a kontroll csoport terhelés előtti és terhelés utáni eredményeihez képest. A maximális EI értékek magasabbnak bizonyultak már az alap méréseknél is a sportolóknban, mint a nem sportolóknban. A sportolók esetén terhelés hatására szignifikáns különbség található a saját, illetve a kontroll terhelés utáni eredményekhez is. Érdekes módon a két sportágban eltérő irányú változást találtunk, feltehetően a két sportágban jelenlevő terhelés különbsége miatt. (5. ábra)



5. ábra

Az osmoscan deformabilitási paraméterek (EImin, EImax) összehasonlítása a nem edzett, labdarúgó és jégkorongozó csoportok között a spiroergometriás terhelés előtt és után. A sportolók mindkét paraméter esetében kedvezőbb értékeket mutattak, a terhelés hatására pedig szignifikáns javulás volt kimutatható mindkét sportágban a kontroll eredményekhez képest és ellentétes irányú szignifikáns változás a saját terhelés előtti eredményekhez képest (\* $p < 0,05$ ). Átlag  $\pm$  SD \* $p < 0,05$  vs. kontroll előtt; ◊ $p < 0,05$  vs. kontroll után; # $p < 0,05$  vs. labdarúgó előtt; • $p < 0,05$  vs. jégkorong előtt

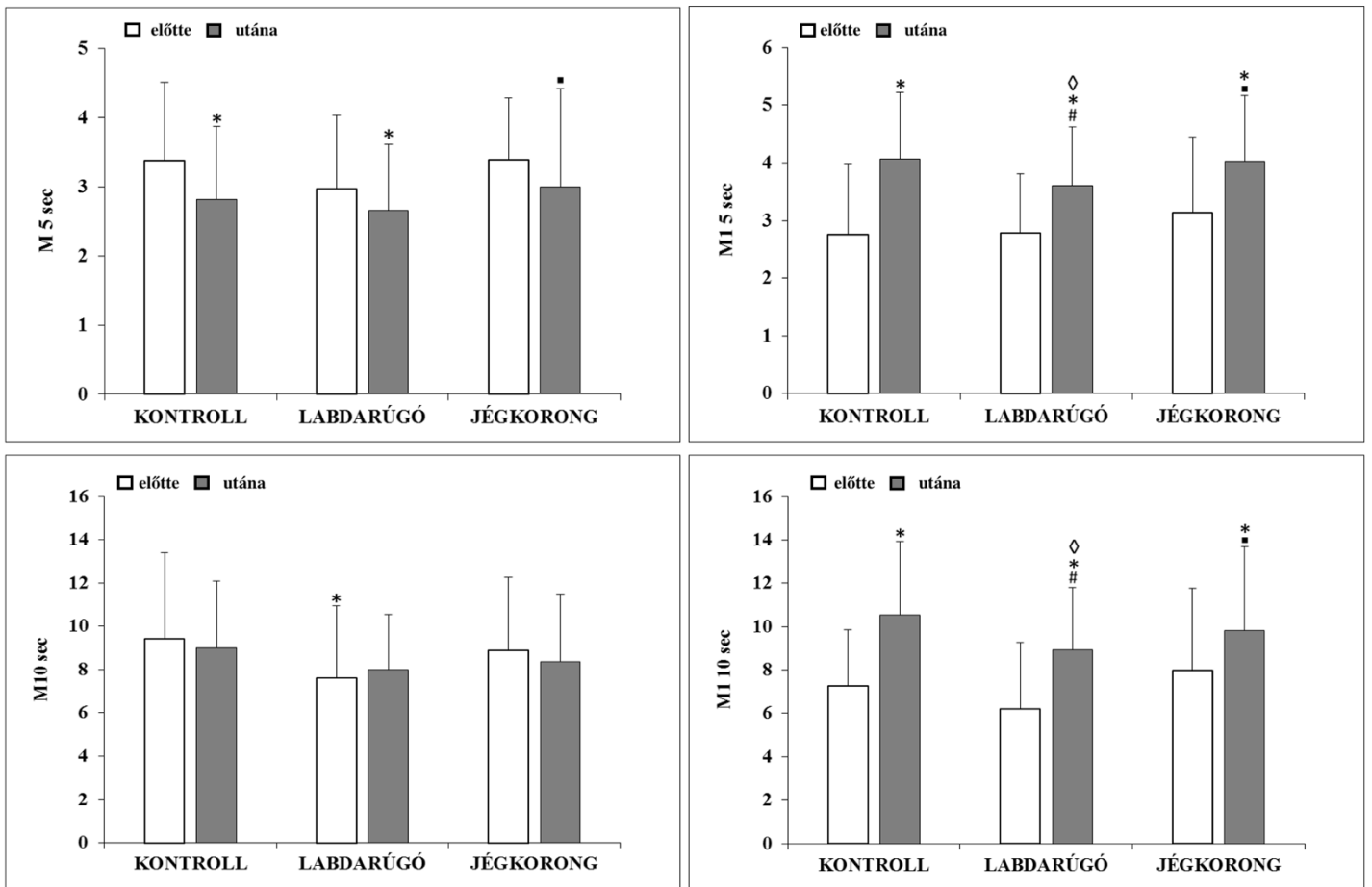
#### 4.1.4. Vörösvérsejt-aggregáció

A fénytranszmissziós aggregometria alapján az M1-indexek ( $3 \text{ s}^{-1}$  nyírófeszültségnél mért értékek) szignifikánsan növekedtek minden csoportban, legnagyobb mértékben a nem edzett egyéneknél. A M-indexek (statikus körülmények között) ezzel szemben csökkentek, ami a sejtek aggregációs dinamikájának változását tükrözi. (6. ábra)

A syllektometriás vizsgálat eredményei hasonló irányt mutattak: az aggregációs index (AI%) a terhelést követően emelkedett, legerősebben a nem edzett csoportban ( $p=0.003$ ). A futballistáknál és jégkorongozóknál a változások mérsékeltebbek voltak, utóbbiaknál volt a

paraméterek stabilitása a legnagyobb.

Ezek az eredmények arra utalnak, hogy az edzésadaptáció csökkenti az akut mikrorheológiai stresszválasz amplitúdóját, így a sportolóknál a vörösvérsejt-aggregáció kisebb mértékben reagál a rövid, intenzív terhelésre.



6. ábra

A vörösvérsejt-aggregációs paraméterek (M- és M1-indexek) változásai a nem edzett kontrollcsoportban, illetve a hivatásos labdarúgók és jégkorongozók csoportjaiban a spiroergometriás terhelés előtt és után. Átlag ± SD \*p<0,05 vs. kontroll SE; ◊p<0,05 vs. kontroll utána; #p<0,05 vs. labdarúgó előtte; •p<0,05 vs. jégkorong előtte.

#### 4.1.5. Laktát- és légzési paraméterek

A respirációs kvóciens (RER) a legmagasabb a nem edzett kontrollcsoportban volt, alacsonyabb a labdarúgóknál, és a legalacsonyabb a jégkorongozóknál.

A vérlaktát-koncentráció a terhelés után minden résztvevőnél emelkedett, a legnagyobb mértékben a labdarúgók esetében (átlag:  $14.94 \pm 3.01$  mmol/L), míg a jégkorongozóknál mérsékeltebb növekedés mutatkozott. A terhelés utáni 5. percben mért laktátértékek csak kismértékben csökkentek, ami arra utal, hogy a rövid intenzív terhelésből való regenerációnak csak a kezdeti szakasza zajlott a mérési időszakban. A RER és a laktátmax közötti korreláció a nem edzett egyéneknél volt a legerősebb ( $r^2=0.42$ ), ami az anyagcsere-válasz nagyobb érzékenységére utal az edzetlen szervezetben (IV. táblázat).

**IV. táblázat.** A respirációs kvóciens (RER), valamint a laktátkoncentráció (maximális és a terhelés utáni 5. percben mért értékek, illetve ezek hányadosa), továbbá az ezek közötti korrelációs együtthatók a nem edzett kontrollcsoportban, valamint a hivatásos labdarúgók és jégkorongozók csoportjaiban a spiroergometriával végzett standardizált fizikai terhelés után.

Csoportok	RER	Laktát <sub>max</sub> [mmol/L]	Laktát <sub>5'</sub> [mmol/L]	Laktát <sub>max</sub> / Laktát <sub>5'</sub>	R <sup>2</sup> ( RER és Laktát <sub>max</sub> )	R <sup>2</sup> ( RER és Laktát <sub>5'</sub> )
Kontroll csoport	$1.22 \pm 0.08$	$12.71 \pm 1.91$	$12.29 \pm 2$	$1.04 \pm 0.13$	0.4176	0.1319
Labdarúgók	$1.18 \pm 0.05$	$14.94 \pm 3.01$ #	$14.58 \pm 2.96$ #	$1.03 \pm 0.16$	0.0029	0.0287
Jégkorongozók	$1.13 \pm 0.04$ #,+	$13.26 \pm 1.96$	$12.53 \pm 2.16$	$1.07 \pm 0.14$	0.2027	0.1439

Átlag  $\pm$  S.D.; # p < 0.05 vs. kontroll csoport és + p < 0.05 vs. profi labdarúgók

#### 4.1.6. Összefoglalás

A vizsgálat fő megállapításai szerint:

- Az akut nagy intenzitású terhelés a nem edzett résztvevőkben sokkal kifejezettebb hemorheológiai és metabolikus változásokat váltott ki.
- A professzionális sportolók hemorheológiai státusza stabilabb maradt: kisebb mértékű hemokoncentráció, jobb vörösvérsejt-deformabilitás és mérsékeltebb aggregáció jellemezte őket.
- A jégkorongozók kedvezőbb mikrorheológiai profilja valószínűleg a rövidebb, de nagyobb intenzitású terheléshez való adaptációnak köszönhető, ami jobb mikrocirkulációs szabályozást eredményezhet.

- A laktát-clearance és a RER-értékek közötti különbségek az anyagcsere-folyamatok hatékonyságát tükrözik, melyek szorosan kapcsolódnak a hemorheológiai adaptációhoz.

## 4.2. Intervenciós vizsgálat eredményei (core-edzésprogram)

### 4.2.1. Testösszetétel és testtömeg-paraméterek

A három hónapos edzésprogramot követően nem volt kimutatható statisztikailag szignifikáns változás sem a testtömeg, sem a testtömegindex (BMI) tekintetében. Az aktív csoportban azonban enyhe, kedvező irányú testösszetétel-változás volt megfigyelhető: a testzsírszázalék kismértékben csökkent, ami arra utal, hogy már viszonylag rövid idő alatt is megindultak a pozitív adaptációs folyamatok a testösszetételben. Ez a tendencia bár nem ért el szignifikáns szintet, a zsírszövet-izomarány változása alapján a testösszetétel átrendeződésének kezdetét jelezheti.

### 4.2.2. Spiroergometriás vizsgálat

A spiroergometriás terhelések során a respirációs kvóciens (RER) a program végére enyhe növekedést mutatott, szignifikáns csoportkülönbség nélkül. A maximális vérlaktát koncentráció mindkét csoportban mérsékelt csökkenést mutatott, azonban a core-tréninget végző aktív csoportban egyértelműen gyorsabb laktát-clearance tendencia volt észlelhető a terhelést követően. Ez arra utal, hogy az intervenció végére javult a szervezet metabolikus melléktermékek eltávolítására való képessége, vagyis a regenerációs folyamatok hatékonysága is kedvezően változott, még akkor is, ha a csoportok közötti különbség statisztikailag nem bizonyult szignifikánsnak (V. táblázat).

**V. táblázat** A respirációs kvóciens (RER), a laktátkoncentráció (maximális és a terhelést követő 5. percben mért értékek, valamint ezek hányadosa), továbbá az ezek közötti korrelációs együtthatók a Kontroll és Aktív csoportban a spiroergometriával végzett standardizált fizikai terhelés előtt és után.

Paraméterek	Kontroll csoport		Aktív csoport	
	Kezdeti	3 hónappal későbbi visszamérés	Kezdeti	3 hónappal későbbi visszamérés
RER	1.11 ± 0.07	1.14 ± 0.09	1.13 ± 0.06	1.17 ± 0.07
Laktát <sub>max</sub> [mmol/L]	11.30 ± 2.22	10.61 ± 2.49	12.60 ± 1.95	11.74 ± 2.46
Laktát <sub>5'</sub> [mmol/L]	10.89 ± 2.05	10.23 ± 2.34	12.02 ± 2.11	10.25 ± 2.00
Laktát <sub>max</sub> / Laktát <sub>5'</sub>	1.06 ± 0.22	1.05 ± 0.16	1.06 ± 0.09	1.17 ± 0.28
5 perc alatti laktát csökkenés (%)	2 ± 19%	2 ± 18%	4 ± 9%	11 ± 14%
R <sup>2</sup> ( RER és Laktát 5')	0.4707	0.2199	0.2716	0.0503

Átlag ± S.D.

### 4.2.3. Vérgáz-, sav-bázis- és anyagcsere-paraméterek

A spiroergometriás vizsgálat során, az intenzív fizikai terhelésnek megfelelően, a vérgázértékek a várakozásoknak megfelelően módosultak: a  $pO_2$  növekedett, a  $pCO_2$  és a pH csökkent, míg a metabolit-koncentrációk emelkedtek. Mindkét csoportban hasonló irányú változások voltak megfigyelhetők, azonban a három hónapos periódus végére ezek változásainak mértéke csökkent, ami a terheléshez való fiziológiai adaptációra utal. A pH-csökkenés és a laktát-koncentráció emelkedésének mértéke nem különbözött szignifikánsan a két csoport között. A kreatinin-kináz szint a terhelést követően mindkét csoportban emelkedett, és az edzésprogram végén valamivel magasabb értékekről indult, ami a fokozott izomanyagcsere következményének tekinthető.

### 4.2.4. Hematológiai és hemorheológiai paraméterek

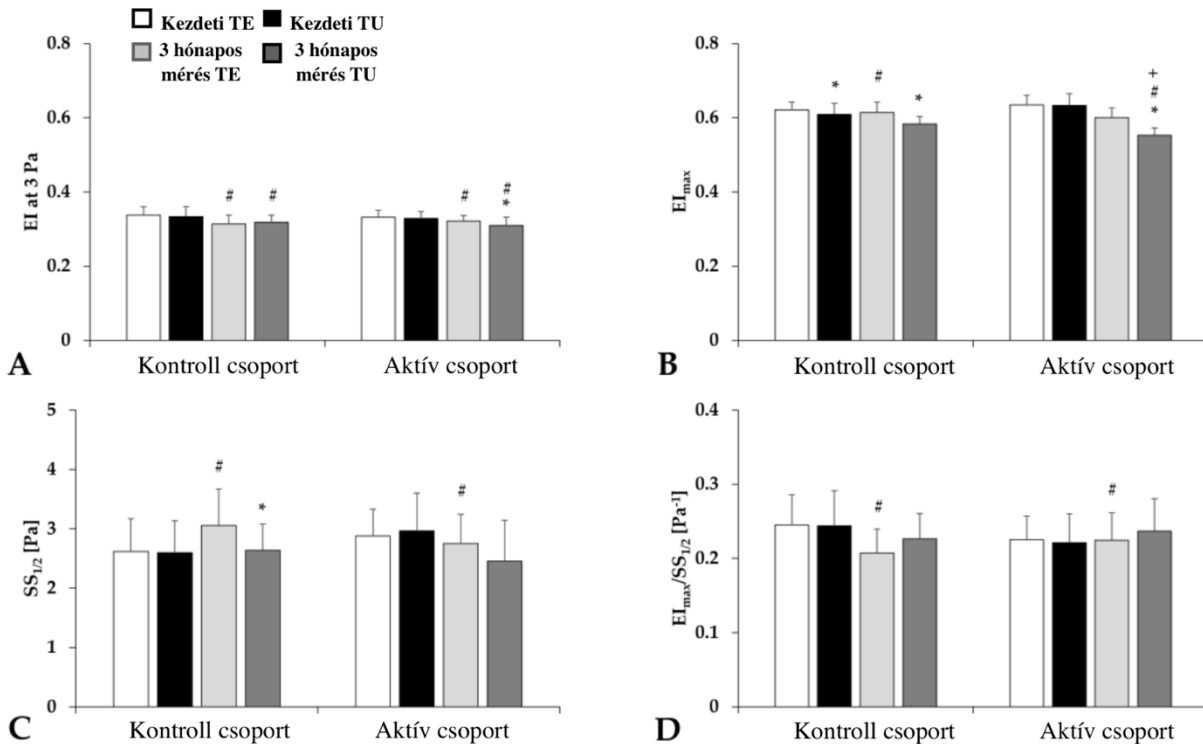
A spiroergometriás terhelés mindkét mérési időpontban szignifikáns emelkedést eredményezett a fehérvérsejt- és trombocitaszámban, függetlenül attól, hogy a résztvevők melyik csoportba tartoztak. A vörösvérsejtszám és a hematokritérték a terhelést követően szintén növekedett, ami mérsékelt hemokoncentrációra utal. A teljes vérviszkozitás az edzésprogram elején kifejezettebben növekedett a terhelés után, míg a három hónapos periódus végére ez a növekedés mérsékeltebbé vált, a tréning csoportban pedig még csökkenést is mutatott. A 40%-os hematokritra korrigált viszkozitási értékek szignifikánsan csökkentek a tréningcsoportban, ami a jobb reológiai adaptációt jelzi. A hematokrit és a viszkozitás hányadosa ezzel párhuzamosan növekedett, ami a vér folyási tulajdonságainak javulását tükrözi (VI. táblázat).

**VI. táblázat** A teljes vérviszkozitás (TVV), a plazmaviszkozitás (PV), a 40%-os hematokritra korrigált WBV-értékek, valamint a hematokrit és a vérviszkozitás hányadosának változásai a Kontroll és Aktív csoportban, a spiroergometriás terhelés előtt és után, a program kezdetén és a 3 hónapos intervenció végén végzett vizsgálatok alapján.

Paraméterek	Csoportok	Kezdeti			3 hónappal későbbi visszamérés		
		Terhelés előtt	Terhelés után	utána/előtte hányados	Terhelés előtt	Terhelés után	utána/előtte hányados
TVV [mPas]	Kontroll	5.03 ± 0.68	5.10 ± 0.56	1.02 ± 0.14	4.57 ± 0.52	5.07 ± 0.46 *	1.11 ± 0.11
	Aktív	4.70 ± 0.68	5.50 ± 0.64 *	1.18 ± 0.15	5.04 ± 1.01	4.98 ± 0.61 #	1.02 ± 0.20
PV [mPas]	Kontroll	1.45 ± 0.26	1.45 ± 0.34	1.02 ± 0.27	1.36 ± 0.27	1.63 ± 0.45 *	1.21 ± 0.31
	Aktív	1.45 ± 0.40	1.63 ± 0.27	1.10 ± 0.38	1.49 ± 0.48	1.66 ± 0.40	1.19 ± 0.41
TVV 40% [mPas]	Kontroll	4.41 ± 0.55	4.21 ± 0.46	0.97 ± 0.14	4.11 ± 0.55	4.21 ± 0.33	1.02 ± 0.09
	Aktív	4.07 ± 0.48	4.55 ± 0.43 *	1.07 ± 0.29	4.37 ± 0.84	4.11 ± 0.30 #	0.97 ± 0.19
Hct/TVV	Kontroll	9.04 ± 1.02	9.30 ± 0.88	1.04 ± 0.18	9.76 ± 1.25	9.40 ± 0.78	0.99 ± 0.10
	Aktív	9.82 ± 1.21	8.73 ± 0.88 *	0.90 ± 0.12	9.25 ± 1.56	9.73 ± 0.79 #	1.09 ± 0.29

Átlag ± S.D.; \* p < 0.05 vs. terhelés előtt, # p < 0.05 vs. kezdeti.

A vörösvérsejt-deformabilitás görbék (elongációs index – nyírófeszültség) elemzésekor mindkét csoportban kismértékű csökkenés volt tapasztalható a terhelést követően. A 3 Pa nyírófeszültségnél mért elongációs index (EI3Pa) szignifikánsan csökkent, az EI<sub>max</sub> mérsékelten esett vissza, míg az SS<sub>1/2</sub> értékek kisebb mértékű, nem egységes változást mutattak (7. ábra).

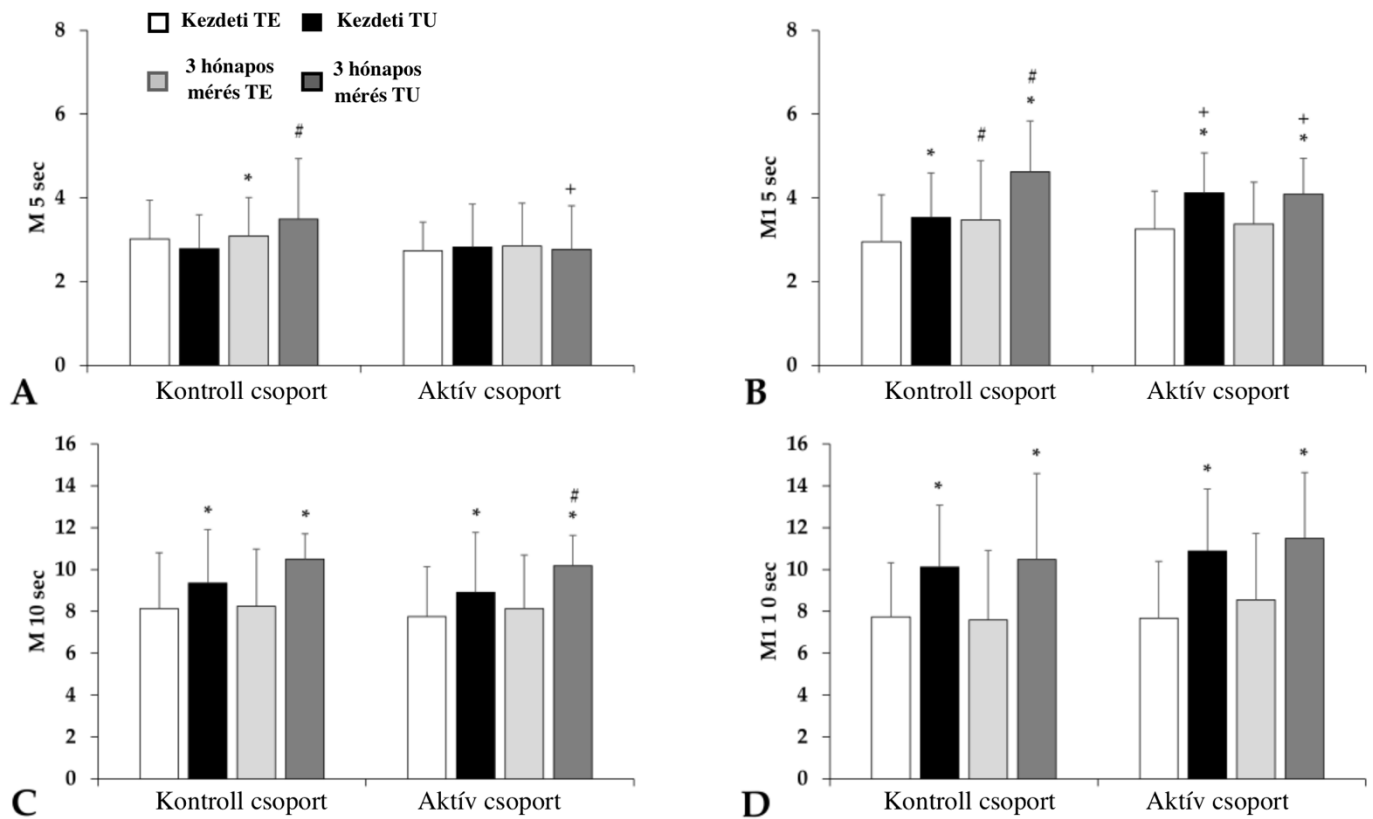


7. ábra

A 3 Pa nyírófeszültségnél mért elongációs index (EI) (A), a maximális elongációs index (EI<sub>max</sub>) (B), a félmaximális EI-hez tartozó nyírófeszültség (SS<sub>1/2</sub>) (C), valamint ezek hányadosa (D) a Kontroll és Aktív csoportban, a spiroergometriás terhelés előtt (TE) és után (TU), a program kezdetén és a 3 hónapos intervenció végén végzett vizsgálatok alapján.

Átlag ± S.D.; \* p < 0,05 a spiroergometriát megelőző értékhez képest; # p < 0,05 az alapméréshez képest; + p < 0,05 a Kontroll csoportéhoz képest.

A vörösvérsejt-aggregációs indexek (M-értékek) szintén növekedtek a terhelés után, csoportok közötti szignifikáns különbség nélkül (8. ábra).



8. ábra

A fénytranszmissziós módszerrel mért aggregációs indexértékek: M 5 s (A), M1 5 s (B), M 10 s (C) és M1 10 s (D) a Kontroll- és a Tréningcsoportban, a spiroergometriás (SE) terhelés előtt és után, a program kezdetén (alpmérés) és a 3 hónapos intervenció végén végzett vizsgálatok alapján.

Átlag ± S.D.; \*  $p < 0,05$  a spiroergometriát megelőző értékhez képest; #  $p < 0,05$  az alpméréshez képest; +  $p < 0,05$  a Kontrollcsoporthoz képest.

A syllektometriás aggregációs index enyhén emelkedett, míg az amplitúdó (Amp) és a félidő ( $t_{1/2}$ ) értékek a tréningcsoportban csökkentek. Ez a mintázat a sejtek aggregációs dinamikájának adaptív átrendeződését tükrözi, ami a mikrocirkuláció hatékonyabb szabályozását és a terheléshez való rheológiai alkalmazkodást valószínűsíti.

#### 4.2.5. Összegzés

A három hónapos core-izomerősítő tréningprogram a vizsgált időtartam alatt nem eredményezett jelentős testösszetétel változást, azonban több élettani és hemorheológiai paraméterben kedvező irányú adaptációs tendencia volt kimutatható.

A legmarkánsabb eltérés a tréningcsoportban a vérviszkozitás-csökkenés, valamint a deformabilitás és aggregációs mutatók mérséklődő reakciója volt a terhelésre, ami a vér reológiai stabilitásának javulását jelzi.

Ezek az eredmények alátámasztják, hogy már rövid időtartamú, célzott core-izomfejlesztő tréning is képes mikrorheológiai szinten mérhető változásokat kiváltani, ami hozzájárulhat a hosszabb távú aerob teljesítményjavuláshoz és fiziológiai hatékonysághoz.

## 5. MEGBESZÉLÉS

Kutatásunk két, egymást kiegészítő megközelítést alkalmazott a hemorheológiai adaptációk és a fizikai teljesítőképesség közötti összefüggések feltárására: egy keresztmetszeti vizsgálatot különböző edzettségi szintű sportolók és nem edzett személyek bevonásával, valamint egy prospektív, három hónapos edzésintervenciót követő vizsgálatot, amelyben a core-izomfejlesztő tréning hatásait elemeztük.

Eredményeink középpontjában a vér rheológiai tulajdonságainak és az aerob teljesítményélettani paramétereknek a kapcsolata áll, különös tekintettel a vörösvérsejt-deformabilitás, az aggregáció, a viszkozitás és a  $VO_2\text{max}$ , valamint a laktátküszöb közötti összefüggésekre.

A kutatómunkám első részének célja annak értékelése, hogy a rendszeres fizikai aktivitás és a célzott edzésprogramok miként befolyásolják a vér sejt és plazma komponenseinek viszkoelasztikus tulajdonságait, továbbá milyen módon járulnak hozzá a sportolók teljesítményének és regenerációs képességének optimalizálásához. Az eredmények értelmezése során külön figyelmet fordítunk a hemorheológiai adaptációk élettani, sejtmechanikai és keringési jelentőségére, valamint ezek potenciális diagnosztikai és edzésmonitorozási alkalmazásaira.

### 5.1. Hemorheológiai adaptációk és élettani összefüggések a keresztmetszeti vizsgálatunkban

A vizsgálataink során kapott adatok megerősítik, hogy a fizikai edzettség és a rendszeres sporttevékenység szoros kapcsolatban áll a vér reológiai tulajdonságaival, különösen a vörösvérsejtek deformabilitásával és aggregációs dinamikájával. Ezek a sejtszintű jellemzők meghatározó szerepet töltenek be az oxigénszállítás hatékonyságában, és ezáltal közvetlenül befolyásolják a teljesítményélettani kapacitást, különösen az aerob energiaellátás szempontjából kritikus fázisokban [9,10].

A keresztmetszeti vizsgálat eredményei alapján a magasabb edzettségi szinttel rendelkező sportolók (hivatásos labdarúgók és jégkorongozók) esetében a teljes vér- és plazmaviszkozitás alacsonyabb értéket mutatott, mint a nem edzett kontrollcsoportban, miközben a hematokrit értékek hasonló tartományban maradtak. Ez arra utal, hogy az edzésadaptáció nem a hematológiai paraméterek mennyiségi eltolódásával, hanem a sejtek mechanikai tulajdonságainak optimalizálásával jár együtt. [15]

A 40%-os hematokritra korrigált viszkozitás értékei és a hematokrit/viszkozitás arány is kedvezőbb értékeket mutattak, ami a mikrocirkulációs ellenállás csökkenésére és a véráramlás hatékonyságának növekedésére utal.

A vörösvérsejt-deformabilitás vizsgálata (elongációs index – nyírófeszültség görbék) megerősítette, hogy a sportolók sejtjei rugalmasabban reagálnak a mechanikai terhelésre. Az elongációs index (EI) értékei – különösen az EI<sub>max</sub> és az EI<sub>3Pa</sub> – szignifikánsan magasabbak voltak az edzett csoportokban, míg a félmaximális nyírófeszültséghez tartozó SS<sub>1/2</sub> értékek alacsonyabbak maradtak, jelezve a sejtek kedvező deformálhatóságát és jobb membránfluiditását [46]. Ezek a jellemzők az irodalmi adatokkal összhangban állnak, amelyek szerint a rendszeres fizikai aktivitás a vörösvérsejt-membrán lipidösszetételének és citoskeletális elemeinek adaptív átrendeződését váltja ki, javítva a sejtek rugalmasságát és átjutási képességét a kapilláris hálózaton [31,33].

Az akut fizikai terhelést követően észlelt viszkozitásnövekedés, valamint a deformabilitás átmeneti csökkenése jól ismert fiziológiás jelenség, amely a hemokoncentráció és a mechanikai stressz következménye [47]. A tréningprogram végére azonban ezeknek az akut változásoknak a mértéke szignifikánsan mérséklődött, ami a reológiai stabilitás javulását és az edzéshez való mikroszkopikus szintű adaptációt jelzi. A három hónapos core-izomerősítő program tehát nemcsak az izomkoordinációra és a testkompozícióra hatott, hanem mérhetően befolyásolta a vér sejtjes komponenseinek dinamikus tulajdonságait is.

A vörösvérsejt-aggregációs paraméterek (M- és M<sub>1</sub>-indexek, AI%) változásai szintén az adaptáció irányába mutattak. A sportolói csoportokban a terhelés utáni aggregációs válasz mérsékeltebb volt, mint a nem edzett résztvevőknél, ami azt jelzi, hogy az edzett egyének szervezete kevésbé érzékeny az akut mikrorheológiai stresszre. Ez az adaptív válasz kulcsfontosságú lehet a hosszabb távú teljesítményfenntartásban, mivel az aggregáció fokozódása a mikrokeringés romlásához és a perifériás oxigénellátás csökkenéséhez vezethetne [48,52]. A jelen vizsgálatban a sportolóknál mért alacsonyabb aggregációs reaktivitás ezért a vérkeringés hatékonyságának védőmechanizmusát tükrözi, amelyet a rendszeres edzés alakít ki.

Ezek az eredmények megerősítik, hogy a hemorheológiai paraméterek – különösen a vörösvérsejt-deformabilitás és -aggregáció – érzékeny indikátorai a fizikai terheléshez való adaptációnak. A mikrocirkulációs viszonyok optimalizálása a sportolói szervezetben nemcsak

a gázcsere és tápanyagszállítás hatékonyságát javítja, hanem hozzájárul a regenerációs folyamatok gyorsulásához és a fáradékonyság csökkenéséhez is [49,58]. A deformabilitási és viszkozitási paraméterek javulása a sejtszintű oxigénfelhasználás optimalizálásával együtt tehát egyértelműen teljesítményélettani előnyt jelent az edzett populációk számára [50].

## **5.2. A core-tréning hatásainak élettani magyarázata és teljesítményélettani vonatkozásai**

A három hónapos core-izomfejlesztő program célja nem elsősorban a klasszikus állóképességi paraméterek növelése volt, hanem a törzsizomzat stabilizáló és koordinációs funkcióinak fejlesztése, amely a mozgáslánc hatékonyságán keresztül közvetetten befolyásolhatja a teljesítményélettani és keringési mutatókat is. Az eredmények alapján azonban a program szisztémás élettani adaptációkat is előidézett, amelyek jól nyomon követhetők a hemorheológiai és metabolikus paraméterek változásaiban.

A core-izomzat aktiválása és megerősítése fokozza a légzési mechanika hatékonyságát és a vénás visszaáramlást, ami hozzájárul a keringési perctérfogat optimalizálásához, különösen nagy intenzitású terhelések során [87, 88]. A mély stabilizáló izmok (m. transversus abdominis, multifidus, diaphragma és a medencefenék izmai) összehangolt működése a hasi nyomás és a mellkasi nyomás dinamikus szabályozásán keresztül javítja a centrális hemodinamikát, ami kedvezően befolyásolhatja az oxigénszállítást és a mikrokeringést. E mechanikai stabilizáció révén a szív-keringési rendszer tehermentesül, és hatékonyabbá válik a perifériás perfúzió, ez részben magyarázhatja a tréningcsoportban megfigyelt vérviszkozitás-csökkenést és a deformabilitás javulást is.

A mikrocirkuláció javulása és a rheológiai paraméterek kedvező irányú változása feltehetően a krónikus shear-stressz adaptáció eredménye. A rendszeres izomműködés és a fokozatos terhelés során a kapilláris endothelben fokozódik a nitrogén-monoxid (NO) termelés, amely vasodilatációt, antitrombotikus hatást és membrán-fluiditást segítő sejtszintű változásokat indukál [74,76]. Ez a folyamat a vörösvérsejt-membrán viszkoelasztikus tulajdonságainak javulásával együtt hozzájárul a mikroperfúzió stabilizálásához, és ezáltal a szöveti oxigénellátás hatékonyságához.

A vizsgálatban kimutatott, a tréningcsoportban jelentkező mérsékelt hemokoncentrációs válasz és csökkent akut viszkozitás emelkedés szintén az edzéshez való érrendszeri adaptáció következménye lehet [36]. Az edzett szervezetben a kapilláris-denzitás növekedése, a plazmatérfogat bővülése és a vörösvérsejt-membrán szerkezeti stabilitásának javulása mind

hozzájárulnak ahhoz, hogy a terhelés alatti véráramlási ellenállás kisebb mértékben nő, így a vér dinamikus rheológiai viselkedése kevésbé változik meg akut stressz hatására [34].

A core-tréning hatása az energetikai rendszerekre is kiterjed. A spiroergometriai adatok alapján a respirációs kvóciens (RER) enyhe növekedése, valamint a gyorsabb laktát elimináció a javuló oxidatív metabolizmus és az anaerob kapacitás hatékonyabb kihasználása felé mutat [30,41]. Az izomműködés koordináltabbá válása, a stabilizáló funkciók erősödése és a mozgásgazdaságosság növekedése mind hozzájárulhatnak ahhoz, hogy a szervezet kisebb metabolikus stressz mellett érje el ugyanazt a teljesítményt, ami hosszabb távon az aerob energiarendszer dominanciáját erősíti.

A hemorheológiai és spiroergometriai eredmények közötti korrelációk különösen értékesek: a vörösvérsejt-deformabilitás és a  $VO_2\text{max}$ , illetve a laktátküszöb-intenzitás közötti pozitív összefüggés alátámasztja, hogy a mikrocirkulációs hatékonyság javulása direkt módon befolyásolja az aerob teljesítményt. A jobb deformabilitású sejtek gyorsabban és egyenletesebben juttatják el az oxigént a perifériás szövetekhez, ami késlelteti a laktát-akkumulációt, növeli a fáradással szembeni ellenállást, és javítja a regenerációs kapacitást [44,46].

Ez a kapcsolat megerősíti a hipotézist, hogy a hemorheológiai jellemzők nem csupán kísérő jelenségei a fizikai adaptációnak, hanem annak aktív mediátorai lehetnek.

A core-tréninggel elért változások tehát túlmutatnak a mozgás-stabilizációs funkciókon: a keringési, reológiai és metabolikus adaptációk révén a teljes szervezet működési hatékonyságát növelik. Mindez alátámasztja, hogy a törzsizomzat fejlesztése nemcsak biomechanikai, hanem szisztémás teljesítményélettani előnyökkel is jár, amelyek a mikrocirkuláció, oxigéntranszport és sejtszintű anyagcsere optimalizálása révén valósulnak meg [87].

### **5.3. A hemorheológiai paraméterek, mint potenciális biomarkerek és diagnosztikai eszközök**

A vizsgálataink eredményei azt mutatják, hogy a vér hemorheológiai tulajdonságai - különösen a vörösvérsejt-deformabilitás, az aggregációs indexek és a viszkozitási értékek - érzékenyen tükrözik az edzettségi állapotot, a terhelésadaptációt és a regenerációs folyamatokat. Ez a megfigyelés alapot teremt arra, hogy e paramétereket potenciális biomarkerekként alkalmazzuk a sportteljesítmény és az élettani állapot monitorozásában [47].

A hagyományos teljesítménydiagnosztikai módszerek, mint a  $VO_2\max$ , a laktátküszöb és a ventilációs paraméterek, elsősorban a rendszerszintű élettani funkciókat értékelik [14]. A hemorheológiai mérések ezzel szemben sejtszintű információt nyújtanak a keringés hatékonyságáról, a szöveti oxigénellátásról és a véráramlási ellenállás mikroszkopikus változásairól. Ez különösen értékes lehet azokban az esetekben, amikor a sportoló funkcionálisan jól teljesít, de szubklinikus keringési vagy regenerációs zavarok állnak fenn, amelyek a klasszikus paraméterekkel nem mindig detektálhatók [15].

A vörösvérsejt-deformabilitás például a mikrocirkulációs hatékonyság közvetlen indikátora, mivel a sejtek alakváltoztató képessége határozza meg, mennyire képesek a legkisebb kapillárisokon is átjutni, így oxigént juttatni a perifériás szövetekhez. E paraméter romlás a sportolók esetében a teljesítmény romlásához, fokozott oxidatív stresszhez, és lassabb regenerációhoz vezethet.

Ezzel szemben a deformabilitás javulása, mint azt jelen kutatás kimutatta egyértelműen jobb aerob kapacitással és hatékonyabb laktát-clearance-szel társul, ami a fiziológiai állapot egyik kulcsindikátora lehet [80].

A plazma- és teljes vérviszkózitás szintén objektív visszajelzést ad a keringési terheléshez való alkalmazkodásról. A három hónapos core-tréninget követően mért viszkózitás-csökkenés és a 40%-os hematokritra korrigált WBC javulása azt mutatja, hogy a véráramlás energetikai igénye csökken, azaz kisebb nyomáskülönbség mellett hatékonyabb perfúzió valósulhat meg [18,31]. Ez a jelenség a keringési gazdaságosság növekedésére utal, amely hosszú távon jobb állóképességi teljesítményben is megnyilvánulhat.

Az aggregációs paraméterek (M, M1, AI%) a vörösvérsejtek közötti kölcsönhatások érzékeny mutatói, amelyek dinamikusan reagálnak a terhelésre, a hidratációs állapotra és az oxidatív stresszre.

A mi eredményeinkben az akut terhelés utáni aggregációs válasz csökkenése a tréningcsoportban azt jelzi, hogy az edzésadaptáció stabilizálja a mikrorheológiai homeosztázist, csökkentve a sejtek kóros összecsapódási hajlamát. Ez a tulajdonság sportorvosi szempontból különösen értékes lehet, hiszen a túlzott aggregáció mikrocirkulációs blokkokhoz és teljesítményromláshoz vezethet, míg az optimális aggregáció dinamikus, rugalmas véráramlást biztosít.

A hemorheológiai profil tehát komplex, de jól értelmezhető élettani lenyomata a sportoló aktuális állapotának. A különböző paraméterek (viszkozitás, deformabilitás, aggregáció) együttes vizsgálata lehetőséget ad egyéni edzésmonitorozásra, az adaptációs folyamatok nyomon követésére, valamint a fáradtság és túlterhelés korai felismerésére. A jövőben ezek az adatok a sportdiagnosztikai laboratóriumi vizsgálatok szerves részévé válhatnak, akár a VO<sub>2</sub>max-teszt vagy a laktátanalízis mellett, mint sejtalapú biomarkerek.

Összességében eredményeink azt támasztják alá, hogy a hemorheológiai mérések - különösen a vörösvérsejt-deformabilitás és a plazmaviszkozitás vizsgálata - új diagnosztikai dimenziót nyithatnak a sportorvosi értékelésben. A rendszeres fizikai aktivitás során bekövetkező mikrocirkulációs adaptációk nemcsak indikátorai, hanem előidézői is lehetnek a teljesítményfokozódásnak, ezért a jövőbeni kutatásokban a hemorheológiai paraméterek integrált biomarkerként való alkalmazása ígéretes irányt képvisel.

#### **5.4. A kutatás eredményeinek klinikai és gyakorlati jelentősége**

A vizsgálataink során feltárt hemorheológiai és teljesítményélettani összefüggések nemcsak tudományos szempontból relevánsak, hanem közvetlen gyakorlati alkalmazhatósággal is bírnak a sportorvosi diagnosztika, az edzésmonitorozás, a rehabilitáció és a katonai alkalmasság értékelése területén. A vörösvérsejtek deformabilitásának, aggregációs tulajdonságainak és a vér viszkozitásának változásai ugyanis érzékenyek a terhelés, az edzettségi állapot és a regenerációs folyamat finom eltéréseire is, olyan különbségekre, amelyek a hagyományos diagnosztikai módszerekkel gyakran nem, vagy csak későn detektálhatók.

A sportolók esetében a mikrocirkuláció hatékonysága kulcsfontosságú tényező a teljesítmény fenntartásában és optimalizálásában. Eredményeink alapján a hemorheológiai paraméterek, különösen a vörösvérsejt-deformabilitás és a plazma viszkozitása alkalmasak lehetnek a teljesítményállapot korai változásainak jelzésére, illetve a túlterhelés és az alulregeneráltság felismerésére. A sportolóknál mért kedvezőbb deformabilitási mutatók és az akut terhelésre adott mérsékeltebb aggregációs válasz azt sugallják, hogy ezek a paraméterek hatékonyan használhatók az edzésmennyiség intenzitás egyensúlyának finomhangolására is.

A rehabilitáció területén a hemorheológiai mérések hozzáadott értéket képviselhetnek olyan esetekben, amikor a klinikai funkciók javulása és az objektív állóképességi mutatók még nem teljesen korrelálnak. A vörösvérsejt deformabilitás és aggregáció változásai gyakran korábban jelzik a funkcionális állapot javulását, mint a hagyományos teljesítményvizsgálatok [72]. Ez a

tulajdonság különösen előnyös lehet sérülés utáni felépülésnél vagy krónikus terhelés okozta kimerülési szindrómák monitorozásánál, amikor a szervezet mikroszkopikus adaptációi már megindultak, de a teljesítmény még elmarad a korábbi szinttől.

Katonai környezetben a fizikai terheléshez való adaptáció objektív értékelése kiemelten fontos. Eredményeink alapján a hemorheológiai paraméterek érzékenyen reagáltak a három hónapos core-tréning program által kiváltott változásokra, ami azt jelzi, hogy a rendszeres fizikai aktivitás mikroszkopikus szinten is javítja az oxigénszállítás és perfúzió hatékonyságát [4]. A katonai felkészítésben ezek a biomarkerek alkalmasak lehetnek a kiválasztási folyamat finomítására, az egyéni adaptáció ütemének követésére, valamint az extrém terhelésre való alkalmasság megítélésére is.

A fejlett sportdiagnosztikai rendszerek egyre inkább integrálják a multidimenzionális adatokat kardiovaszkuláris, metabolikus, neuromuszkuláris és pszichés paraméterek mellett a hemorheológiai mutatók beemelésé új lehetőséget jelent. A jelen vizsgálat hozzájárul ahhoz a felismeréshez, hogy a vér mikromechanikai tulajdonságai nem pusztán következményei, hanem lehetséges meghatározói is a teljesítményadaptációnak, így a jövőben ezek a paraméterek fontos szerepet tölthetnek be az egyénre szabott edzésprogramok tervezésében.

Összességében eredményeink azt mutatják, hogy a hemorheológiai vizsgálatok különösen a vörösvérsejt-deformabilitás, az aggregációs indexek és a vér viszkozitásának mérése értékes és informatív kiegészítő elemei lehetnek a sportorvosi és teljesítménydiagnosztikai értékelésnek. Az ilyen jellegű vizsgálatok integrálása a gyakorlatba hozzájárulhat a sportolók terhelésélettani állapotának pontosabb felméréséhez, a fejlődés nyomon követéséhez, valamint a sérülések és túlterhelés kockázatának csökkentéséhez. A hemorheológiai paraméterek alkalmazása így mind a sportolói, mind a katonai és rekreációs populációkban ígéretes, további fejlesztésre érdemes területet képvisel.

### **5.5. A kutatás korlátai és limitáló tényezők**

Bár a jelen vizsgálat eredményei értékes információkat szolgáltatnak a hemorheológiai adaptációk és a fizikai teljesítmény kapcsolatáról, a kutatásnak több olyan korlátja is van, amelyet a következtetések értelmezésekor figyelembe kell venni.

Az egyik legfontosabb limitáló tényező a viszonylag kis mintanagyság. A vizsgálatok során a csoportok létszáma (11–18 fő) nem tette lehetővé a populációs szintű általánosítást, és a

statisztikai erő korlátozott volt a kisebb hatásméretű különbségek kimutatására. Ennek ellenére az eredmények konzisztensen mutattak irányt a fő élettani változások tekintetében, ami alátámasztja azok biológiai relevanciáját.

A résztvevők heterogenitása különösen a testösszetétel, az előzetes edzettségi szint és a sportági háttér tekintetében szintén befolyásolhatta az eredményeket. Bár a csoportok között az életkor, testmagasság és testtömeg tekintetében nem volt szignifikáns különbség, az egyéni edzéstörténet és a genetikai tényezők eltérései hatással lehettek a hemorheológiai adaptációk mértékére.

A terhelési protokoll standardizálása (Vitamaxima 12-protokoll) a reprodukálhatóság érdekében indokolt volt, ugyanakkor korlátozta a vizsgálat által nyújtott információkat. A futószalagos spiroergometria a futballisták és jégkorongozók esetében nem feltétlenül tükrözi a sportágspecifikus mozgásmintákat és izomaktivációs mintázatokat, így a kardiovaszkuláris és mikrocirkulációs válaszok némileg eltérhetnek a valós játéksituációk során tapasztalható fiziológiai terheléstől.

A laboratóriumi hemorheológiai mérések további metodikai korlátot jelentenek. A mért paraméterek (pl. elongációs index, aggregációs index, viszkozitás) in vitro körülmények között, meghatározott hőmérsékleten és nyírófeszültségen kerültek meghatározásra, ami nem feltétlenül tükrözi a vér valódi, dinamikus változó viselkedését in vivo környezetben. Emellett a mérésekre használt berendezések (Hevimet-40, LoRRca MaxSis Osmoscan, Myrenne aggregométer) eltérő elven működnek, és bizonyos paraméterek közvetlen összehasonlítása korlátozott lehet.

További korlátot jelent a vizsgálatok időtávja. A három hónapos intervenció elegendőnek bizonyult az adaptációs irányvonalak megjelenéséhez, de valószínű, hogy a hemorheológiai és mikrocirkulációs alkalmazkodások teljes kifejlődéséhez hosszabb, 6–12 hónapos megfigyelési periódus lenne szükséges. Hosszabb távú vizsgálatok lehetővé tennék a paraméterek stabilitásának, a visszafordíthatóságának és a detraining-hatásoknak a pontosabb feltérképezését is.

A statisztikai elemzések során alkalmazott módszerek (t-próba, Mann–Whitney, Wilcoxon, ANOVA) megfelelőek voltak a különbségek kimutatására, ugyanakkor a többszörös összehasonlításokból fakadó hibakockázat (Type I error) nem zárható ki teljesen. A

mintanagyság korlátai miatt a korrelációs elemzések is óvatosan értékelendők, és inkább irányjelző, semmint kauzális összefüggéseket tükröznek.

A vizsgálat további fejlesztési lehetősége a nemek közötti különbségek elemzése, amelyet jelen kutatás kizárólag férfi résztvevőkkel végzett el. A női sportolók hemorheológiai és hormonális válaszaik eltérő mintázatot mutathatnak, ezért a jövőben érdemes lenne a nemi különbségeket külön is elemezni.

Végül megemlítendő, hogy bár a vizsgálat több szinten (metabolikus, hemorheológiai, teljesítményélettani) közelítette meg a kérdéskört, az ok-okozati viszonyok feltárásához további, célzott kísérletekre van szükség.

A jövőbeni kutatásokban a molekuláris és sejtszintű mechanizmusok, például az oxidatív stressz, a membránlipid-összetétel és az NO-mediált jelátviteli utak vizsgálata segítheti a hemorheológiai adaptációk élettani hátterének pontosabb megértését.

## **5.6. Új tudományos eredmények**

1. Kimutattuk, hogy a vörösvérsejt-deformabilitás szoros pozitív kapcsolatban áll az aerob teljesítőképesség objektív mutatóival ( $VO_{2max}$ , laktátküszöb). Ez a megfigyelés megerősíti, hogy a mikrocirkulációs és sejtmechanikai tényezők meghatározó szerepet játszanak a sportolók oxigénszállítási hatékonyságában és teljesítményadaptációjában.
2. Először igazoltuk hazai mintán, hogy a hemorheológiai paraméterek a különböző edzettségi szintek szerint differenciált mintázatot mutatnak. A hivatásos sportolóknál kedvezőbb deformabilitási, alacsonyabb viszkozitási és kiegyensúlyozottabb aggregációs értékeket találtunk, mint a nem edzett egyéneknél, ami a hosszú távú fizikai aktivitás adaptív mikrorheológiai hatását jelzi.
3. A három hónapos core-izomfejlesztő tréning hatására a hemorheológiai profil szignifikánsan javult, még a klasszikus aerob teljesítményparaméterek jelentős változása nélkül is. Ez azt jelenti, hogy a mikrocirkulációs és sejtszintű alkalmazkodás korábban megjelenik, mint a makroszintű teljesítményjavulás, tehát a hemorheológiai változások az adaptáció korai biomarkereiként is értelmezhetők.
4. A tréningintervenciót követően csökkent a teljes vér- és plazmaviszkozitás, valamint a 40%-os hematokritra korrigált teljes vérviszkozitás, miközben a Hct/TVV arány javult. Ez a véráramlás energetikai szükségleteinek csökkenését, illetve a keringési

hatékonyság növekedését jelzi, ami új mechanikai magyarázatot ad az edzésadaptáció keringési szintű előnyeire.

5. A terhelés utáni vörösvérsejt-aggregáció mértéke szignifikánsan kisebb volt az edzett csoportokban, különösen a jégkorongozóknál, ami az akut mikrorheológiai stresszválasz csillapítását mutatja. Ez a megfigyelés új bizonyítékot szolgáltat arra, hogy a rendszeres edzés nemcsak makroszinten, hanem sejtszinten is növeli a terhelés-toleranciát és a mikrocirkulációs stabilitást.
6. A hemorheológiai változások mértéke és iránya jól korrelált a spiroergometriás paraméterekkel, különösen a RER és a laktát elimináció dinamikájával. Ez a kapcsolat megerősíti, hogy a mikroszintű véráramlási adaptáció szoros összefüggésben áll a metabolikus hatékonysággal és a terhelés utáni regenerációs kapacitással.

### **5.7. Következtetések és javaslatok a jövőbeli kutatásokra**

A jelen értekezésben bemutatott vizsgálatok alapján egyértelműen megállapítható, hogy a hemorheológiai tényezők meghatározó szerepet töltenek be az emberi teljesítőképesség élettani szabályozásában. Mind a keresztmetszeti, mind az intervenciós vizsgálat eredményei megerősítették, hogy a vér sejtés és plazma komponenseinek reológiai tulajdonságai nemcsak a fizikai aktivitás következményei, hanem annak aktív, adaptív komponensei is.

A vörösvérsejt-deformabilitás, az aggregációs dinamikák és a vér viszkozitása olyan finoman hangolt élettani mechanizmusokat tükröznek, amelyek hozzájárulnak a mikrokeringés hatékonyságához, az oxigénszállítás optimalizálásához és a terhelés utáni regenerációs folyamatok sikeréhez. Ezek a sejtszintű adaptációk tehát közvetlenül kapcsolódnak az aerob kapacitáshoz, a laktát clearance és a keringési gazdaságosság makroszintű mutatóihoz.

A kutatás egyik legfontosabb következtetése, hogy a hemorheológiai mérések alkalmasak lehetnek a teljesítményélettani állapot kvantitatív, objektív értékelésére. Ezek a paraméterek olyan új, érzékeny biomarkerekként értelmezhetők, amelyek a klasszikus élettani vizsgálatokkal (pl.  $\text{VO}_2\text{max}$ , laktátküszöb, ventilációs küszöbök) együtt alkalmazva képesek pontosabb, komplex képet adni a sportolók aktuális állapotáról, terhelhetőségéről és regenerációs készségéről. E megközelítés különösen értékes lehet a teljesítményoptimalizálás, az egyéni edzéstervezés és a sportorvosi rehabilitáció területén.

A három hónapos core-tréning program eredményei rámutattak, hogy a mikrocirkulációs adaptáció már a korai szakaszban megjelenhet, még akkor is, ha a makroszintű teljesítménymutatókban nem észlelhető szignifikáns javulás. Ez arra utal, hogy a hemorheológiai paraméterek, különösen a deformabilitás és a viszkozitás változásai korai indikátorai lehetnek az edzésre adott fiziológiai válasznak, és előre jelezhetik a teljesítményváltozás irányát.

A kutatás egy másik fontos tanulsága, hogy a vér mikromechanikai tulajdonságainak vizsgálata nemcsak sportélettani, hanem klinikai relevanciával is bír. A hemorheológiai profilváltozások - például a deformabilitás csökkenése, a fokozott viszkozitás vagy az abnormális aggregációs válasz - a keringési stressz, a túlterhelés vagy a nem megfelelő regeneráció korai jeleiként értelmezhetők lehetnek. Ennek következtében e paraméterek vizsgálata ígéretes lehet a sportorvosi diagnosztikában, a krónikus fáradtság-szindróma, az overtraining és a mikroér-károsodások monitorozásában is.

A jövőbeli kutatások irányai több szinten is körvonalazhatók:

1. Nagyobb mintaszámú, longitudinális vizsgálatok szükségesek a hemorheológiai adaptációk időbeli dinamikájának pontos feltérképezésére, különböző edzés módszerek és sportágak összehasonlításával.
2. Érdemes vizsgálni a nemi különbségek hatását, mivel a női hormonális ciklus és az ösztrogén-mediált vaszkuláris hatások befolyásolhatják a vér reológiai tulajdonságait.
3. A molekuláris mechanizmusok részletes elemzése (oxidatív stressz, nitrogén-oxid biohasznosulás, membránlipid-összetétel) segíthet feltárni a sejtmechanikai adaptációk biokémiai alapjait.
4. Célszerű a sportági specifikus vizsgálatok bővítése, hogy megértsük, milyen különbségek figyelhetők meg például csapatsportok, állóképességi és erősportok között.
5. A valós idejű vagy terepi hemorheológiai monitorozás fejlesztése (pl. hordozható mikrovéranalizátorok) lehetővé teheti a mikrocirkuláció dinamikus követését akár edzések vagy versenyek közben.

Összességében kutatásunk hozzájárul ahhoz a szemléletváltáshoz, amely a sportélettant a rendszerszintű fiziológia és a sejtszintű mikrocirkuláció integrált megközelítésében értelmezi. Eredményeink alapján a hemorheológiai tényezők a jövőben a sportteljesítmény

diagnosztikájának, a regeneráció monitorozásának és az edzésadaptáció tudományos vizsgálatának meghatározó biomarkerei lehetnek.

## 6. ÖSSZEFOGLALÁS

A fizikai teljesítőképesség élettani hátterének vizsgálata során az utóbbi években egyre nagyobb hangsúlyt kapnak azok a tényezők, amelyek a mikrocirkuláció és a vér rheológiai tulajdonságain keresztül befolyásolják az oxigénszállítást és a szöveti anyagcserét. A hemorheológia tudományának sportélettani alkalmazása lehetőséget teremt a terhelésadaptáció, a teljesítmény és a regeneráció objektív, sejtszintű értékelésére.

Disszertációm két, egymást kiegészítő kutatás eredményeit foglalja össze. Az első vizsgálatban különböző edzettségi szintű férfiak (nem edzett, labdarúgó- és jégkorongozó sportolók) hemorheológiai és spiroergometriás paramétereit hasonlítottuk össze. A második, három hónapos prospektív vizsgálatban egy core-izomfejlesztő tréningprogram hatásait értékeltük a mikrocirkulációs és élettani változások tükrében.

Eredményeink azt mutatták, hogy a rendszeres fizikai aktivitás és az edzésadaptáció szignifikáns javulást eredményez a vörösvérsejtek deformabilitásában, mérsékli az aggregációs választ, és kedvezően befolyásolja a teljes vér- és plazmaviszkozitást. A deformabilitás mértéke erős pozitív korrelációt mutatott az aerob teljesítőképesség ( $VO_{2max}$ , laktátküszöb) mutatóival. Az intervenciós program végére a core-tréning csoportban a viszkozitás-csökkenés és a Hct/TVV arány javulása a keringési hatékonyság növekedésére utalt, még a klasszikus teljesítményparaméterek szignifikáns változása nélkül is.

A kutatás során kimutattuk, hogy a hemorheológiai tényezők érzékenyen tükrözik a terheléshez való adaptációt, ezért alkalmasak lehetnek új biomarkerként a sportteljesítmény, a regeneráció és a túlterhelés objektív nyomon követésére. Az eredmények hozzájárulnak a mikrocirkuláció és a sportélettani folyamatok integrált értelmezéséhez, és megalapozzák a hemorheológiai mérések gyakorlati alkalmazását a sportorvosi diagnosztikában és rehabilitációban.

## 7. SUMMARY

In recent years, growing attention has been directed toward physiological factors influencing physical performance through microcirculatory and hemorheological mechanisms. The rheological properties of blood - such as viscosity, red blood cell deformability, and aggregation - play a key role in oxygen transport, metabolic efficiency, and exercise tolerance. The integration of hemorheological assessment into sports medicine provides an opportunity for a cell-level, objective evaluation of adaptation, performance, and recovery.

This PhD dissertation summarizes the results of two complementary studies. The first, a cross-sectional investigation, compared hemorheological and spiroergometric parameters among untrained men, professional soccer players, and ice hockey players. The second, a three-month prospective study, examined the effects of a core muscle training program on microcirculatory and physiological adaptation.

Our findings demonstrated that regular physical activity and training adaptation significantly improved red blood cell deformability, reduced aggregation responses, and favorably altered whole-blood and plasma viscosity. The degree of RBC deformability showed a strong positive correlation with aerobic performance indices ( $\text{VO}_2\text{max}$ , lactate threshold). At the end of the intervention, the training group exhibited reduced blood viscosity and improved Hct/WBV ratio, indicating enhanced circulatory efficiency even in the absence of significant changes in classical performance variables.

These results suggest that hemorheological parameters are highly sensitive indicators of exercise adaptation and may serve as novel biomarkers for monitoring training effects, recovery, and overtraining risk. The present findings contribute to a deeper understanding of the interaction between microcirculation and exercise physiology, and establish a foundation for the practical application of hemorheological measurements in sports diagnostics and rehabilitation.

## 8. IRODALOMJEGYZÉK

### 8.1. Hivatkozott közlemények listája

1. Joyner MJ, Coyle EF. Endurance exercise performance: the physiology of champions. *J Physiol.* 2008;586:35–44.
2. Saltin B, Strange S. Maximal oxygen uptake: “old” and “new” arguments for a cardiovascular limitation. *Med Sci Sports Exerc.* 1992;24:30–37.
3. Levine BD. VO<sub>2</sub>max: what do we know, and what do we still need to know? *J Physiol.* 2008;586:25–34.
4. Noakes TD. Testing for maximum oxygen consumption has produced a brainless model of human exercise performance. *Br J Sports Med.* 2008;42:551–555.
5. Baskurt OK, Meiselman HJ. Blood rheology and hemodynamics. *Semin Thromb Hemost.* 2003;29(5):435–450.
6. Connes P, et al. Exercise hemorheology: classical data, recent findings and unresolved issues. *Clin Hemorheol Microcirc.* 2013;53:187–199.
7. Connes P. Hemorheology and exercise: effects of warm environments and potential consequences for sickle cell trait carriers. *Scand J Med Sci Sports.* 2010;20 Suppl 3:48–52.
8. Dintenfass, Leopold. *Rheology of Blood in Diagnostic and Preventive Medicine; an Introduction to Clinical Haemorheology.* London, Boston: Butterworth, 1976. Print.
9. Ernst E. Influence of regular physical activity on blood rheology. *Eur Heart J.* 1987;8:59–62.
10. Brun JF, Varlet-Marie E, Connes P, Aloulou I. Hemorheological alterations related to training and overtraining. *Biorheology.* 2010;47(2):95–115.
11. Nemeth N, Peto K, Magyar Z, Klarik Z, Varga G, Oltean M, Mantas A, Czigany Z, Tolba RH. Hemorheological and microcirculatory factors in liver ischemia-reperfusion injury—an update on pathophysiology, molecular mechanisms and protective strategies. *Int J Mol Sci.* 2021;22(4):1864.

12. Caprari P, Massimi S, Diana L, Sorrentino F, Maffei L, Materazzi S, Risoluti R. Hemorheological alterations and oxidative damage in sickle cell anemia. *Front Mol Biosci.* 2019;6:142.
13. Balady GJ, Arena R, Sietsema K, et al. Clinician's Guide to cardiopulmonary exercise testing in adults: a scientific statement from the American Heart Association. *Circulation.* 2010;122(2):191-225.
14. Wasserman K, et al. Principles of exercise testing and interpretation. 5th ed. Lippincott; 2012.
15. Sietsema KE, Sue DY, Stringer WW, Ward SA, editors. Wasserman & Whipp's principles of exercise testing and interpretation: including pathophysiology and clinical applications. 6th ed. Lippincott Williams & Wilkins; 2020.
16. Uyklu M, Meiselman HJ, Baskurt OK. Effect of hemoglobin oxygenation level on red blood cell deformability and aggregation parameters. *Clin Hemorheol Microcirc.* 2009;41(3):179-188.
17. Lipowsky HH. Microvascular rheology and hemodynamics. *Microcirculation.* 2005;12(1):5-15.
18. Connes P, Pichon A, Hardy-Dessources MD, et al. Blood viscosity and hemodynamics during exercise. *Clin Hemorheol Microcirc.* 2012;51(2):101–109.
19. Guyton AC, Hall JE. Textbook of medical physiology. 13th ed. Elsevier; 2016.
20. Joyner MJ, Casey DP. Regulation of blood flow to skeletal muscle. *J Appl Physiol.* 2015;118:925–932.
21. Poole DC, Jones AM. Oxygen uptake kinetics. *Compr Physiol.* 2012;2(2):933–996.
22. Merrill EW, Gilliland ER, Cokelet GR, Shin H, Britten A, Wells RE Jr. Rheology of human blood, near and at zero flow: effects of temperature and hematocrit level. *Biophys J.* 1963;3(3):199–213.
23. Meiselman HJ. Red blood cell aggregation: 45 years being curious. *Biorheology.* 2009;46:1–19.

24. Mohandas N, Gallagher PG. Red cell membrane: past, present, and future. *Blood*. 2008;112(10):3939–3948.
25. Baskurt OK, Meiselman HJ. Erythrocyte aggregation: basic aspects and clinical importance. *Clin Hemorheol Microcirc*. 2013;53(1–2):23–37.
26. Ben-Ami R, Barshtein G, Mardi T, et al. A synergistic effect of albumin and fibrinogen on immunoglobulin-induced red blood cell aggregation. *Am J Physiol Heart Circ Physiol*. 2003;285:H2663–H2669.
27. Popel AS, Johnson PC. Microcirculation and hemorheology. *Annu Rev Fluid Mech*. 2005;37:43–69.
28. Poole DC, Jones AM. Oxygen uptake kinetics. *J Appl Physiol*. 2017;122(4):933–946.
29. Connes P, et al. Blood rheology and exercise. *Eur J Appl Physiol*. 2010;108:479–485.
30. Lundby C, Montero D, Joyner M. Biology of VO<sub>2</sub>max: looking under the physiology lamp. *Acta Physiol (Oxf)*. 2017;220(2):218–228.
31. Késmárky G, Kenyeres P, Rábai M, Tóth K. Plasma viscosity: a forgotten variable. *Clin Hemorheol Microcirc*. 2008;39:243–246.
32. Teległów A, Mirek W, Sudoł G, Podsiadło S, Rembiasz K, Ptaszek B. Rheological and biochemical properties of blood in runners: a preliminary report. *Appl Sci*. 2024;14(16):6894.
33. Nemeth N, et al. Clinical relevance of hemorheology. *Clin Hemorheol Microcirc*. 2011;48:123–132.
34. Nader E, Skinner S, Romana M, et al. Blood rheology: key parameters, impact on blood flow, role in sickle cell disease and effects of exercise. *Front Physiol*. 2019;10:1329.
35. Wu YF, Chen JL, Tsai CS, et al. Effects of regular exercise on blood rheology. *Sci Rep*. 2025;15:26128.
36. Connes P, et al. Effects of exercise on blood rheology: a review. *Clin Hemorheol Microcirc*. 2006;35:47–59.

37. El-Sayed MS, Ali N, El-Sayed Ali Z. Haemorheology in exercise and training. *Sports Med.* 2005;35(8):649–670.
38. Romain AJ, et al. Effects of regular physical activity on blood rheology: a meta-analysis. *Eur J Appl Physiol.* 2019;119:2657–2668.
39. Zbigniew D, Mleczko E, Rembiasz K, et al. Rheological properties in marathon runners. *J Kinesiol Exerc Sci.* 2014;24(68):19–38.
40. Mardyła M, Teległów A, Ptaszek B, Jekiełek M, Mańko G, Marchewka J. Effects of rowing on rheological properties of blood. *Int J Environ Res Public Health.* 2023;20(6):5159.
41. Myers J, Arena R, Franklin B, et al. Recommendations for clinical exercise laboratories: a scientific statement from the american heart association. *Circulation.* 2009;119(24):3144-3161.
42. Bassett DR Jr, Howley ET. Limiting factors for maximum oxygen uptake and determinants of endurance performance. *Med Sci Sports Exerc.* 2000;32(1):70–84.
43. Buchheit M, Laursen PB, Al Haddad H, Ahmaidi S. Exercise-induced plasma volume expansion and post-exercise parasympathetic reactivation. *Eur J Appl Physiol.* 2009;105(3):471–481.
44. Sentürk UK, Gündüz F, Kuru O, et al. Exercise-induced oxidative stress affects erythrocytes in sedentary rats but not exercise-trained rats. *J Appl Physiol.* 2001;91(5):1999–2004.
45. Dabbagh Nikookheslat S, Khani M, Sadri Esfanjanki K, Azadi B. The effect of exercise-induced hemorheological adaptation on respiratory function and sport performance. *Asian J Med Pharm Res.* 2013;3(4):161–175.
46. Ivanov I. Hemorheological alterations and physical activity. *Appl Sci.* 2022;12(20):10374.
47. Szygula Z, et al. Hematological and hemorheological changes in soccer players after intensive training. *J Sports Med Phys Fitness.* 2010;50(4):409–415.

48. Mairbäurl H. Red blood cells in sports: adaptative responses to exercise training. *Clin Hemorheol Microcirc.* 2013;53:1–11.
49. Tilahun Muche Z, Haile Wondimu D, Bayissa Midekssa M, Chekol Abebe E, Mengie Ayele T, Abebe Zewdie E. A comparative study of hematological parameters of endurance runners at Guna Athletics Sport Club (3100 meters above sea level) and Ethiopian Youth Sport Academy (2400 meters above sea level), Ethiopia. *J Sports Med.* 2021;2021:8415100.
50. Kilic-Toprak E, Ardic F, Erken G, Unver-Kocak F, Kucukatay V, Bor-Kucukatay M. Hemorheological responses to progressive resistance exercise training in healthy young males. *Med Sci Monit.* 2012;18(6):CR351–CR360.
51. Powers SK, Jackson MJ. Exercise-induced oxidative stress: cellular mechanisms and impact on muscle force production. *Physiol Rev.* 2008;88:1243–1276.
52. Canals-Garzón C, Guisado-Barrilao R, Martínez-García D, Chiroso-Ríos IJ, Jerez-Mayorga D, Guisado-Requena IM. Effect of antioxidant supplementation on markers of oxidative stress and muscle damage after strength exercise: a systematic review. *Int J Environ Res Public Health.* 2022;19(3):1803.
53. Wilber RL. Altitude training and athletic performance. *Human Kinetics*; 2004.
54. Schmidt W, Prommer N. The optimised CO-rebreathing method: a new tool to determine total haemoglobin mass. *Eur J Appl Physiol.* 2005;95:486–495.
55. Michiels C. Physiological and pathological responses to hypoxia. *Am J Pathol.* 2004;164:1875–1882.
56. Calbet JA, Boushel R, Radegran G, Sondergaard H, Wagner PD, Saltin B. Why is VO<sub>2</sub>max after altitude acclimatization still reduced despite normalization of arterial O<sub>2</sub> content? *Am J Physiol Regul Integr Comp Physiol.* 2003;284(2):R304–R316.
57. Heinicke K, Heinicke I, Schmidt W, Wolfarth B. A three-week traditional altitude training increases hemoglobin mass and red cell volume in elite biathlon athletes. *Int J Sports Med.* 2005;26(5):350–355.

58. González-Alonso J, Calbet JA, Nielsen B. Muscle blood flow is reduced with dehydration during prolonged exercise in humans. *J Physiol.* 1998;513(3):895–905.
59. Sawka MN. Influence of hydration level and body fluids on exercise performance in the heat. *Curr Sports Med Rep.* 2004;3:198–200.
60. Sawka MN, Coyle EF. Influence of body water and blood volume on thermoregulation and exercise performance in the heat. *Exerc Sport Sci Rev.* 1999;27:167–218.
61. Hadžović-Džuvo A, et al. Oxidative stress status in elite athletes engaged in different sport disciplines. *Bosn J Basic Med Sci.* 2014;14:56–62.
62. Racinais S, et al. Consensus recommendations on training and competing in the heat. *Scand J Med Sci Sports.* 2015;25(S1):6–19.
63. Périard JD, Caillaud C, Thompson MW. Adaptations and mechanisms of human heat acclimation: applications for competitive athletes and sports. *Scand J Med Sci Sports.* 2015;25(S1):20–38.
64. Jung F, Rampling M. Role of blood viscosity in the microcirculation. *Clin Hemorheol Microcirc.* 2016;64:251–254.
65. Castellani JW, Young AJ. Human physiological responses to cold exposure: acute responses and acclimatization to prolonged exposure. *Auton Neurosci.* 2016;196:63–74.
66. Stocks JM, Taylor NA, Tipton MJ, Greenleaf JE. Human physiological responses to cold exposure. *Aviat Space Environ Med.* 2004;75(5):444–457.
67. Mohanty JG, et al. Red blood cell oxidative stress impairs oxygen delivery and induces red blood cell dysfunction. *Transl Res.* 2014;164:165–171.
68. Steinbacher P, Eckl P. Impact of oxidative stress on exercising skeletal muscle. *Biomolecules.* 2015;5(2):356–377.
69. Buono MJ, Krippes T, Kolkhorst FW, Williams AT, Cabrales P. Increases in core temperature counterbalance effects of hemoconcentration on blood viscosity during prolonged exercise in the heat. *Exp Physiol.* 2016;101(2):332–342.

70. Pop GA, Duncker DJ, Gardien M, et al. The clinical significance of whole blood viscosity in (cardio)vascular medicine. *Neth Heart J*. 2002;10(12):512-516.
71. Simmonds MJ, Tripette J, Sabapathy S, Marshall-Gradisnik SM, Connes P. Cardiovascular dynamics during exercise are related to blood rheology. *Clin Hemorheol Microcirc*. 2011;49:231–241.
72. Tomschi F, Bizjak D, Bloch W, Latsch J, Predel HG, Grau M. Deformability of different red blood cell populations and viscosity of differently trained young men in response to intensive and moderate running. *Clin Hemorheol Microcirc*. 2018;69(4):503–514.
73. Mairbäurl H. Red blood cells in sports: effects of exercise and training on oxygen supply by red blood cells. *Front Physiol*. 2013;4:332.
74. Andjelković M, Baralić I, Đorđević B, et al. Hematological and biochemical parameters in elite soccer players. *Int J Med Sci*. 2015;12(10):682–688.
75. Núñez-Espinosa C, Douziech A, Ríos-Kristjánsson JG, et al. Effect of intermittent hypoxia and exercise on blood rheology and oxygen transport in trained rats. *Respir Physiol Neurobiol*. 2014;192:112-117.
76. Smith JA. Exercise, training and red blood cell turnover. *Sports Med*. 1995;19(1):9–31.
77. Vergouwen PC, Collée T, Marx JJ. Haematocrit in elite athletes. *Int J Sports Med*. 1999;20(8):538–541.
78. Davison RCR, Smith MF, Hopker JG, Price MJ, Hettinga FJ, Tew G, Bottoms L, editors. *Sport and exercise physiology testing guidelines*. Vol II: Exercise and clinical testing. 2nd ed. Routledge; 2022.
79. Connes P, Machado R, Hue O, Reid H. Exercise limitation, exercise testing and exercise recommendations in sickle cell anemia. *Clin Hemorheol Microcirc*. 2011;49:151–163.
80. Faude O, et al. Lactate threshold concepts: how valid are they? *Sports Med*. 2009;39:469–490.

81. Gaudard A, Varlet-Marie E, Bressolle F, Mercier J, Brun JF. Hemorheological correlates of fitness and unfitness in athletes: moving beyond the apparent “paradox of hematocrit”? *Clin Hemorheol Microcirc.* 2003;28(3):161–173.
82. Lu M, Rab MA, Shevkoplyas SS, Sheehan VA. Blood rheology biomarkers in sickle cell disease. *Exp Biol Med (Maywood).* 2020;245(2):155-165.
83. Hitsumoto T. Factors affecting impairment of blood rheology in obese subjects. *J Cardiol.* 2012;60(5):401-406.
84. Nieman DC. Exercise, upper respiratory tract infection, and the immune system. *Med Sci Sports Exerc.* 1994;26:128–139.
85. Brun JF, et al. Hemorheology in performance diagnostics: new biomarkers for training control. *Clin Hemorheol Microcirc.* 2020;74:305–317.
86. Hitsumoto T. Relationship between cardiovascular risk factors and hemorheology assessed by microchannel method in patients with type 2 diabetes mellitus. *Diabetol Int.* 2017;8(3):316-322.
87. Junker D, Stöggel T. The Training Effects of Foam Rolling on Core Strength Endurance, Balance, Muscle Performance and Range of Motion: A Randomized Controlled Trial. *J Sports Sci Med.* 2019;18(2):229-238.
88. Yildirim S, Ozyilmaz S, Elmadag NM, Yabaci A. Effects of Core Stabilization Exercises on Pulmonary Function, Respiratory Muscle Strength, Peripheral Muscle Strength, Functional Capacity, and Perceived Appearance in Children With Adolescent Idiopathic Scoliosis: A Randomized Controlled Trial. *Am J Phys Med Rehabil.* 2022;101(8):719-725.

## 8.2. Hivatalos 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 tudományometriai ellenőrzését a tudományos adatbázisok és a Journal Citation Reports Impact Factor lista alapján elvégezte.

Debrecen, 2026.01.12.



## 9. TÁRGYSZAVAK

teljesítménydiagnosztika

spiroergometria

terhelésélettan

hemorheológia

vörösvértest-deformabilitás

vörösvértest-aggregáció

mikrokeringés

edzésadaptáció

performance diagnostics

cardiopulmonary exercise testing

exercise physiology

hemorheology

red blood cell deformability

red blood cell aggregation

microcirculation

training adaptatio

## 10. 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. Pósné 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 Műtéttani 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.

## 11. FÜGGELÉK

### BELEEGYZŐ NYILATKOZAT

Kutatás megnevezése: Magyar Honvédség-Debreceni Egyetem  
Szuperatléta program 2020 I.

Alulírott..... (név), Születési hely, idő: ....., TAJ szám: ....., lakcím: ..... cselekvőképes érintett kijelentem, hogy a fent nevezett kutatásban való részvételbe önkéntesen., bármely befolyásolástól mentesen, anyagi ellenszolgáltatás nélkül beleegyezem. Tudomásul veszem, hogy a vizsgálat az alábbi lépésekből áll: EKG, vérnyomásmérés, oxigén szaturáció és testösszetétel meghatározás, szakorvosi vizsgálat, mozgásszervi és állóképességi felmérések, dietetikai felmérések, táplálkozási tanácsadás, kérdőívek kitöltése, vénás és ujjbegyből történő vérvétel (a részletes leírás a Tájékoztatóban olvasható).

A kutatás céljáról, kivitelezésének módjáról, a mintavételekről kapott tájékoztatót megértettem, személyes kérdésekre feltételre lehetőséget kaptam, feltett kérdéseimre kielégítő válaszokat kaptam. A fenti információkat írásban is megkaptam. A tájékoztatóban foglaltakat elfogadom, így hozzájárulok a vizsgálatban való részvételhez, valamint az általam szolgáltatott minták és az abból származó adatok kódolt formában történő tárolásához.

Mintám kutatás-fejlesztési célokra való felhasználásába beleegyezek. Az adatok tudományos céllal történő feldolgozásához és azok tudományos írásban történő közzétételéhez hozzájárulok. Mintám kizárólag kutatási célú, a mintavétel elsődleges célja szerinti felhasználásához járulok hozzá.

A kutatásba való beleegyezésemet jogomban áll bármikor visszavonni további indoklás, illetve bármiféle, a jövőbeni kiképzésemet, ellátásomat érintő hátrányos következmény nélkül. Ezt szóban vagy írásban tehetem meg.

Tudomásul veszem, hogy a megfelelő hatóságilag szabályozott ellenőrzés mellett a vizsgálati eredmények más hazai vagy külföldi kutatókhoz továbbíthatók, akik ezeket előre meghatározott kutatás-fejlesztési célra felhasználhatják. Ennek kapcsán semmilyen személyes anyagi követelést nem támaszthatok.

Kutatás adatai:

-Kutatás megnevezése; Magyar Honvédség-Debreceni Egyetem, Szuperatléta program, 2020 I.

Kutatásvezető: Prof. Dr. Szántó Sándor (egyetemi tanár)

Kutatás helye: Debreceni Egyetem, Általános Orvostudományi Kar, Sportorvosi Tanszék, illetve Magyar Honvédség, 5. Bocskai István Lövészdandár

A jelen nyilatkozatban foglaltakat megértettem, tudomásul vettem és aláírásommal hitelesítem.

Dátum.....

A tájékoztatót végző kutató (név, beosztás):

## BETEGTÁJÉKOZTATÓ

### **Kutatás megnevezése:**

Haemorheológiai és állóképességi paraméterek összefüggésének meghatározása.

A sportolók, ezen belül a szabadidő sportolók állóképességének meghatározásában számos élettani tényező játszik szerepet. Ezek közé tartozik a szív alkalmazkodása a rendszeres terhelésekhez, a vázizomzat kis ereinek sűrűsége és a tápanyagokat oxigén jelenlétében felhasználó enzimrendszerek mennyisége és aktivitása. Jóval kevesebbet tudunk a vérnek terhelés hatására bekövetkező, és a kiserekben megfigyelhető keringést befolyásoló hatásairól, mint a vörsejtek deformálhatóságának és részben ezzel összefüggésben a vér viszkozitásának változása.

Intézményünk egy olyan orvostudományi kutatást végez, melynek célja a fent leírt változások elemzése sporttevékenységet nem, vagy csak szabadidős jelleggel végző egyéneknél.

A kutatáshoz az Ön segítségét kérnénk. Amennyiben részt vesz a kutatásban, futószalagos terhelést megelőzően és követően vénás vért veszünk a vérben bekövetkező, a folyadékáramlást befolyásoló tényezők vizsgálatára, illetve a terhelés során egy maszkon keresztül követjük légzési paramétereinek változását. Ugyancsak vizsgáljuk ujjbegyből vett vérből a tejsav felhalmozódását a szervezetben, majd lebomlását 5 perccel később.

A klinikai vizsgálat Ön számára egészségügyi kockázattal járhat. A vénás és ujjbegyből történő vérvétel a tűszúrás következtében fájdalommal jár, és bár igen kis valószínűséggel, de vérzést és fertőzést okozhat. A terhelés okozta keringési változások (vérnyomás és pulzusszám) egyes esetekben szédülést, nehézlégzést okozhatnak, ennek valószínűségét a terhelés előtt végzett EKG-val, illetve belgyógyászati kórelőzmény felvételével és fizikális vizsgálattal igyekszünk minimálisra csökkenteni. A terhelés orvosi felügyelet mellett történik, bármikor megszakítható akár az Ön, akár a felügyelő orvos döntése alapján. A futószalag alkalmazása potenciálisan elesés és sérülés veszélyével járhat.

Mintáját a kutatásban az Ön beleegyező nyilatkozata alapján fogjuk felhasználni, azokon laboratóriumi vizsgálatokat végzünk.

A kutatómunkában való részvétel önkéntes és bármely befolyásolástól mentes, bármikor indoklás nélkül írásban vagy szóban visszavonható anélkül, hogy Önnek ebből bármilyen jellegű hátránya származna. A résztvevőknek a kutatásból közvetlen előnyük nem származik, a részvételért költségtérítés nem jár.

A biológiai minták nyilvántartása és a klinikai adatok tárolása az adatvédelmi, betegjogi és a genetikai kutatásokra vonatkozó jogszabályok betartásával kerül sor.

Vizsgálatban való részvételből származó bármilyen egészségkárosodás esetén a magyarországi jogszabályoknak megfelelően az alanyt teljes körű kártérítés illeti meg. A kutatóhely érvényes felelősségbiztosítással rendelkezik.

**A kutatás időtartama:** 2019.12.01. – 2020.12.31.

**Bevonni kívánt személyek száma:** 25 fő