

A NAD és a FAD szerepe az állóképességi sportok metabolikus folyamataiban

1) Bevezetés

Kutatásunk célja, hogy feltárja és rávilágítson a NAD (nikotinamid-adenin-dinukleotid) és a FAD (flavin-adenin-dinukleotid) szerepére az állóképességi munkában, valamint átfogóbb és újszerű ismereteket nyújtson ezen szubsztrátok mennyiségének számításáról és jelentőségéről a sportteljesítményben.

Ebben a tanulmányban összefoglalt eredményeink tavalyi vizsgálatunk folytatása, ami a maximális zsírsavfelhasználást (MFO) elemezte szubmaximális (RER=1; respiratory exchange ratio – légzési cserearány) kerékpárergométeres terhelés során (Szmodis és mtsai, 2024). Az adatainkból és eredményeinkből kiindulva tágabb értelemben is foglalkozni kezdtünk a spiroergometriás terhelés során történő energiafelhasználással és a zsírsavakon túl, a szénhidrátfelhasználást is bevontuk megfigyeléseinkbe.

Tavalyi kutatásunk eredményeinek áttekintése

A Magyar Testnevelési Egyetem (MTSE) hallgatóinak MFO értéke $0,52 \pm 0,14$ g/min, míg a versenysportolóké $0,68 \pm 0,16$ g/min volt (1. ábra). A maximális zsírsavfelhasználást a kerékpárosok magasabb relatív teljesítménynél érték el a szabadidő sportolókhöz képest ($0,75 \pm 0,27$ vs. $1,91 \pm 0,83$ Watt/kg).

A maximális zsírsavfelhasználáshoz tartozó relatív O_2 felvétel a kerékpárosok esetében magasabb volt a szabadidő sportolókhöz képest ($35,1 \pm 8,7$ vs. $17,8 \pm 3,4$ ml/kg/perc).

Az MFO értékhez tartozó O_2 felvétel $VO_2RER=1$ értékéhez képest kerékpárosoknál $64,6 \pm 10,7\%$, szabadidő sportolóknál $56,6 \pm 15,2\%$ volt, ami azt jelenti, hogy jelentős zsírfelhasználás valóban csak alacsony és közepes intenzitáson történik (Randell és mtsai 2017; Maunder és mtsai, 2018). A maximális zsírsavfelhasználás a VO_{2max} 40-60% közötti intenzitásnál van. Amennyiben tehát a zsírsavoxidáció a cél, úgy ebben az intenzitászónában kell végeznünk az edzéseket.

Vizsgálatunk alapján megállapítottuk, hogy a kerékpáros versenyzők magasabb MFO értéket értek el magasabb teljesítménynél, vagyis tovább használtak fel zsírsavakat az energianyerés céljából, magasabb oxigénfelvétel mellett, az energia felhasználásuk gazdaságosabb volt, így később „savasodtak” el, ezért nagyobb teljesítményre voltak képesek.

		Ny			MFO		
		Hallgató	Kerékpáros		Hallgató	Kerékpáros	
FAT g/perc	átlag	0,109	0,100	ns	0,516	0,678	p<0,05
	szórás	0,044	0,040		0,137	0,157	
CHO g/perc	átlag	0,265	0,307	ns	0,475	1,008	p<0,05
	szórás	0,099	0,099		0,507	0,457	
FAT kcal/perc	átlag	1,06	1,03	ns	5,03	6,610	p<0,05
	szórás	0,43	0,38		1,34	1,530	
CHOkcal/perc	átlag	0,98	1,189	ns	1,84	3,899	p<0,05
	szórás	0,39	0,382		1,96	1,769	
VO2 L/perc	átlag	0,416	0,430	ns	1,391	2,112	p<0,0001
	szórás	0,061	0,058		0,240	0,374	

1. ábra. A nyugalmi és az MFO értékhez tartozó zsírsav és szénhidrát felhasználás, egyetemi hallgatók és országúti kerékpárosok összehasonlítása

Kalória értékek, energiafelhasználás

Sportolás során az energianyerés gazdaságossága kiemelt jelentőségű.

A fehérjék bontása során 4,1 kcal (17,1 kJ) energia keletkezik egy grammra vonatkoztatva. Nem, vagy csak nagyon kis mennyiségben raktározható és rendkívül sokrétű funkciót látnak el a szervezetben. Éhezéskor, kimerüléskor nyúl hozzá a szervezet energianyerés céljából, valamint 180 percet meghaladó edzést követően, ha a szénhidrátaktárak teljesen kifogytak.

A szénhidrátok, a fehérjékhez hasonlóan 4,1 kcal energiát hordoznak grammonként. Előnyük, hogy jól raktározhatók a májban 100-150g, míg az izomban 250-300g is felhalmozható. Aerob és anaerob módon is bonthatók, melynek révén a szervezet fő energiaszolgáltatói (Ádám (szerk.), 2016; Dashty, 2013),

A zsírok jóval több energiát szolgáltatnak súlyarányosan, mint a szénhidrátok vagy a fehérjék, közel kétszer annyit 9,3 kcal/g (38,8 kJ). Jól raktározhatók a szervezetben, azonban csak aerob módon, oxigén jelenlétében bonthatók. Nyugalomban és alacsony intenzitású munkavégzésnél hasznosítja őket a szervezet, edzés során 35-40 percet követően válik meghatározóvá a zsírbontás a szervezetben (Pavlik, 2013). Magas intenzitásnál, intervall jellegű terheléseknél a zsírfelhasználás minimális. A belső környezet helyreállítása végett utólagos zsírégetés jön létre a terhelés befejezésekor (Péronnet és Massicotte, 1991; Muscella és mtsai, 2020; Spriet és mtsai, 2020).

A zsírsavakat a szervezetünk a β -oxidáció során O_2 jelenlétében bontja, majd alakítja acetyl-CoA-vá és ilyen formában kerül be a citrátkörbe, ahol az acetyl-CoA szénatomjai széndioxidá (CO_2) oxidálódnak, ami a légzés során eltávolításra kerül. A lebontás során

keletkezett koenzimek az oxidatív foszforiláció során oxidálódnak, aminek következtében ATP és víz keletkezik, majd az ATP-ADP átalakulás során energia szabadul fel.

A szénhidrátokat a szervezet O_2 jelenléte nélkül is képes bontani tejsav felszaporodás mellett. Oxigén jelenlétében azonban szintén acetyl-CoA-vá alakulva belép a citrátkörbe, ahol a zsírbontási folyamatok és a szénhidrátok bontása ugyanúgy megy végbe (Leites és mtsai, 2016; Radák, 2019).

A $NADH+H^+$ és a $FADH_2$ keletkezése

Az ATP reszintézis során a mitokondriumban keletkezett koenzimek az oxidatív foszforiláció során oxigén jelenlétében szabad NAD^+ -á (nikotinamid-adenin-dinukleotid) és FAD^+ -á (flavin-adenin-dinukleotid) alakulnak, miközben ATP és víz keletkezik (Robergs, 1994; Ádám (szerk.), 2016).

A $NADH+H^+$ és a $FADH_2$ a β -oxidációban, a piruvátból és a keletkezett AcetylCoA oxidatív dekarboxilezéséből, továbbá a szukcinát és oxálacetát átalakulás során keletkezik (2. ábra).

Béta oxidáció során telített zsírsavak esetén minden ciklusban 1 $FADH_2$ keletkezik és 1 $NADH+H^+$.

Oxidatív dekarboxiláció során ugyanannyi $NADH+H^+$ keletkezik, mint CO_2 .

A szukcinátból oxálacetátig mindkét esetben 1 $FADH_2$ és 1 $NADH_2$ keletkezik.

Ha az összes oxigénatom számából kivonjuk a dekarboxiláció során keletkezett $NADH+H^+$ számát, akkor ugyanannyi $NADH+H^+$ és $FADH_2$ marad. A kivonás értékét osztjuk kettővel. akkor megkapjuk a $FADH_2$ mennyiségét. Továbbá az összes oxigén mennyiségéből levonva a $FADH_2$ -t, az egyenlő a keletkezett $NADH+H^+$ mennyiségével.

A $NADH+H^+$ és a $FADH_2$ az oxidatív foszforiláció során az oxigénnel NAD-dá és FAD-dá oxidálódnak, ezért a későbbiekben a képletben az oxidált alakokat használjuk.

A NAD és a FAD kalkulálása

$$FAD = (2VO - VCO_2) / 2$$

$$NAD = 2VO - FAD$$

Ahol:

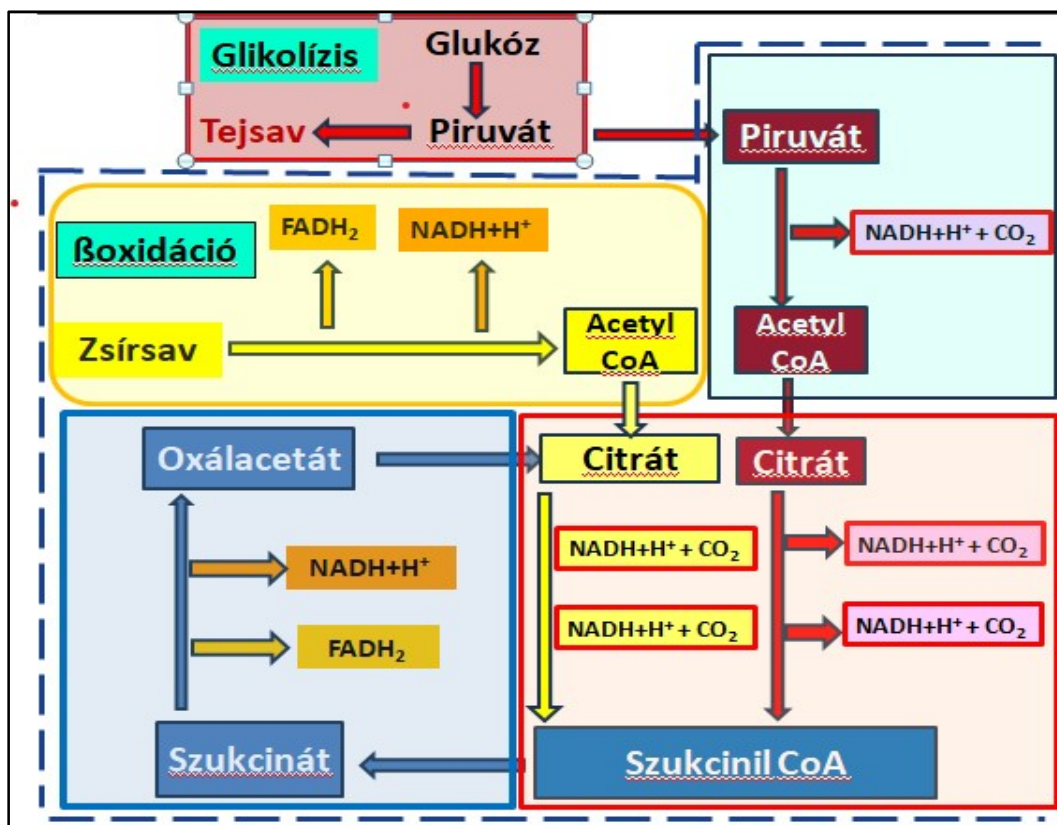
FAD: flavin-adenin-dinukleotid, az eloxidált $FADH_2$ mennyisége, mmol/perc

2VO: NAD és a FAD molekulák összege (oxigén atomok száma/ perc)

NAD: nikotinamid-adenin-dinukleotid az eloxidált $NADH+H^+$ mennyisége, mmol/perc

VCO_2 : A keletkező szén-dioxid molekulák száma, mmol/perc

Zsírsavak teljes lebontása során a NAD/FAD arány $\sim 4:2$ arányban viszonyul egymáshoz, míg piruvát esetében ez az arány 4:1. A NAD/FAD hányados értéke a RER értékhez hasonlóan jelzi a szubsztrátok, a szénhidrátok és zsírsavak felhasználási arányát.



2. ábra. $\text{NADH}+\text{H}^+$ és FADH_2 keletkezése (saját szerkesztés Györe, 2024)

2) Célkitűzés

Kutatásunk során kevés megelőző elemzésből származó információ állt rendelkezésünkre terhelés során a FAD vizsgálatával kapcsolatban. A szakirodalom eddig nem, vagy csak érintőlegesen foglalkozott ennek feltárásával. A FAD objektív mérése nehezebb is a NAD-hoz képest, mivel jóval kevesebb található belőle a szervezetben, valamint a mitokondriumok membránjához kötött.

Célunk, hogy átfogóbb ismeretekhez jussunk a koenzimek szerepéről a terhelés alatt, továbbá, hogy a NAD és a FAD szintjének összefüggéseit vizsgáljuk az állóképességi teljesítmény során. Így pontosabb képet kaphatunk a teljesítmény és az energiafelhasználás összefüggéséről. Az új módszerrel, új lehetőségeket teremthetünk a terheléses vizsgálatok adatainak elemzésére, valamint az eredmények felhasználására a hatékony edzőmunka tervezésében.

Az irodalmi adatok és saját vizsgálatunk alapján a zsírsavfelhasználás az intenzitás 40-60%-nál eléri a maximális értékét, majd utána csökken. Ezért feltételezzük, hogy a FAD szintje lehet az állóképességi munka egyik limitáló faktora. A fokozódó intenzitás következtében a szénhidrát felhasználás nő, így a NAD/FAD értéke 4 felé tolódik el.

3) Anyag és módszerek

Vizsgálatainkat különböző terhelési eszközökön és különböző csoportokon végeztük, hogy átfogóbb képet kapjunk a vizsgált kérdésről. Egy személy csak egyféle vizsgálaton vett részt, nem volt átfedés a csoportok között. Minden résztvevő részletes tájékoztatást kapott a vizsgálatokról, amiken önkéntesen vettek részt, azzal a kitéttel, hogy a bármikor abbahagyhatják a részvételt. A vizsgálatok során a humán mérésekre vonatkozó Helsinki deklaráció előírásait követtük. A vizsgálat egyetemi etikai engedélye: MTSE-OKE-KEB/08/2023.

Összesen 36 főt (15 nő, 21 férfi) terhelünk, akiknek életkora 18 és 23 év között volt. A vizsgált személyek a spiroergometriai vizsgálat előtt antropometria mérésen estek át (testmagasság, testtömeg) és testösszetétel vizsgálatot is végeztünk (InBody 720).

Nyugalmi kardiovaszkuláris paramétereket is rögzítettünk (vérnyomásmérés, EKG) minden terhelés előtt. Vizsgálatsorozatunk során ügyeltünk arra, hogy mindig ugyanolyan körülményeket biztosítsunk a vizsgált személyeknek. A vizsgálatokat, mivel jelentős terheléssel jártak, nem éhgyomorra végeztük, emellett külön étrendet sem követtek a vizsgált személyek.

A gázcsere paramétereket Jaeger CPX Vyntus készülékkel mértük. A pulzust folyamatosan Garmin HRM Pro mellkaspánttal mértük és Garmin 7s Sapphire Solar okos órára mentettük. A tejsavmérése kerékpárergométeres vizsgálatoknál nyugalomban és terhelési lépcsőnként hiperemizált fülcimpából történt (Lactate Plus, Nova, Biomedical).

A spiroergometriai vizsgálatok eredményeiből egyrészt a teljesítményadatokat (Watt), másrészt a VO_2 (oxigénfelvétel) és VCO_2 (széndioxid leadás) percenkénti ml-es átlagértékeit (STPD) használtuk fel. A gázcsere értékeket osztottuk 22,41-el, így a VO_2 és a VCO_2 értékeket mmol/perc-ben kaptuk meg. Az O_2 felvételből és a CO_2 leadásból megbecsültük a koenzimek mennyiségét.

Az eredményeket a maximális teljesítmény százalékában (Watt%) is meghatároztuk és intenzitási zónánként is összehasonlítottuk (Györe, 2024). Az objektív összehasonlítás érdekében így a nemi eltéréseket és az eltérő vizsgálati protokollból adódó különbségeket is kiküszöböltük.

Első vizsgálatunk egy vita maxima terhelés volt Woodway futószalagon, ahol az intenzitást percenként lineárisan növeltük a teljes kifáradásig. Ezt a csoportot a Magyar Testnevelési és Sporttudományi Egyetem (MTSE) szabadidő sportoló hallgatói alkották, 17 fő, ebből 9 nő ($22,5 \pm 1,8$ év; $166,7 \pm 6,0$ cm; $60,5 \pm 5,2$ kg) és 8 férfi ($23,7 \pm 2,7$ év; $179,6 \pm 4,4$ cm; $79,3 \pm 6,5$ kg) vett részt ebben a vizsgálatban.

Második vizsgálatunk többlépcsős, spiroergometriás (Jaeger CPX Vyntus) kerékpárergométeres (MonarkErgomedic 839E) terhelésből állt. Az intenzitást 3 percenként 35 Wattal növeltük (Maunder és mtsai, 2020). Ez a csoport 12 fő MTSE szabadidő sportoló hallgatóból, 6 nő ($21,2 \pm 0,5$ év; $170,3 \pm 4,0$ cm; $62,2 \pm 4,0$ kg) és 6 férfi ($22,0 \pm 0,9$ év; $179,3 \pm 4,3$ cm; $78,3 \pm 10,8$ kg), valamint 7 férfi országúti kerékpárosból ($18,2 \pm 2,6$ év; $180,4 \pm 7,3$ cm; $63,7 \pm 7,8$ kg) állt.

Statisztika

Az adatok feldolgozása során Excel táblázatkezelő programot és Statistica szoftvert használtunk. Az eredmények összehasonlítására ANOVA variancia-analízist, valamint Tukey post-hoc tesztet alkalmaztunk. A szignifikanciaszintet $p < 0,05$ -ben határoztuk meg.

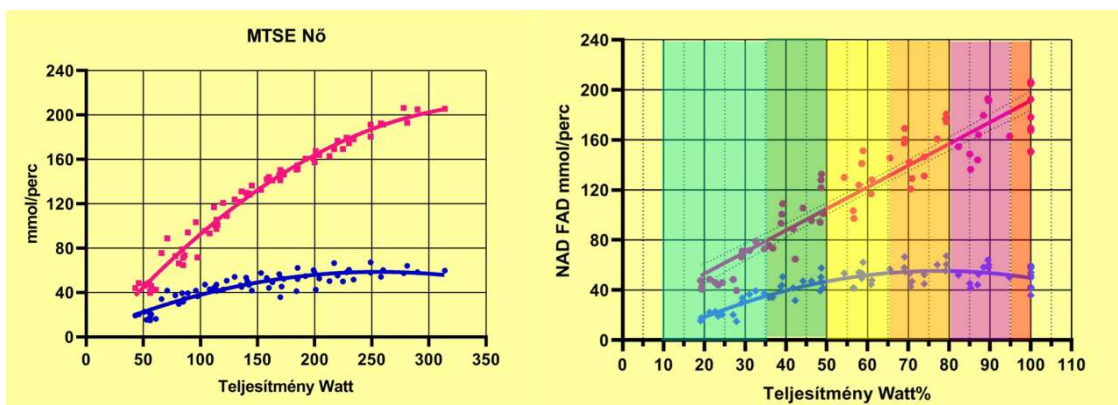
4) Eredmények

a) Vita maxima terhelés: Teljesítmény és koenzimek változása

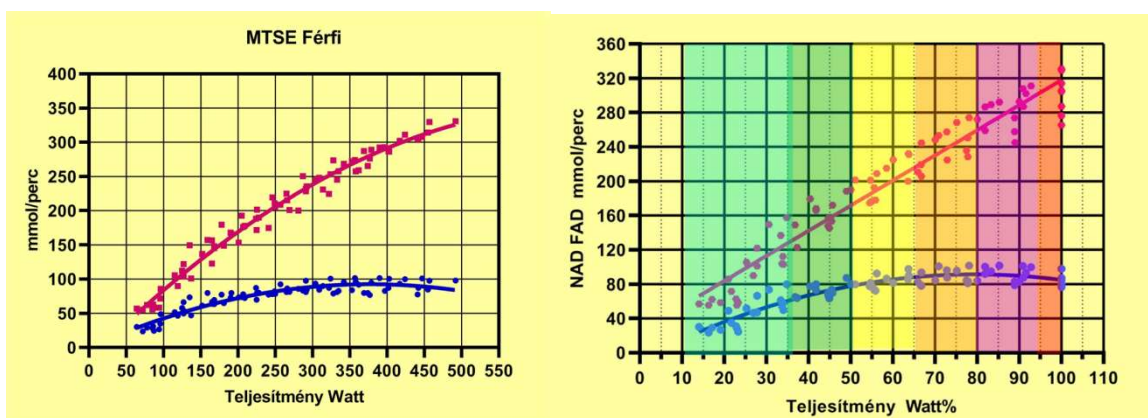
Az MTSE hallgatók futószalagos vita maxima terhelése után meghatároztuk a NAD és a FAD értékét, majd ábrázoltuk a teljesítmény függvényében. A teljesítményt Watt%-ban is kifejeztük, ami nemtől független összehasonlítást is lehetővé tesz. 6 intenzitási zónát határoztunk meg ($<35\%$; $35-50\%$; $50,1-65\%$; $65,1-80\%$; $80,1-95\%$; $95,1-100\%$). A könnyebb átláthatóság érdekében az ábrákon az intenzitási zónákat szín szerint kódoltuk is. A NAD és a FAD mennyiségét mmol/perc-ben fejeztük ki. Az MTSE nők és férfiak eredményeit a 3. és 4. ábra szemlélteti.

A NAD értéke (piros pontok és vonal) a teljesítmény függvényében mind a nők, mind a férfiak esetében folyamatosan nőtt és hasonlóan változott, ugyanakkor a férfiak a magasabb teljesítményéhez nagyobb NAD érték tartozott. A FAD (kék egyedi pontok és vonal) mind a két nem esetében, terhelés alatt hasonló görbét írt le, viszont megfigyelhető, hogy a terhelés alatt, az intenzitás növelésével ellaposodik, platózik, majd kismértékben csökkenni kezdett. A NAD és a FAD változását a teljesítmény függvényében non-lineáris, másodfokú összefüggés írja le.

Amennyiben a maximális teljesítmény százalékában vizsgáljuk a koenzimek változását, a nők és a férfiak esetében a NAD és a Watt% között lineáris összefüggést kaptunk, míg a FAD értéke mind a két nem esetében a maximális teljesítmény 65-80%-a között érte el a maximális értékét. Az 3. és 4. ábra jól szemlélteti, hogy a koenzimek az intenzitás függvényében, függetlenül az abszolút mennyiségüktől és a nemtől is, ugyanolyan tendencia szerint változtak a terhelés során.

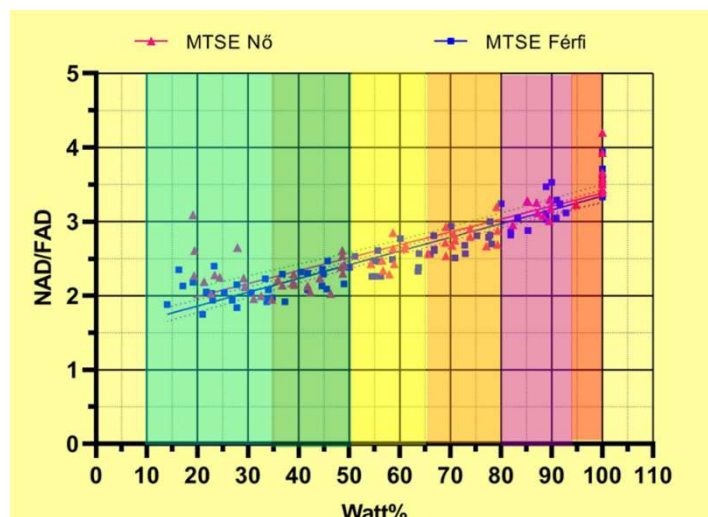


3. ábra. A NAD és a FAD változása vita maxima terhelés során nőknél a teljesítmény és a maximális teljesítmény százalékának függvényében (-NAD; - FAD)



4. ábra. A NAD és a FAD változása vita maxima terhelés során férfiaknál a teljesítmény és a maximális teljesítmény százalékának függvényében (-NAD; - FAD)

Ezen összefüggések ismeretében kiszámítottuk a NAD/FAD hányadost és a Watt% függvényében grafikonon ábrázoltuk a nők és férfiak futószalagos eredményeit (5. ábra). 35%-os intenzitás alatt mind a két nem esetében jelentős szórás figyelhető meg, ugyanakkor 35-90%-os intenzitás között a nők és a férfiak NAD/FAD hányados értéke lineárisan nő, és azonos összefüggést mutat. A kapott eredmények alapján úgy tűnik, hogy a férfi és női MTSE hallgatók hasonló edzettségi állapotot mutatnak.



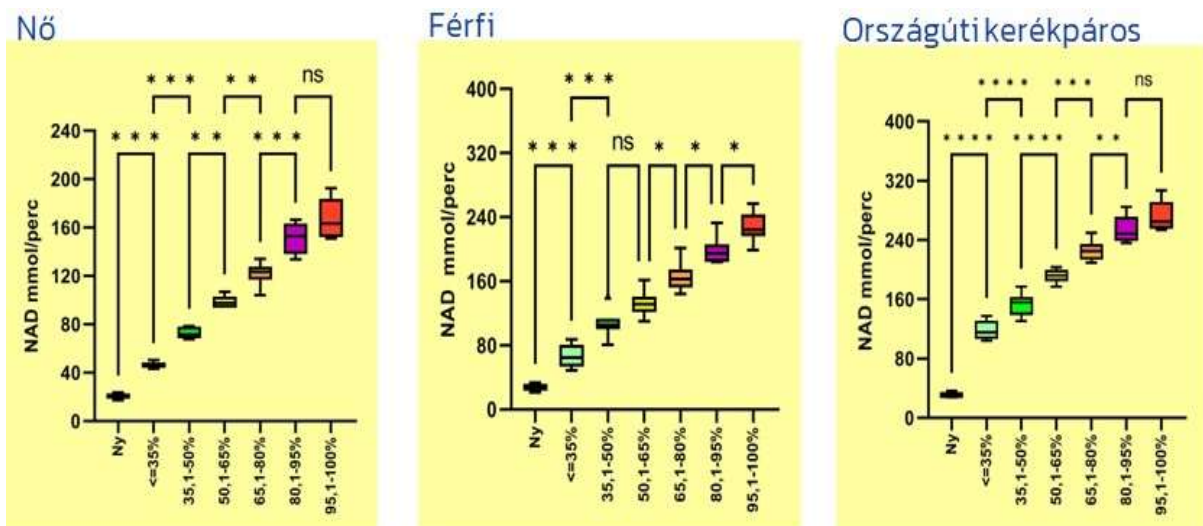
5. ábra. A NAD/FAD hányados változása futószalagos vita maxima terhelés során a Watt% függvényében

b) A koenzimek változásának vizsgálata az intenzitási zónák függvényében kerékpárergométeres terhelés során

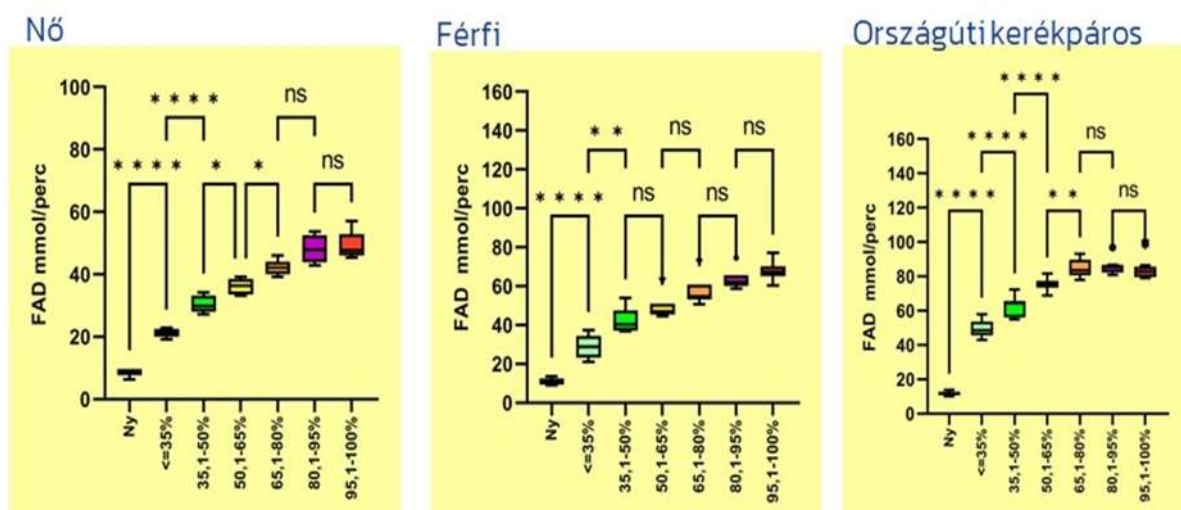
A kerékpáros terhelési eredményeket a futószalagos intenzitási zónák terheléstapasztalatai alapján, annak megfelelően ábrázoltuk, vagyis az egyes intenzitási szintek azonos színekkel kaptak. Külön ábrázoltuk a MTSE hallgató nőket és férfiakat, valamint az országúti kerékpárosokat. A NAD mennyisége a kerékpáros terhelések során a maximális terhelésig szignifikánsan nőtt az előző intenzitás zónához viszonyítva az egyes csoportokban (6. ábra).

A növekedés tendenciája az intenzitás függvényében nézve, független volt a nemtől és az edzettségi szinttől. Ugyanakkor a MTSE férfihallgatók NAD értékei, hasonlóan a futószalagos terheléshez, magasabbak voltak a női hallgatók értékeihez képest.

Az országúti kerékpárosok NAD mennyisége pedig minden intenzitási zónában magasabb volt a férfihallgatók értékeihez képest. Ez a sportági adaptációval és a magasabb edzettségi szinttel és ennek következtében a magasabb oxigénfelvétellel van összefüggésben.



6. ábra. NAD mennyiségének változása az intenzitási zónákban (MTSE nők, férfiak és országúti kerékpárosok)



7. ábra. FAD mennyiségének változása az intenzitási zónákban (MTSE nők, férfiak, országúti kerékpárosok)

Az 7. ábrán látható, hogy az MTSE nőknél és az országúti kerékpárosoknál a FAD mennyisége az előző intenzitási zónához képest szignifikánsan nőtt a maximális teljesítmény 80%-ig, míg az MTSE férfiaknál szignifikáns változás csak 50%-os értékig volt megfigyelhető. A maximális teljesítmény 80%-ának elérése után nem volt szignifikáns különbség egyik csoportban sem a FAD értékének zónánkénti változásában.

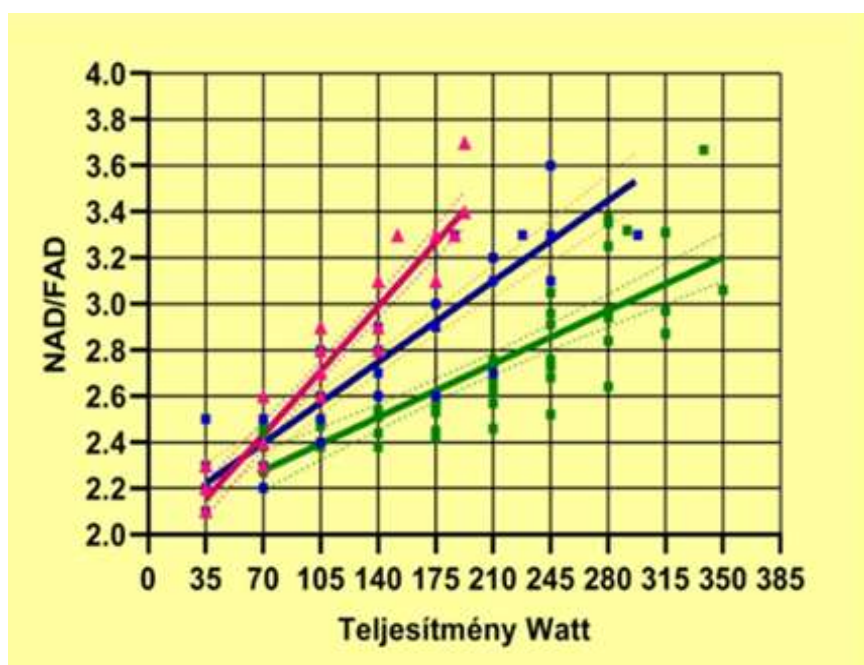
A NAD-hoz hasonlóan az MTSE férfhallgatók FAD értékei magasabbak voltak, mint a nőké, az országúti kerékpárosok koenzim mennyisége a nyugalmi szintet leszámítva minden intenzitási lépcsőn magasabb volt, mint az MTSE férfhallgatóké. Továbbá megfigyelhető, hogy náluk a FAD mennyisége maximális intenzitásnál kis mértékben csökkent is, bár ez a változás nem volt szignifikáns. Az, hogy az országúti kerékpárosok magasabb koenzim

mennyiséggel rendelkeztek azt jelzi, hogy gazdaságosabban és tovább hasznosítják a zsírsavakat energianyerés céljából.

c) A NAD/FAD arány és a vértéjsav összefüggésének vizsgálata az intenzitás függvényében

A NAD/FAD aránnyal jól jellemezhetők a szervezetben éppen végbemenő energiaszolgáltató folyamatok. A fokozódó intenzitás következtében a szénhidrát felhasználás nő, így a NAD/FAD értéke 4 felé tolódik el.

Zsírsavfelhasználás esetén a NAD/FAD hányados 2 körüli értéket mutat, míg a döntően szénhidrát felhasználás 3-4 közötti érték között van.

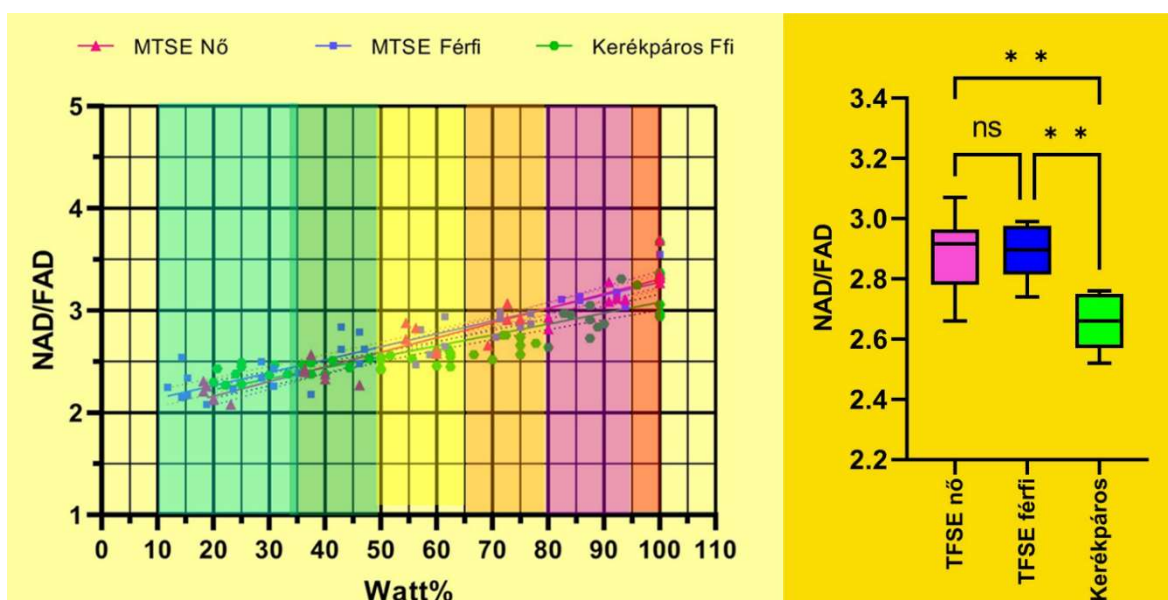


8. ábra. NAD/FAD arány változása a teljesítmény függvényében (rózsaszínegyedi háromszögek és vonal – MTSE nők; kék négyzetek és vonal – MTSE férfiak; zöld négyzetek és vonal – országúti kerékpárosok)

Az egyes csoportok NAD/FAD arányát vizsgálva azt látjuk, hogy mind a három vizsgált csoport lineáris összefüggést mutatott a teljesítménnyel (8. ábra). Az MTSE nők görbéje a legmeredekebb, míg az országúti kerékpárosok görbéje a leglaposabb, ami a jobb zsírsavfelhasználásra és a gazdaságosabb energiagazdálkodásra enged következtetni. Tehát ők magasabb intenzitáson és időben is tovább használták zsírsavakat energianyerés céljából, mint a szabadidő sportoló MTSE hallgatók.

A 9. ábrán mutatjuk be az egyes vizsgálati csoportoknál a kerékpáros terhelés során, a NAD/FAD hányados változását a maximális teljesítmény százalékában függvényében. A NAD/FAD arány a terhelés alatt 2-4 érték között mozog a terhelés alatt mindegyik csoport esetében. Hasonlóan a futószalagos terheléshez, az MTSE női és férfi hallgatók NAD/FAD aránya között nincs különbség az egyes intenzitás zónákban. Az országúti kerékpárosok NAD/FAD hányadosa a maximálisteljesítmény 65,1-80%-a között szignifikánsan alacsonyabb, mint az egyetemi hallgatóké, míg a női és férfi hallgatók között nem találtunk szignifikáns különbséget.

Mindez szintén azt bizonyítja, hogy az országúti kerékpárosok magasabb intenzitáson is képesek még a zsírsavak hasznosítására energianyerés céljából, mint a szabadidő sportoló egyetemi hallgatók.



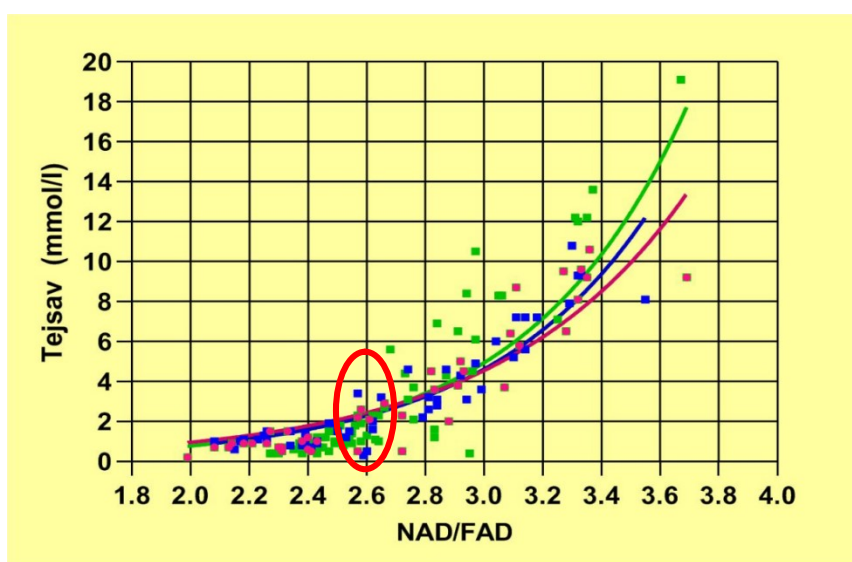
9. ábra. NAD/FAD arány a teljesítmény százalékában

NAD/FAD 65,1-80%

A 10. ábrán a NAD/FAD hányados függvényében vizsgáltuk a vérsav koncentrációt. Az ábrán jól látszik, hogy a NAD/FAD hányados 2,6-os értékéig a vér tejsav koncentráció mind a három vizsgált csoport esetében 2 mmol/l alatt maradt. A szakirodalom a 2 mmol/l tejsavkoncentrációt tekinti az aerob küszöb határértékének, ezen intenzitás alatt a szervezet döntően zsírsavat használ fel az ATP reszintézishez. Az ábrán az is jól látszik, hogy ha a NAD/FAD hányados 2,6 fölé emelkedik a tejsav koncentráció egyre inkább meghaladja 2 mmol/l értéket mindegyik vizsgálati csoportban. Ennek alapján úgy gondoljuk, hogy NAD/FAD hányados 2,6 értéke tekinthető az aerob átmenetnek, azaz ennél az intenzitásnál a zsírsavfelhasználás és a szénhidrát felhasználás közel azonos mértékű.

Ha megtekintjük újra a 9. ábrát, látható, hogy a NAD/FAD arány 2,6-os értékét csak a maximális intenzitás 70-75%-nál éri el a kerékpárosok, míg a hallgatók már 55-60%-nál elérik ezt az értéket. A 2,6-os NAD/FAD értéktől kezdve az intenzitás növelésével előtérbe kerül a szénhidrát felhasználás, így a $\text{NADH} + \text{H}^+ / \text{NAD}$ arány is egyre jobban megnő, mivel a felvett O_2 már nem elég az oxidatív foszforilációhoz, ennek következtében a tejsav felszaporodik és meredeken, exponenciálisan nő.

Az oxigénhiány és a fokozódó izommunka következtében a tejsav felszaporodik a szervezetben, és a tejsavelimináció elmarad a termelődéstől. Az anaerob folyamatok következtében a H^+ ionok koncentrációja megnő, az pH értéke csökken, mely a központi és perifériás fáradási folyamatokhoz hozzájárulva csökkenti a teljesítményt.



10. ábra. NAD/FAD arány és a tejsav összefüggése (rózsaszín – MTSE nők, kék – MTSE férfiak, zöld – országúti kerékpárosok)

5) Megbeszélés

A koenzimek pontos meghatározása igen nehéz folyamat, ugyanis mennyiségük nemcsak pillanatonként, hanem szövetenként, sejtenként és mitokondriumonként is változik. A teljes szervezetben, az oxidált alakjuk összmenyisége az oxigénfelvételtől jól meghatározható, mivel egy koenzimhez egy oxigénatom társul. Így a NAD és a FAD molekulák számának összege egyenlő az oxigén atomok számával, vagyis a felvett O_2 molekulák kétszeresével.

Kevés kutatást találtunk a FAD-dal kapcsolatban, a legtöbb vizsgálat a NAD-ot veszi célba, mert könnyebben mérhető és nagyobb mennyiségben is keletkezik.

A NAD szerepét és variábilis mennyiségét kimutatták a gyulladásos folyamatokban, az öregedésben, a rákos folyamatokban és a neurodegeneratív betegségekben (Heikal, 2010). A mitokondriumok kulcsszerepet játszanak az oxidatív stresszben és a programozott sejthalálban. Ebből kifolyólag, ha sérül a mitokondriális DNS, az befolyásolja az enzimkomplexek működését és így számtalan betegséghez vezethet. Mivel a redukált NADH és a FAD fontos szerepet játszanak a celluláris oxidációs-redukációs reakciókban, ezért vizsgálatuk elengedhetetlen lehet a betegségek feltárásában.

A NADH és a FAD természetesen fluoreszkáló molekula, így egy új módszer alapján autofluoreszcenciával lehetőség nyílt az élő sejtekben non-invazív módon vizsgálni a metabolikus aktivitásukat (Heikal, 2010). Így élő sejtekben a NADH és a FAD mennyisége és aktivitása meghatározható. Az elektronmikroszkópos vizsgálatok képet adnak az elektrontraszportlánc aktivitásáról, valamint a szubsztrátellátásról (Bartolome és mtsai, 2022). Az eljárás azonban drága, igen költséges laboratóriumi háttérrel igényel és csak sejtek, vagy egyes szövetek vizsgálatára alkalmas, így a kutatásban a holisztikus szemlélet nehezen valósítható meg.

Egy 2024-es friss kutatás a FAD szerepét vizsgálta a légzési komplexben az anyagcserefolyamatokkal összefüggésben (Gnaiger, 2024). Az uralkodó elképzelés, hogy a redukált NADH és $FADH_2$ kofaktorok elektronokat visznek át a trikarbonsav ciklusból a mitokondriális elektrontranszfer rendszerbe. Véleménye szerint a CII. komplex szubsztrátjaként az elektortranszport láncban, valójában a szukcinát oxidációjához kapcsolódik és külön folyamatnak tekinti a β -oxidációból származó $FADH_2$ oxidációját. Szerinte a zsírsav-oxidációs dehidrogenázok az elektronokat a Q-csomóponthoz vezetik, de nem a CII-komplexen keresztül.

Ez a megkülönböztetés azért is elképzelhető, mivel vizsgálatunkban a FAD mennyisége a maximális zsírsavfelhasználás (VO_{2max} 40-60%-a) után is tovább nőtt, és csak a maximális

teljesítmény 65-80%-a körül érte el a maximumát, ami a szukcinát dehidrogenáz enzim fokozott aktivitására utal.

6. Összefoglalás

Kutatásunk célja az volt, hogy átfogóbb ismeretet és új megvilágítást nyújtson a NAD és a FAD szerepéről az állóképességi sportok és a metabolikus folyamatok tekintetében.

Megállapítottuk, hogy a NAD és a FAD változása az intenzitás függvényében nézve, független volt a nemtől, a terhelési protokolltól és az edzettségi szinttől, ugyanakkor abszolút értékekben szorosan összefügg a teljesítménnyel, ami a sportági adaptációval és a magasabb edzettségi szinttel és ennek következtében a magasabb oxigénfelvétellel van összefüggésben.

Amennyiben a maximális teljesítmény százalékában vizsgáljuk a koenzimek változását az MTSE hallgatók futószalagos és kerékpárergométeres, valamint az országúti kerékpárosok vizsgálata során a NAD és a Watt% között lineáris összefüggést mutattunk ki, míg a FAD értéke a maximális teljesítmény 65-80%-a között elérte, illetve megközelítette a maximális értékét. A mérési eredményeink alapján elmondhatjuk, hogy feltételezésünk annyiban igaznak bizonyult, hogy ahol a FAD értéke az intenzitás növelésével nem változik, illetve stagnál, ott a citrátkör sebessége is elérte a maximumát. Ennek alapján megállapíthatjuk, hogy a terhelés alatti FAD változása hamarabb jelzi az aerob folyamatok határát, mint ha csak az oxigénfelvételt vennénk alapul. Ugyanakkor a NAD változása szorosabb összefüggést mutat a teljesítménnyel, illetve az anaerob anyagcserével is. Minél magasabb a FAD értéke annál több áll rendelkezésre a szervezetben, annál hosszabb ideig tud nagyobb aerob teljesítményt elérni. A zsírsavfelhasználás révén oxigén jelenlétében nem keletkeznek káros gyökök/savak, melyek a teljesítmény csökkenéséhez vezetnek. A hosszú távú állóképességi edzésekkel adaptálhatjuk a szervezetünk, miáltal megnövekedik a mitokondriumok száma is, így hatékonyabb működést biztosítva az anyagcserefolyamatokhoz.

Vizsgálataink során megállapítottuk, hogy mind a NAD, mind a FAD a teljesítmény Watt%-os függvényében nemtől és edzettségi szintől függetlenül ugyanolyan tendencia szerint változik a szervezetben. A NAD a lépcsőnkénti összehasonlítások során majdnem minden esetben szignifikánsan növekedett az intenzitás előrehaladtával, egyenletes, lineáris növekedést mutatva. A FAD ezzel szemben az intenzitás 65%-áig ugyan szintén szignifikánsan emelkedett majdnem minden vizsgálati csoport és intenzitási lépcső esetében, ám ettől az intenzitási zónától az emelkedése megállt és stagnált vagy az országúti kerékpárosoknál kis mértékben csökkent is.

Továbbá kiderült az is, hogy az országúti kerékpárosok szignifikánsabb magasabb koenzim mennyiséggel rendelkeztek mind a NAD, mind a FAD tekintetében, mely az állóképességi edzettség magasabb voltát is hivatott jelezni. Ezt alátámasztja az is, hogy nagyobb teljesítményen és hosszabb ideig is végezték a terheléses vizsgálatokat, melyhez alacsonyabb NAD/FAD arány is párosult.

A NAD/FAD aránnyal jól jellemezhetők az anyagcsere folyamatok, így ismerete és vizsgálata hozzájárulhat az anaerob folyamatok megértéséhez is. Értéke 2 és 4 közé esik, ahol 2 a zsírsavfelhasználást 4 pedig a szénhidrát felhasználást jelzi. A tejsav koncentráció emelkedése is többek között a koenzimek dinamikájával magyarázható.

A kutatásunk során kevés információ állt rendelkezésünkre a FAD-dal kapcsolatban, sporttudományi megközelítéssel nem vagy csak közvetett módon találkoztunk. Az általunk kidolgozott új metodikával, noninvazív módon, jó megközelítéssel tudjuk megbecsülni a koenzimek mennyiségét és ezáltal a metabolikus folyamatok változását folyamatos terhelés alatt. Az általunk kidolgozott módszer telített zsírsavak esetén jól használható és pontosabb megközelítést ad az aerob és az anaerob folyamatokról, mintha önmagában csak a RER értékét vizsgálnánk. Ezzel a módszerrel az összetelített közepes és rövid szénláncú zsírsavak metabolizmusát is vizsgálni tudjuk, míg a RER esetén a zsírsavfelhasználást minden esetben csak palmitinsavra ($RER \sim 0,7$) adja meg. Telítetlen zsírsavak esetén a NAD/FAD hányados kicsit magasabb értékű lesz, szénlánc hosszúságtól függően 2,1-2,2 értéket érhet el.

7. Irodalomjegyzék

- Ádám V. (szerk.) (2016): Orvosi biokémia. Semmelweis Kiadó és Multimédia Stúdió, Budapest.
- Bartolomé, F., Abramov, A.Y. (2015): Measurement of mitochondrial NADH and FAD autofluorescence in live cells. *Mitochondrial Medicine: Volume I, Probing Mitochondrial Function*, 263-270.
- Dashty, M. (2013): A quick look at biochemistry: carbohydrate metabolism. *Clinical Biochemistry*, 46(15), 1339-1352.
- Gnaiger, E. (2024). Complex II ambiguities–FADH₂ in the electron transfer system. *Journal of Biological Chemistry*, 300(1), 105470.
- Györe I. (2024): Válogatott férfi evezősök energia hasznosulásának mérése RP3-T evezős ergométeren különböző intenzitású terhelések során. *Magyar Sporttudományi Szemle*, 108. 59.
- Heikal, A.A. (2010): Intracellular coenzymes as natural biomarkers for metabolic activities and mitochondrial anomalies. *Biomarkers in medicine*, 4(2), 241-263.
- Leites, G.T., Cunha, G.S., Chu, L., Meyer, F., Timmons, B.W. (2016). Energy substrate utilization with and without exogenous carbohydrate intake in boys and men exercising in the heat. *Journal of Applied Physiology*, 121(5), 1127-1134.
- Maunder, E., Plewis, D.J., Kildring, A.E. (2018): Contextualising maximal fat oxidation during exercise: Determinants and normative values. *Frontiers in Physiology*, 9.
- Muscella, A., Stefano, E., Lunetti, P., Capobianco, L., Marsigliante, S. (2020): The regulation of fat metabolism during aerobic exercise. *Biomolecules*, 10(12), 1699.
- Pavlik G. (2013): Élettan-sportélettan. Medicina. Budapest.
- Peronnet, F., Massicotte, D. (1991): Table of nonprotein respiratory quotient: an update. *Canadian Journal of Sport Science*, 16(1), 23-29.
- Radák Zs. (2019): Edzésélettan. 2.0. Budapest.
- Randell, R.K., Rollo, I., Roberts, T.J., Dalrymple, K.J., Jeukendrup, A.E., Carter, J.M. (2017): Maximal fat oxidation rates in an athletic population. *Medicine and Science in Sports and Exercise*, 49. 133-40.
- Robert A Robergs, R.A. (1994): Exercise physiology. McGraw-Hill Ryerson, Limited.
- Spriet, L.L., Randell, R.K., (2020): Regulation of fat metabolism during exercise. *Sport Science Exchange*, 33(205), 1-6.

Szmodis, M., Pál, L., Györe, I. (2024): Examination of maximal fat oxidation (MFO) during submaximal ($\text{RER}=1$) bicycle ergometer exercise. Book of Abstracts. 29th Annual Congress of the ECSS, 2 - 5 July 2024, Glasgow - Scotland, UK. 847.