

Nagy-Bozsoky József, Szabó Sándor András, Tótká Zsolt

Magasságfüggő oxigénhiány és a Covid-19-világjárvány

A katonai repülésben a pilóta pillanatnyi cselekvőképzetelenségét okozó repüléselettani kockázatok közül a hypobárikus (magasságfüggő) hypoxia még napjainkban is komoly fenyegetést jelent. A repülésbiztonsági statisztikák és a baleset-kivizsgálások adatai szerint növekvő számban és arányban felmerül a gyanú, hogy az új típusú fedélzeti oxigénforrások (OBOGS)¹ nem képesek minden pillanatban megfelelő oxigénkínálatot biztosítani, így a pilóta mint operátor pillanatnyi fizikai-szellemi teljesítménye elégtelenné válhat. Barokamrában hypobárikus hypoxiában virtuális (VR)² repülés alatti vizsgálati eredményeink megerősítik, hogy az ellentmondó kompenzációs mechanizmusok, a szív-agy-tengely kiszámíthatatlan stresszreakciója miatt az agysejtekben elhúzódó oxigénfelhasználási zavar léphet fel. A korszerű vadászgépeken bekövetkező hypoxiás halálesetek mint UPE³-elemzése különösen indokolt a Covid-19-világjárvány okozta megbetegedés után, amikor a vírusfertőzés okozta tüdőgyulladás és légzőfelszínvesztés (ARDS)⁴ még gyógyulás után is, elhúzódó jelleggel tovább rontja a fenti élettani folyamatokat.

Kulcsszavak: hypobárikus hipoxia, VR- (Virtual Reality) repülés barokamrában, cerebrális pulzoximetria NIRS (Near Infrared Spectroscopy), UPE (Unexplained Physiological Events), Covid-19-világjárvány okozta légzési distressz, poszt-covid tünetek

1. Bevezetés

*„Az embernek fel kell emelkednie a Földről
– az atmoszféra tetejéig vagy azon is túl –,
csak így értheti meg teljesen a világot, amelyben él.”*

Szókratész

Az emberi fizikai cselekvőképesség és szellemi munkavégző képesség számára a repülés mint háromdimenziós dinamikus helyzetváltoztatási képesség új élettani és pszichés kihívásokat jelent. Ezek, különösen vész helyzetben, erősen próbára tehetik a szív- és érrendszeri és agyi keringési reflexek reakciókészségét. Repülésbiztonsági statisztikák szerint a katasztrófák leggyakoribb okai még mindig a repüléselettani stresszortényezők:

¹ OBOGS (On-board Oxygen Generating System): fedélzeti oxigén generátor-rendszer (oxigénforrás).

² VR: Virtual Reality (virtuális valóság) szemüveg.

³ UPE/UPI: Unexplained Physiological Events/Incidents: megmagyarázatlan élettani események, incidensek.

⁴ ARDS: Adult Respiratory Distress Syndrome: felnőttkori légzési elégtelenség tünetegyüttes.

- a magasságfüggő nyomásváltozás csökkenő külső oxigénkinálatot eredményez a belélegzett levegőben;
- a túlterhelés-gyorsulás változása az agyi véráramlást veszélyezteti, ami közvetlen módon rontja az emberi teljesítőképességet, növeli a hiba lehetőségét;
- ezt külön provokálhatja egy légúti vírusfertőzés súlyos, a tüdőlégzőfelszín átmeneti vagy tartós elvesztésével járó formája, mint amilyen a SARS-CoV2⁵ által okozott kétoldali súlyos tüdőgyulladás.

Célunk a katonai repülésben a hypoxia okozta repülésbiztonsági kockázatot jelentő esetek elemzése, majd saját kísérleti elrendezésben, barokamrai VR (virtuális valóság) alkalmazásával szimulált repülési helyzetben az alattomos, lassan felépülő és elhúzódó hypoxia okozta kockázat kórélettani hátterének megvilágítása és magyarázata. Mindezt a Magyar Honvédségben a Covid-19-világjárvány során érintett, lezajlott SARS-CoV-2019 vírus okozta fertőzés után végzett, soron kívüli ROB-vizsgálat (Repülőorvosi Bizottság által végzett repülő-egészségügyi alkalmassági vizsgálat) és barokamrai hypoxia tűrőképességi vizsgálat eredményével egészítjük ki, amely igazolja a vírusfertőzés okozta alattomos, elhúzódó oxigénhiány hatását is.

2. Hypoxia okozta új típusú vészhelyzetek

A repülés kezdete óta a magasságfüggő hypoxiás esetek gyakran vezettek katasztrófához a pilóta teljes vagy részleges cselekvőképтелensége, hibás helyzetfelismerése vagy meglassultsága miatt. (Ennek történeti áttekintését korábbi átfogó könyvfejezetben ismertettük, most csak a legújabbkori, a legkorszerűbb 4., 5. generációs vadászgépeken is fenyegető oxigénhiányos helyzetet elemezzük [1].)

A NATO és az amerikai haderőnem 2000 óta a terminológiában „*mask-on hypoxia*” néven illetett és eredetileg a fedélzeti oxigénellátó-rendszer technikai hibájának tulajdonított több balesetet (mivel a pilótán rajta volt a maszk, és azt hitte, hogy oxigént kap). *Ez jelenleg változás alatt áll*, az UPE/UPI címszó alatt összesítik a nem egyértelműen technikai okokra visszavezethető incidenseket. Az amerikai haditengerészet 2001 óta már 4 korszerű F-18 Hornet vadászgépet és pilótát veszített úgy, hogy a pilótán nagy magasságú repüléskor rajta volt a maszk, de az alacsony kabinnyomás mellett az OBOGS „nem működött megfelelően”, a pilóta eszméletét veszítette, és lezuhant [2]. Egy USAF Amerikai Légierő F22-es gép is lezuhant Elmendorf mellett Alaszkában 2010 decemberében hasonló ok miatt, majd a magassági korlátozások ellenére ismétlődő incidensek miatt az egész flottát (147 db F-22-es vadászgép) több mint egy évig eltiltották a repüléstől. Legújabban az F-35-ös kiképző bázison (LUKE AFB) nem csak növendékeknél észleltek súlyos hypoxiás incidenseket, légzési nehézséget az OBOGS használata közben [3]. Szerencsére a tartalék folyékony oxigénforrás minden esetben megfelelően működött, a pilóták biztonságosan le tudtak szállni. Az incidensek következményeként a teljes flottát, 55 legkorszerűbb lopakodó gépet letiltottak [4]. 2018. február 6-án pedig az amerikai kongresszusban bizottsági meghallgatásra került sor, a légierő felelős vezetőjének beszámolójával. Összesítve: 2007 óta a F-22, F-35, F/A-18, F-15,

⁵ SARS-CoV2: *Severe Acute Respiratory Syndrome*: 2. koronavírus-törzs által okozott súlyos akut légzési tünetegyüttes (2019-ben indult, ma elterjedtebb a Covid-19 – koronavírus-betegség 2019 elnevezés).

F-16, T-6 és T-45 típusok *mindegyikén* legalább 10-10 UPE fordult elő, tehát nem típusfüggő technikai problémáról van szó. Utoljára 2018. februártól a T-6A, az „igásló” kiképzőgép is repülési tilalom alá került, 48 órán belül 9 esetben jelentkező UPE-incidens miatt. Későbbi összesítés szerint csak az F-18 Hornet fedélzetén több mint 603 esetben fordult elő UPE-incidens (nem okozott halált, de a misszió megszakítását indokolta) (1. táblázat).

Az esetek egy részében az UPE a repülés „jóindulatú” (egyébként eseménytelen) fázisában (akár a földön, felszállás előtt is, de már a fedélzeti oxigénrendszerhez csatlakozva) előfordulhat, kizárva a dekompresziós betegség (magassági keszon) és a klasszikus hypoxia elemi eshetőségét is. A régebbi géptípusok (F-15, F-16 és A-10) esetében felmerült karbantartási-technikai ok, az újaknál (F-22, F-35) a rossz technikai tervezésből fakadó rosszabb légzési környezet, de mindenhol jelen van, ahol személyi magassági védőfelszerelést, oxigénrendszert alkalmaznak, illetve minden esetben szerepet játszhat a fokozott problématudatosság és jelentési kötelezettség. 2015-ben F-15 C fedélzetén is leírták (pedig az folyékony LOX oxigénforrást használt): zsidbadás, szédülés, koncentrációképesség csökkenése kapcsán a pilóta hiába kapcsolt vészhelyzeti oxigénre, alig tudott időben visszatérni a bázisra, és leszállás után is lassan tért magához, a későbbi műszaki és élettani kivizsgálás nem talált problémát az ellenőrzési listában. Ugyanakkor elismerik, hogy a probléma kijavítására tett technikai lépések, műszaki megoldások kommunikációja nem volt megfelelő a pilóták felé, bizonytalanságban hagyva őket a kibővített ellenőrzési listák megfelelőségéről, ad absurdum az ellenőrzési lista megszegésére kényszerítve őket (volt olyan eset, hogy a feltételezett levegőszennyeződés kiszűrésére alkalmazott plusz szénzsűrő annyira fokozta a légúti ellenállást, hogy a pilóta a maszk levételére kényszerült!) [5].

Korábban a Magyar Honvédség Gripen vadászgépein is előfordultak hasonló incidensek, de a pilóták a barokamrai gyakorlatnak köszönhetően időben észlelték az oxigénhiány fenyegető tüneteit, és alacsonyabb magasságra süllyedve megelőzték az eszméletvesztést [6]. Ugyanakkor 2020-ban a Gripent gyártó SAAB repülőgépgyár is adott ki figyelmeztetést az OBOGS hibakódjaira és az oxigénhiány gyanúja esetén követendő eljárásra vonatkozóan, amely alapján az MH 59 Szentgyörgyi Dezső Repülőbázis Repülésbiztonsági ajánlást adott ki [7].

A pilóta perspektívájából (egyedül megküzdve a kiképzés során tanult eljárásrend, a vészhelyzeti gáznemű tartalékokoxigén-adagolás hatástalanságával) pedig az Amerikai Légierő szaklapja írt összefoglaló cikket, hangsúlyozva a repülőorvosi és repülőműszaki együttműködés fontosságát a probléma megnyugtató rendezéséhez. Ez a cikk – az F-22-es vadászgép esetében különösen – hangsúlyozza, hogy a repülőgép működési tartománya (*flight envelope*, repülési burok) messze meghaladja az emberi teljesítőképesség határát, a magassági és gyorsulási túrképesség vonatkozásában. Az az álláspont, miszerint technikailag elég „optimális” nyomáson (kabinhermetizációval) és „optimális” koncentrációval az oxigént biztosítani a pilótának, nem jelent teljes, biztonságos megoldást. Megfelelően működő repülőgép (magassági és gyorsulási tartományhoz igazodó, igényeknek megfelelő nyomás és oxigénadagolás) és egészséges pilóta (teljes oxigénigény-hasznosulás) folyamatos interakciójától függ, hogy lesz-e UPE, de maga a jelenség szinte független a repülőgép típusától, működési tartományától, a hajtómű típusától, és a repülés bármely fázisában előfordulhat (csak a hermetizált kabinnal repülő szállítógépeken nem jelentkezik, ahol nincs személyes életfenntartó vagy oxigénrendszer) [5].

1. táblázat
 „Megmagyarázatlan (hypoxiajellegű) Élettani Események”, UPE
 statisztikai összesítése (a szerző [8] alapján)

UPE - HYPOXIA JELLEGŰ ESEMÉNYEK									
	F-22A	F-15C/D	F-15E	F-16C/D	A-10C	F-35A	T-38C	T-6A	Összes
2008	2	1	0	2	1	-	0	2	8
2009	2	0	0	7	1	-	1	3	14
2010	2	3	1	4	1	-	0	5	16
2011	10	1	5	6	0	-	1	3	26
2012	15	2	3	10	2	1	1	4	38
2013	5	3	3	7	2	1	0	3	24
2014	2	2	2	11	2	1	1	2	23
2015	2	12	1	13	3	1	5	4	41
2016	5	20	2	12	1	2	3	3	48
2017	1	1	2	12	6	6	2	4	34
2018	-	-	-	-	-	-	-	22	
Összes	46	45	19	84	19	12	14	55	294

A fentiek alapján a pilóták által leírt és elszenvedett fedélzeti élettani incidensek nem kellő magyarázata, illetve a hypoxiás állapot elhúzódása („post”, azaz utóhatás, „hangover”, azaz másnaposság jelleggel) komoly repülésbiztonsági problémát jelent mind a mai napig. A NATO Standardizációs Testület Repülőorvosi Munkacsoport 2019-es párizsi, 2020-as és 2021-es online ülésein több ország légierő kutatóintézetei részéről hangzott el előadás a probléma okának kutatására vonatkozóan, egyértelmű eredmények és megoldási javaslatok nélkül. *Jelenleg ez az első számú repülésbiztonsági probléma a NATO-n belül.* A jelenlegi kutatások nem zárják ki sem a humán élettani tényezők, sem a kabinkörnyezeti tényezők kombinált élettani hatását, de az adatok jelenleg nem elégségesek egyik teória igazolására sem (1. ábra) [9].

3. Oxigénkínálat és -hasznosulás vizsgálata hypobáriában

A fedélzeti oxigénrendszer (korábban gáz-, illetve LOX folyékonyoxigén-forrással) feladata magasságtól függetlenül a tengerszinti (vagy ahhoz közeli) oxigénkínálat biztosítása a légutakban és a tüdőben). A legtöbb harci repülőgépek fedélzeti oxigénadagolásért felelős jelenlegi megoldása az OBOGS- (szilárd fázisú oxigénforrású) rendszer, amely a maximális (tengerszinti egy atmoszféra össznyomás mellett, azaz normálisnak megfelelő tüdő alveoláris [léghólyagocskák] két futballpályányi összesített felszínén ható) oxigén résznyomás, vagyis 103 Hgmm és a minimális (azaz hypoxia tüneteit még megelőző oxigén résznyomás PalvO_2 60 Hgmm) parciális oxigénnyomás között tartja a termelt/átpasszált oxigén nyomását, koncentrációját.



HUMÁN ÉLETTANI HATÁSOK:

Oxigén (túl sok vagy túl kevés)
 Szén-dioxid (túl sok vagy túl kevés)
 Tüdő és agyi keringés változása
 Vérnyomás változása
 Folyadékgyengély
 Hőmérsékleti terhelés
 Tüdő atelectasia (összenyomottság)
 Alacsony légköri nyomás
 Dekompresszió (nitrogénbuborékok)

KABINKÖRNYEZETI HATÁSOK:

Túlterhelés-gyorsulás
 Kabinlevegő minősége
 Ember-gép kapcsolat (interfész, csatlakozók)
 Légnyomás változása
 Életfenntartó rendszerek (szabályozók)



1. ábra

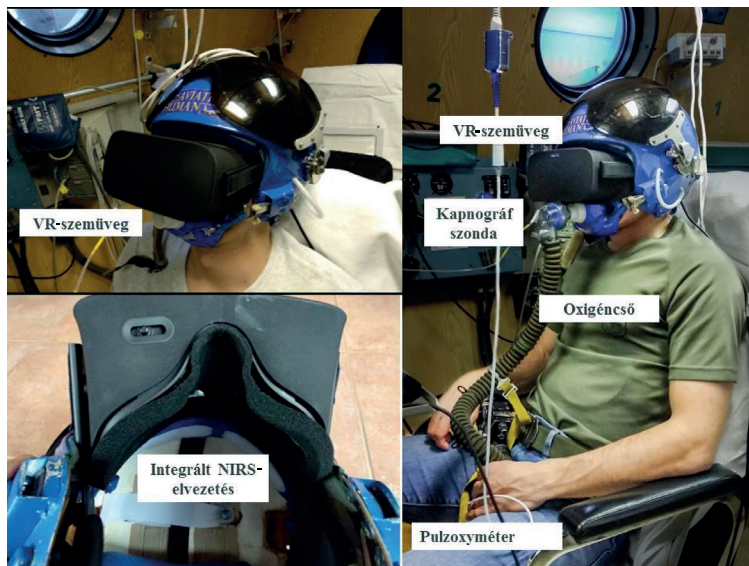
UPE lehetőség oki tényezői (a szerző [9] alapján)

A magassági hypobarikus hypoxia élettani következményeit a Magyar Honvédség szakemberei által fejlesztett VR-szemüveg által biztosított szimulált barokamrai repüléssel kombinálva vizsgáltuk, modelleztük a repülési feladat (akár vészhelyzet) közben kialakuló agyi vérkeringés-változást [10]. (A VR-szemüveg fejlesztését, technikai lehetőségeit illetően más szakirodalmi forrás részletes elemzést nyújt [11].) Ugyancsak korábban közöltük összefoglalónkat az orvosi biológiai adatrögzítés alapelveit és történeti fejlődési fokozatait illetően, illetve a jelenleg alkalmazott komplex repülőorvosi monitorizáló rendszer felépítését és VR-ral való integrációját [1],[12] (2. ábra).

A NIRS-technika (mint az agyi vérkeringés és oxigénkínálat változásának nyomon követésére közvetlenül alkalmas módszer) számos repüléssel kapcsolatos kutatásban jól alkalmazható noninvaszív technika: a homlok bőrére helyezett elektródák a fejbőrön keresztül képesek mérni az agyban, a homloklebeny kevert vénás (már oxigénfelhasználás jeleit mutató) ereiben a vérfesték (hemoglobinn) abszorpciós spektrumának változásával az oxihemoglobin (oxigént kötő vérfesték) mennyiségét a deoxy-hemoglobinhoz (oxigénmentes vérfestékhez) képest (3. ábra).

A mért változások jól korrelálnak az egyéb testrészekben (fülcimpa, ujj) elhelyezett, illetve más módszerrel (ki-/belélegzett gázkoncentráció érzékelése) oxigénmérő eszközök által mért értékekkel [13]. A talált agyi oxigénszint-csökkenés kórjelző, az intenzív terápiában prognosztikai értékű (20%-nál nagyobb műtét alatti esése rontja a műtét utáni túlélés esélyét), és felhasználható az agyi autonóm érreguláció (véráramlás-szabályozás) noninvaszív jellemzésére [14], [15]. Az agyi funkcionális MRI- (mágneses rezonancia elvén alapuló képalkotás) és NIRS-vizsgálatok összehasonlító elemzése pedig igazolta, hogy a kognitív feladat tengerszínti nyomáson és normális oxigénkínálat mellett is közel azonos módon aktiválja

a különböző agyi területeket, vagyis a morfológiai aktivitási jelek és az oxigénfelhasználás mértéke párhuzamosan változnak [16].



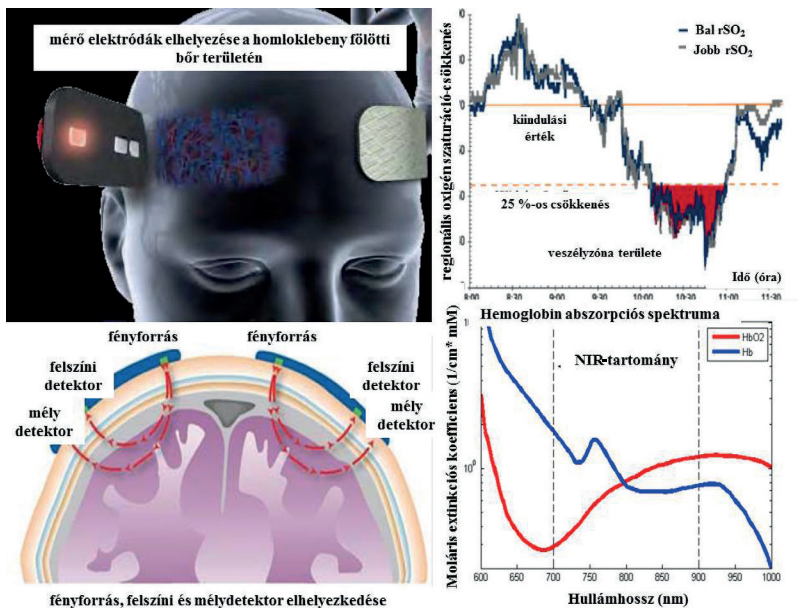
2. ábra

NIRS- és VR-szemüveg integrációja barokamrai szimulált felszállás közben [a szerző saját felvétele kísérleti felszállás közben]

3.1. Anyag és módszer

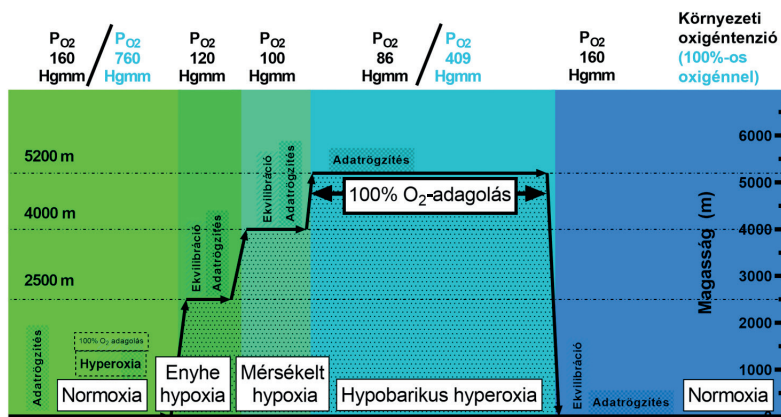
A kísérleti felszállások az MH Egészségügyi Központ Kecskeméti Repülőorvosi, Alkalmasságvizsgáló és Gyógyító Intézet (MH EK RAVGYI) Magasságélettani Osztály barokamrájában történtek. Célul tűztük ki az enyhe (2500 m-es), a mérsékelt (elvileg jól kompenzálható 4000 m-es) hypoxiás magasság és az oxigénlégzéssel (elvileg teljesen) kompenzált, 5200 m-es, hypobáriás magasság, valamint a tengerszinti nyomásra való visszatérés utáni állapot élettani jellemzését. A NIRS- (agyi véroxigénszint), kapnográf- (végkilégzési szén-dioxid) értékek mérését adott magasságon 5-5 perc ekvilibrációs idő után, 12 önkéntesen 13 mérési sorral hajtottuk végre, az adatrögzítés manuálisan történt 15 s-os mintavételezési idővel. Az önkéntesek VR-szemüveg segítségével szimulált repülésben vettek részt a kísérlet alatt (ez segítette a barokamrai környezet elfedését és egy folyamatos éberségi szint biztosítását). Fenti protokoll elvi lehetőséget ad az elhúzódó hypoxia és/vagy hypobária (oxigénhiány nélküli nyomáscsökkenés) oki szerepének tisztázására, egymástól függetlenül (4. ábra).

Az adatokat csoportszinten és intraindividuálisan is megvizsgáltuk, repülési fázisonként átlagoltuk, a különböző repülési fázisok között beágyazott egyszempontos varianciaanalízist hajtottunk végre Prism statisztikai szoftver segítségével (egyutas ANOVA $p < 0,05$), kontrollként a repülés előtti 0 m-es értékeket vettük figyelembe, post hoc elemzésként pedig Dunnett-próbát végeztünk az ANOVA-kat követően.



3. ábra
NIRS-elektrodák elhelyezése és abszorpciós spektruma a kritikus eséssel [17]

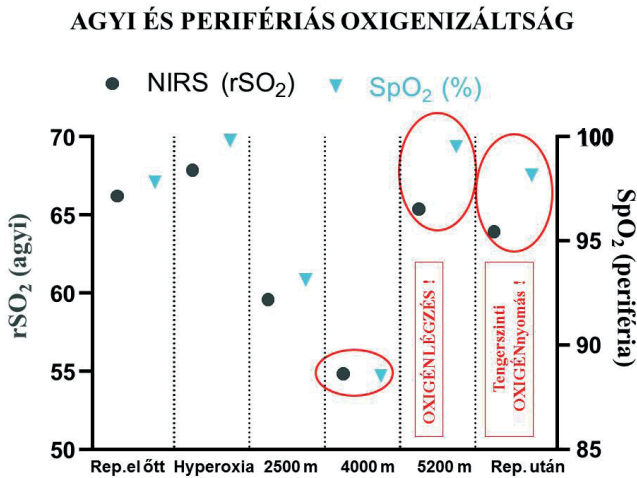
VIZSGÁLATI PROTOKOLL magasság és lézzési rezsim



4. ábra
Vizsgálati protokoll hypoxiás és hypobáriás normoxiás lépcsőkkel [a szerző]

3.2. Eredmények

Csoportszintű elemzés során kimutatható, hogy a NIRS és perifériás oxigenizáció is jól követi a hypoxiás lépcsőket. Ugyanakkor 5200 m-en oxigénlégzés hatására jól látható a perifériás oxigenizáció (SpO_2) esetén a gyors normalizálódás (sötét hyperoxiás értékig emelkedik, majd leszállás után ismét normalizálódott), miközben a cerebrális oxigenizáció (rSO_2) 5200 m-en nem követte a perifériás szaturáció nagymértékű emelkedését, az átlagérték a kontrollérték alatt maradt, sőt leszállás után (az oxigént elvéve) az átlagérték még tovább csökkent. Egyedi eseteket vizsgálva akár 30–40 perces földi megfigyelés után is alacsony oxigenizáció volt kimutatható (5. ábra).



5. ábra

Agyi regionális (NIRS rSO_2) és perifériás (SpO_2) oxigénszint-változás [a szerző]

Az intraindividuális változásokat külön elemezve és összevetve a nagy magasságú (5200 m-en oxigénadagolás mellett mért) és ismételt (leszállás utáni) tengerszintű oxigénszinteket, az esetek több mint felében szignifikáns eltérést észleltünk a repülés előtti kontrollhoz képest. (A jobb és bal oldali NIRS-adatokat külön vizsgáltuk, így összesen 25 mérési sor adata van ábrázolva.) 4000 m-en valódi hypoxiás fázisban minden esetben szignifikáns mértékben csökkent az agyi oxigenizáció, a kiindulási értékekhez képest 30%-os rSO_2 csökkenést is tapasztaltunk (ez az aneszteziológiában már komoly beavatkozást indokolna az altatórvos részéről). 5200 m-en a környezeti nyomáson adagolt oxigén ellenére is körülbelül az alanyok 40%-ánál továbbra is csökkent maradt a cerebrális oxigenizáció. Továbbá földre való visszatérés után is elhúzódóan csökkent agyi oxigénszintet észleltünk az esetek közel felében (6. ábra).

A kilélegzett CO_2 a magassági lépcsőkhöz megfelelően is csökkent, illetve oxigénadagolás mellett az $EtCO_2$ - (végkilégzési szén-dioxid) értékek látványosan csökkentek. Itt a kilégzési gázok oxigénnel való dilúcióját nem lehet kizárni, de a felszállás után meglepő módon elhúzódó hypocapniát ez nem magyarázza (2000 m alatt már nincs oxigénlégzés), amely szinte minden

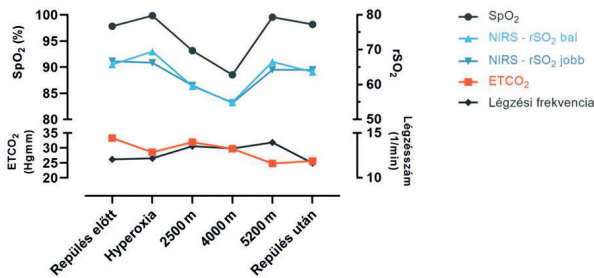
résztevőnél tapasztalható volt (ekkor az átlagos $EtCO_2$ csak 27 Hgmm volt, a legalacsonyabb érték pedig egészen 18 Hgmm-ig csökkent, ezt 13 min-nel a leszállás után mértük) (7. ábra).

A légzésszámot elemezve szintén feltűnő, hogy a klinikailag ismert, hypoxiával járó fuladásos állapotokhoz képest a légzési munka nem fokozódik, nem jár típusos nehézlégzéses panaszokkal, a légzési frekvencia jelzetten emelkedett, de nincs valódi polypnoe (20/perc fölötti légvétel), ami a fokozott szén-dioxid „kimosást” önmagában magyarázhatná (8. ábra).

ÉLETTANI PARAMÉTEREK ALAKULÁSA

(agyi és perifériás oxigén- és szén-dioxid-szintek, légzésszám)

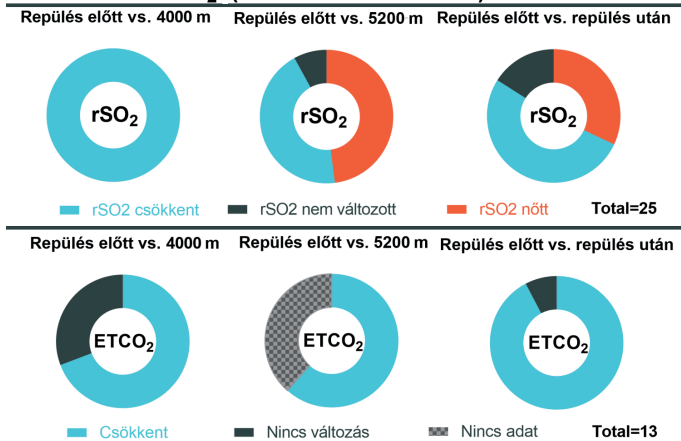
Csoportszintű átlagok összehasonlítása



6. ábra

Élettani paraméterek összesített változása a magasság és oxigénadagolás függvényében [a szerző]

INTRAINDIVIDUÁLIS rSO₂ (AGYI OXIGÉNSZINT) ÉS ETCO₂- (SZÉN-DIOXID-SZINT) VÁLTOZÁS



7. ábra

Agyi oxigénszint (rSO_2) és végkilégzési szén-dioxid-szint ($EtCO_2$) változásának mértéke, egyénenként számított szignifikanciaszint mellett [a szerző]

4. UPE lehetséges hatásmechanizmusa hypobárikus hypoxiában

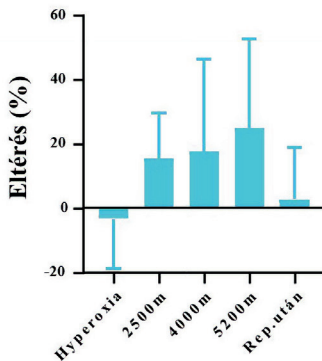
A hypoxia, ahogy az említett repülésbiztonsági események statisztikája mutatja, még ma is a pilóta munkavégző képességét drámai módon rontó vészhelyzet. A magasságfüggő nyomáseséssel leggyakrabban a hypobárikus hypoxia jelentkezik, amely a környezeti belélegzett levegő csökkent oxigénkínálatára vezethető vissza, amely kaszkád jelleggel egészen a sejtekig végigkövethető, romló diffúziós viszonyokat hoz létre.

Eredményeink alapján a tüdő- és az agyi keringésben több támadáspontú, részben adaptív, részben azonban kisiklás jellegű (önmagát rontó) élettani változás lehetőségét vetjük fel, amelyben szerepe van nemcsak a csökkent oxigénkínálatnak, de a magasság (mint hypobária, vagyis alacsony nyomású környezet) okozta fokozott szén-dioxid-kimosásnak, amely a szervezet szintjén a vér pH lúgos irányú eltolódásához és az agy csökkent keringéséhez vezet, amelyet az oxigénadagolás már csak részben korrigál. Technikai oldalról így megkérdőjeleződik a hypobáriás oxigénhiány *csak oxigénlégzéssel* való kivédésének kellő mértékű hatékonysága, szükség lehet a valós repülés során az agyi regionális vérátáramlás és oxigénszint (akár szén-dioxid-szint) valós idejű monitorozására is. Jelentős kognitív munka, szellemi leterheltség mellett a légzés ütemének változása az agyi oxigenizáció további romlását okozhatja kritikus repülési helyzetekben, a kórélettani háttér alapján új technikai megközelítés (holttér változtatásával a szén-dioxid visszalégzése) lehet szükséges a magasság elleni védelemben.

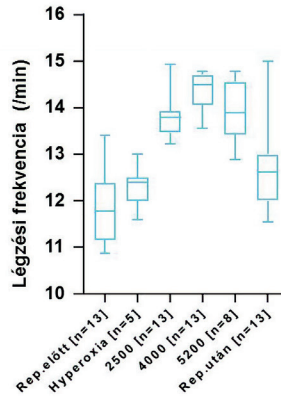
Ugyanakkor vizsgálatunknak sajátos aktualitást ad a Covid-19-vírusfertőzésen átesett pilóták regenerációjának és lehetséges orvosi rehabilitációjának megítélése az esetleges tüdőgyulladás után, a tüdőfunkció és hypoxia tűrőképesség komplex megítélésével barokamrában.

LÉGZÉSI FREKVENCIA VÁLTOZÁSAI

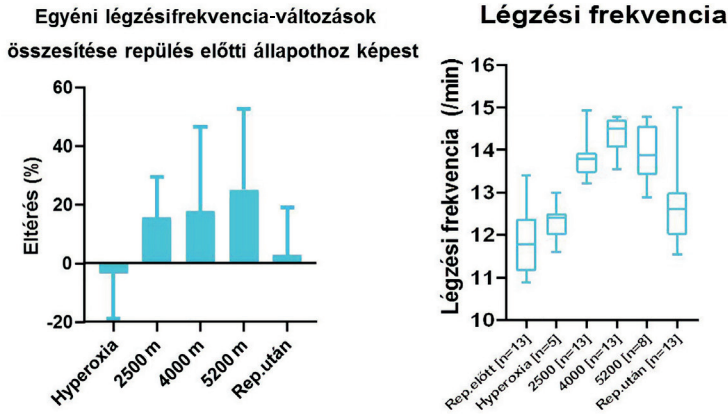
Egyéni légzésfrekvencia-változások
összesítése repülés előtti állapothoz képest



Légzési frekvencia



LÉGZÉSI FREKVENCIA VÁLTOZÁSAI



8. ábra

Légzési frekvencia változása egyéni és csoportszinten számított szignifikanciaszint mellett [a szerző]

5. Covid-19-vírusfertőzés repülőorvosi vonatkozásai

A légi közlekedés szervezeti struktúrájánál, a repülésbiztonsági szempontok szerinti sűrű és kontakt (személyes érintkezést is igénylő) ellenőrzési rendszerénél fogva, valamint a hatalmas utasforgalom és a járványügyi expozíciós lehetőségek miatt is különösen érzékenyen reagált a 2019 decemberében a kínai Vuhanból induló és 2020 márciusában a WHO⁶ által is világgjárványnak (pandémiának) nyilvánított tömeges vírusfertőzésre. Ennek összetevői a következők:

1. A repülőgép maga (mint vektor) biztosította a lappangási fázisban, vagy enyhe tünetekkel rendelkező egyének mint utasok révén a vírus gyors közlekedését és tömeges transzmisszióját a kontinensek között, újabb és újabb gócpontok kialakulásával a fogékony lakosság körében. Míg korábban a WHO csak egyes influenzatörzsek (például H1N1) és a vérzéses lázat okozó vírusok (Lassa, Ebola, Marburg) esetében hirdetett magas fokú készültséget, a koronavírusok családjába tartozó törzsek közül a SARS⁷ és a MERS⁸ után e vírustörzs vált igazán globalizált járvány okozójává, ragályossága (fertőzőképessége, reprodukciós rátája) és az életkorral és alapbetegségekkel növekvő halálozási rátája miatt is. Míg az első hullámban a SARS-CoV2 vírus 2–4 közötti reprodukciós rátát okozott, vagyis 1 személy 2–4 másik személyt fertőzhetett meg általában (de az úgynevezett „szuperterjesztők” zárt térben akár 100 másik személyt is

⁶ WHO: *World Health Organization*, az ENSZ (Egyesült Nemzetek Szervezete) Egészségügyi Világszervezete.

⁷ SARS: *Severe Acute Respiratory Syndrome*: koronavírus törzs által okozott súlyos akut légzési tünetegyüttes, 2003-as járvány során.

⁸ MERS: *Middle-East Respiratory Syndrome*: koronavírus törzs által okozott súlyos akut légzési tünetegyüttes, 2012-es járvány során, főleg a Közép-Keleten.

megbetegíthettek), a vad vuhani törzs után terjedő brit, brazil és indiai (delta) variáns az S tüskefehérje ACE2 receptorhoz kötődésében lényegesen erősebb és valószínűleg súlyosabb lefolyású fertőzést eredményez (ebben az omikron variáns megjelenése hozott változást, még nagyobb fertőzőképességgel [R_0 : 16-18!], de enyhébb klinikai tünetekkel) (2. táblázat).

2. táblázat
Vírusos fertőző betegségek ragályosságának összehasonlítása [18], [19]

SARS-COV-2 koronavírus-fertőzés halálozás és fertőzőképesség (1. hullám)		
Vírustörzs	Halálozási ráta /100 fertőzött	Fertőzési ráta (R_0) immunizáció és járványügyi megelőző intézkedések nélkül
SARS-COV-2 2019	2,18	2,2 (de szuperterjesztők: akár 100 is lehet!)
Szezonális influenza	0,1	1,4
Morbilli/kanyaró	0,1-10 (fejlett országokban) 0,1-0,2 (fejlődő országokban 10!)	
Ebola	50	1,5-2,5
SARS/MERS (előző járványok)	9,6-15	2-5

A vírus evolúciós fejlődése jelenleg is folyik, az újabb és újabb mutációkkal (5. hullám, omikron variáns 2021 novembertől) kialakuló variánsok elősegíthetik a vírus túlélőképességét, fertőző- és szaporodóképességét, a védőoltások ellenére is. A pandémia brit mutáns okozta 3. hullámának tetőpontja közelében az összesített halálozás 2-3% volt, de pont a brit variáns már a fiatalabb korcsoportokban, alapbetegség nélkül is okozhat súlyos, kórházi (azon belül intenzív osztályos) ápolást igénylő lefolyást, akár halált is. Jelenleg is csak a járványügyi szabályok (izoláció/karantén, tömeges tesztelés, távolságtartás, maszkhasználat) szigorú betartásával mérsékelhető a ragályossági index (reprodukciós ráta) 1 alá. Bár a légi közlekedési ipar a szigorú repülésbiztonsági rendszabályok betartásával példát mutat a szabálykövetésben, a földi repülőtéri folyamatok térbeli, időbeli szeparációja, a fedélzeti helykihasználás csökkentése a gazdaságosság és hatékonyság rovására megy. Az első hullám idején felére-harmadára csökkenő, főleg a személyszállítást sújtó korlátozások, lezárások és karanténintézkedések miatt pilóták és a földi karbantartó-állomány tízezrei kerültek földi beosztásba, vagy váltak munkanélkülivé.

A SARS-CoV-2 vagy Covid-vírus körülbelül 100 nm-es, egyszálú RNS genetikai állományt tartalmazó részecske, amely a repülőgép fedélzetén is direkt légúti csepp-/aeroszolfertőzés útján terjedhet. Bár ezt a HEPA⁹-szűrőkkel felszerelt fedélzeti légkondicionáló rendszer nagy hatékonysággal kiszűri, a közvetlen (néhány ülésnyi távolságra történő) fertőzést nem előzi meg. Erre vonatkozóan a korábbi, 2003-as SARS-járvány során igazoltak utólag több utasra kiterjedő, direkt repülőfedélzeti fertőzést [20]. A többórás repülőút és a kabinmagasságnak megfelelő mérsékelt hypoxia hozzáadódása kritikusan súlyosbíthatja a korábban egyensúlyban lévő beteg állapotát, repülőút alatti hirtelen halálestet is előfordult Covid-pozitív utasnál [21]. A vírus maga az S (*spike*) tüskefehérje révén a légúti csillósőrös hengerhámra, illetve

⁹ HEPA: *high efficiency particle air*, mikron méretű részecskék kiszűrésére is alkalmas hatékony légszűrő, repülőfedélzetén óránként többször átszűri a teljes kabinlevegő-mennyiséget.

(progresszió esetén a tüdő léghólyagocskákat bélelő speciális hámsejtek) lehorgonyzott ACE2¹⁰ receptorára kötődik nagy affinitással, és az alveoláris sejtekbe bejutva gyors ütemben gyulladást, vizenyőt okoz, amely a lebenyhatárokat nem tisztelve szétterjed a tüdőben, általános légzési nehezítettséget (distresszt), majd légzési elégtelenséget okozva [22]. Ennek jele lehet a képalkotó vizsgálat (mellkasröntgen vagy CT) során a tejüvegszerű homály, amelyhez a klinikai tünetek széles spektruma társul életkortól, genetikai fogékonyságtól, az immunrendszer állapotától és az esetleges társbetegségek jelenlététől függően.

A klinikumban (a járványhullámtól, életkortól és a variánstól függően) más-más tünetek dominálhatnak, de a fejfájás, a gyengeség, láz, a fokozódó légszomj és fulladás, fejfájás, szív- és veseműködés zavara mind amellettt szól, hogy a vírus nemcsak a tüdőben, hanem több más szervrendszer ereiben jelen van, helyi gyulladást (akár önmagát ördögi körben tovább rontó heves immunválaszt, „citokin vihart”), endothel (érbelhártya) funkciózavart és vérrögződést (thromboembóliát) vált ki. Ezek a szervi tünetek a hatodik-nyolcadik napon (delta variáns esetében már harmadik-ötödik napon!) előre kiszámíthatatlanul súlyosbodnak, órák alatt kritikusán alacsony oxigénellátáshoz vezetnek a szervezetben, tengerszinti nyomáson is 90% alatti verőeres oxigéntelítettséggel (amit egyébként csak 3000–4000 m-es magasságon tapasztalnánk egészséges alanyokon). A folyamat gyors, dinamikus funkcióvesztéssel jár a tüdőben vizenyő kialakulásával, vérrögződéssel, az átlélegzett tüdőterületek jelentős csökkenésével, amit a tényleges fulladás csak viszonylag későn jelez („boldog hypoxia”), illetve a tüdő CT mint képalkotó eljárás a tünetekhez képest sokkal drámaibb, kiterjedtebb gyulladást ír le. Ehhez járul még a vírus direkt jelenlétével a szívizom és a szívkoszorúerek, szívburok gyulladása ritmuszavarral, akut infarktussal, akár balkamra pumpafunkció elégtelenségével, amelyek keringési oldalról tovább súlyosbítják az elégtelen szervi vér- és oxigénellátást. Ezért szükséges a terápiás lépések (lehetséges gyógyszerelés és lélegeztetési eljárások) időbeli alkalmazása [23], [24].

A vírusfertőzés gyakran közvetlenül érintette és érinti az egyébként egészséges (rendszeres éves vagy féléves alkalmassági vizsgálatra kötelezett) és egészséges életmód iránt motivált katonai és polgári légi közlekedési szakszemélyzet tagjait is, gyakran ugyanolyan megmagyarázhatatlan és egyéni egészségi (például szív-, érrendszeri) kockázatból nem következő súlyos lefolyású betegséggel és elhúzódó gyógyulással, mint az idősebb, magasabb kockázatú korcsoportokban. Nem egyedi ilyen szempontból annak a 43 éves skót pilótának, Stephen Cameronnak az esete, aki hosszú távú interkontinentális repülése után már betegen úgy érkezett Vietnámba, hogy a reptérről hordágyon vitték a sürgősségi osztályra, a tüdőszövődmények miatt légzőfelülete 90%-át elvesztette, és csak a hosszú (két hónapos) intenzív terápia mentette meg a tüdőtranszplantációtól [25].

Az egészségügyi rendszer túlterhelése már az első hullámban a fejlett nyugat-európai országokban is bekövetkezett, így a súlyos állapotú betegek megmentéséhez már a betegek átcsoportosítására, vonaton vagy légi úton való elszállítására (egészségügyi kiürítésére) is szükség volt. A repülőfedélzeti, intenzív ellátást igénylő esetekben a MEDEVAC-feladatra teljes monitorozást, invazív beavatkozást lehetővé tévő kapszulaizoláció és az egészségügyi szakszemélyzet védelme (*barrier nursing*, fertőzésgátló ápolás) mellett kerülhetett sor.

¹⁰ ACE2: angiotenzin-konvertáz enzim 2 mint receptor (az angiotenzin 2 mint erős vérnyomásemelő polypeptid deaktiválásában játszik kulcsszerepet).

Az elhúzódó gyógyulás (posztcovid szövődmények, elsősorban a tüdőfibrozis vagy gyulladás okozta hegesedés és légzőfelszín-csökkenés, illetve kisérnyulladás több szervrendszerben) és a csökkent aerob terhelhetőség (akár nyugalmi fulladásos panaszok), a mentális szövődmények (depresszió és kognitív szellemi teljesítményromlás) sok beteg számára elhúzódóan alacsony fizikai aerob terhelhetőséget és csökkent munkavégző képességet jelent [26].

Vagyis az úgynevezett Wassermann-ciklusokkal jellemezhetően (a légzés–keringés–sejtanyagcsere „fogaskerekeinek” összeillesztésével) a csökkent oxigénfelvétel, károsodott szívműködés és romló szervi keringés (a vírus direkt toxikus hatásával együtt) a belső szervek, így az agy csökkent teljesítményéhez is vezethet sejt szinten [27, p. 126].

A repülés világában ez különösen így van, akár tartósan megkérdőjelezhetik a légi személyzet hosszú távú repülési alkalmasságát, illetve indokolttá teszik a repülő egészségügyi alkalmasság soron kívüli újbóli elbírálását. Mivel a tüdőhegesedés és légzőfelszín-csökkenés miatt a szervezetszintű hypoxia áll előtérben, az aerob terhelhetőség és a magassági oxigénhiány-tűrőképesség megfelelő regenerációs ütemének megítélése alapvető. Ez különösen a G-tűrőképesség szempontjából jelenthet problémát: a műrepüléssel vagy légi harccal járó túlterhelések jelentős regionális kompressziót okozhatnak a tüdőszövetben (főleg az alsó harmadban), amelyben atelectasia alakulhat ki, a tüdő léghólyagocskák összenyomódása és a levegő felszívódása miatt. Ezek a tüdőterületek csak jelentős légzési munka (akaratlagos túllihegés vagy köhögési roham) árán vonhatók be ismét a normális légzési gázcserébe [5]. Ugyanakkor a rekeszi alsó egyharmad tüdőkapacitás (mint az intenzíven fekvő súlyos Covid-betegek forgatásos technikája alapján is kiderült) alapvető a maradék légzőfelszín hasznosításában.

A katonai repülésben a NATO Repülőorvosi Munkacsoportja¹¹ online megtartott ülésén 2020 és 2021 novemberében áttekintette a Szövetség haderői által alkalmazott klinikai irányelveket, lezajlott Covid-fertőzés után, a repülés újbóli engedélyezésére vonatkozóan. A legtöbb tagállam (például Kanadai Légierő) saját hatáskörben mérsékelt terheléssel, közepes pulzusszámig, például 6 perces gyaloglási teszt (6MWT)¹² során méri fel a fizikai teljesítőképességet, rögzíti a perifériás (ujjbegyen mért) oxigéntelítettséget (szaturációt), ennek 3 százalékpontot meghaladó esése ugyanis körjelző lehet a még beszűkült tüdőfunkcióra. Teljes VO_{2max} (maximális légzési és keringési kapacitásig fokozódó) aerob terhelést csak a francia Repülőorvosi Intézet vezetője (Manen professzor, Párizs, Percy AeMC¹³) vetett föl, de erre vonatkozó eredmények még nem ismertek. Ugyanakkor nemzetközi és hazai klinikai iránymutatások (országos intézetek, sportorvosi szakmai kollégium részéről) az azonnali, teljes erőfeszítéssel járó fizikai aktivitás visszaállítását nem javasolják [28], [29].

Jelenleg minden légierő, illetve a polgári légi közlekedés a panaszmentesség mellett a légzési funkció megfelelő regenerációjára és ennek egyszerű eszközökkel való igazolására helyezi a hangsúlyt. Alapvetően közös megközelítés, hogy a lezajlott Covid-fertőzés súlyossági besorolásának megfelelően kell igénybe venni a diagnosztikus eszközöket a tüdő (esetleg szív, máj, vese és vérerek) érintettségének igazolására, beleértve a labor- (vérsüllyedés, C-reaktív protein, Troponin-T, mint szívizom strukturális elem bomlására utaló marker, esetleg a légzési gázdifúziós kapacitást jellemző DLCO¹⁴ meghatározást), képpalkotó eljárásokat (mellkasröntgen

¹¹ AMDWG: *Aeromedical Working Group*.

¹² 6MWT: *6 minutes walking test*, 6 perc alatt gyaloglással megtett távolság, 500 m fölötti elvárt értékkel, minimális-mérsékelt szubjektív panaszokkal, Borg-skála szerint a megerőltetési szintet pontozva.

¹³ AeMC: *Aeromedical Center*, Polgári Repülőorvosi Központ.

¹⁴ DLCO: *Diffusion Capacity of CO*: szén-monoxid diffúziós kapacitásának mérésén alapuló légzésfunkciós vizsgálat.

vagy CT, szívultrahang), vese- és májfunkciós paramétereket, amelyekhez lehet csatolni egy aerob terhelhetőséget felmérő műszeres vizsgálatot. A Kanadai Légierő iránymutatása szerint csak a tünetek teljes megszűnése után, 4 hét múlva lehetséges a pilóta újraminósítása, a fizikai terhelhetőség visszaállítása (és ennek objektívizálása) után (3. táblázat) [30].

Saját, Covid-fertőzésen átesett és gyógyult légi közlekedési szakszemélyzeti tagoknál barokamrában 5500 m-es 15 perces standard hypoxiavizsgálat során szintén észleltük még a periférián (ujjbegyen mérve) is a súlyosabb mértékű, de még tolerálható oxigénhiányt, annak ellenére, hogy az érintett egyének közül mindenki könnyű esetnek minősült, vagyis kórházi sürgősségi felvételt, esetleg intenzíven oxigénlégzést vagy gépi lélegeztetést nem igényelt, és a vizsgálatra a MH által előírt egy hónapos regenerációs periódus után, soronkívüli ROB repülőalkalmassági vizsgálat keretében került sor. Tapasztalatunk szerint a vizsgálati alanyok sokszor csak maximális légzési munka mellett tudták fenntartani az elfogadható oxigénszintet a periférián is (mivel senki sem szorult kórházi kezelésre, lélegeztetésre, illetve a tüdőlégző-felszín-kiesés reverzibilis volt, vagyis gyógyulás után helyreállt). Így mindenki el tudta kerülni a kritikus 65%-os oxigéntelítettséget, amely a vizsgálat azonnali megszakítását indokolta volna.

3. táblázat
Covid-19-vírusfertőzés súlyossági beosztása [30]

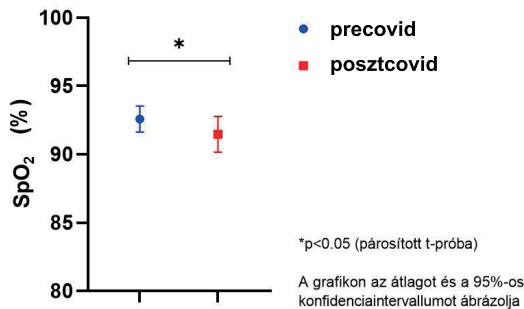
Súlyosság	Klinikai légúti és légzési tünetek	Szív- és keringési tünetek	Képzővizsgálat értékelése / kezelési alapelvek
enyhe	NINCS vagy csak kifejezett terhelésre	NINCS	Mellkasröntgen normális Önkéntes izoláció otthon
mérsékelt	Minimális terhelésre vagy mindennapi fizikai aktivitás mellett	Pihenésre szűnő mellkasi fájdalom, szapora szívdobogás / ritmuszavar, ájulásérzés (pre-syncope)	Mellkasröntgen vagy CT pozitív (de nincs „tejüveg homály” vagy üregképződési jel) Sürgősségi osztályon ellátás lehetséges, kiegészítő oxigén-terápia (FiO2 meghatározásával), vagy gyógyszeres kezelés pneumonia miatt
súlyos	Nyugalomban is jelentkeznek	Állandó vagy romló mellkasi fájdalom, syncope eszméletvesztés	Kórházi felvétel Mellkasröntgenen vagy CT-n súlyos elváltozások

Ugyanakkor a nagyfokú perifériás ingadozás az oxigéntelítettségben (előző eredményeinkből következően) maga után vonja a még sérülékenyebb agyi oxigénellátás oszcillációját, hiszen az még inkább ki van téve az érbelhártya- (endothel) funkciózavar okozta ingadozásának, alacsonyabb perifériás oxigéntelítettség mellett. Ennek további vizsgálata, az agyi oxigenizációra gyakorolt direkt hatásának elemzése folyamatban van, jelentőségét a szakirodalmi adatok is aláhúzzák, az agyban bekövetkező érbelhártya-funkció változását például az agyvérzés (stroke) kialakulásában alapvetőnek tartják a koronavírus-fertőzés szövődményeként [31] (9. ábra).

Míg a katonai légierők szigorú izolációs („buborék”) és tesztelési rendszerben, a váltások elkülönítésével megőrizték harcképességüket, addig az elhúzódozó lezárások, mozgási korlátozottság az egész polgári légi közlekedést, repülőipart súlyosan érintették. A nemzeti

és nemzetközi légügyi hatóságok (például EASA)¹⁵ a szükséges elméleti-gyakorlati kiképzések terén online oktatást vezettek be, meghosszabbították az egyes szakszolgálati típusengedélyek érvényességi idejét, sőt az egészségügyi alkalmasságot is kiterjesztették, amennyiben csak szemüveg miatti korlátozás állt fenn, vagy nem volt egyéb műveleti (például „csak biztonsági vagy másodpilótával repülhet”) és időbeli korlátozásra vonatkozó bejegyzés. A járványhelyzet remélhetőleg közeljövőbeli javulása után, a légi közlekedés újraindításával sajnos nem zárható ki, hogy a repülési tapasztalat csökkenése (vészhelyzetben az elveszett begyakorlottság, a gyors reakciókészség hiánya) a repülésbiztonsági kockázatok átmeneti emelkedését okozza. Ehhez járul még a vírusfertőzés okozta központi idegrendszeri gyulladós folyamatok direkt hatásaként és a tartós/átmeneti munkanélküliség (földi létlenség és motivációvesztés) indirekt hatásaként kialakuló depresszió, csökkent koncentrációképesség (agyi ködös állapot) kockázata [32].

Pre/postcovid SpO₂ mérések 5500 m-nek megfelelő hypoxiás állapotban



9. ábra

Perifériás oxigénszint barokamrában Covid-19-vírusfertőzés előtt és után [a szerző]

6. Összefoglalás

A napjaink katonai vadászgépein több alkalommal bekövetkező hypoxiás halálesetek mint UPE-k retrospektív elemzése és a magasságélettani kutatások legfrissebb eredménye a hypoxia megelőzésének és kezelésének revízióját indokolja. A Magyar Honvédség Egészségügyi Központ Kecskeméti Repülőorvosi, Alkalmasságvizsgáló és Gyógyító Intézet barokamrájában végrehajtott VR-szimulált repülések során NIRS-technikával végrehajtott transzcranális agyi oxigénszintmérések során azt találtuk, hogy hypobáriás hypoxiában kellő mértékű parciális nyomáson használt oxigénlelegeztetéssel sem lehet feltétlenül biztosítani a hypobáriás expozíció előtti, a tengerszinti levegő belégzésével elért normális agyi oxigénszintet. A megváltozott pH,

¹⁵ EASA: *European Aviation Safety Agency*, az Európai Unió Repülésbiztonsági Szervezete, hatósági és törvényszintű (*Regulation*) jogszabályalkotási jogkörrel.

sav-bázis egyensúly miatt az agyi oxigenizáció még akár a földre visszatérés után 10–20 perccel sem tér vissza a behatás előtti szintjére, (miközben az ujjbegyen mért szaturáció már teljes, 100%-os értéket mutat).

Az agyi oxigéndeficit komoly idegrendszeri funkcionális kiesést jelenthet, ami a hypoxia másnaposság („poszthatás”) részjelensége lehet. Emiatt szükség van a repülésbiztonsági kockázatot jelentő hypoxia-tűrőképesség minősítésére barokamrában, sőt távlati célként a NIRS-EKG-HRV (agyivéráramlás- és szívfrekvencia-variabilitás) mint szenzoros monitorizálás és kiértékelési képesség fedélzeti (reális repülés alatti) alkalmazása (orvosi fekete doboz) is felmerül a harcképesség nyomon követésére.

Az aktuális világjárványra legérzékenyebben a repülés, a repülőipar és a légi közlekedés reagált, a katonai és a polgári repülésben súlyos és közvetlen fertőzési lehetőséget, a betegség direkt transzmisszióját és a repülésélettani kockázatokkal, mindenekelőtt a magassági oxigénhiánnyal való direkt kombinációja révén a klinikai tünetek gyors progresszióját okozva. Sőt a már gyógyultnak minősített esetek jelentős részében (egyes felmérések szerint akár 30%-ában) a ködös agy és a fulladás és fáradékonyság tünetei a „posztocovid” tünetegyüttesben akár hónapokig fennállhatnak, fokozhatják a magassági hypoxia önmagában is veszélyes hatását, csökkentve a pilóta munkavégző képességét, fizikai és mentális teljesítőképességét.

Köszönetnyilvánítás

Köszönetünket fejezzük ki Fischer Gábor főmérnök úrnak (Anamed Kft.) a Mindray orvosbiológiai őrzőpult barokamrai telepítéséért és a NIRS-, kapnograph és EEG-modul alkalmazási lehetőségéért.

Felhasznált irodalom

- [1] Szabó S. A., Tótká Zs., Dunai P., Domján K., Vada G., Az oxigéndeficit repülésbiztonsági jelentősége és lehetséges magyarázata agyi pulzoximetria NIRS eredményei alapján, szimulált repülési stresszhelyzetben. in *Repüléstudományi tanulmányok. Repüléstudományi Szemelvények 2020*. Szilvássy L., Békési B. szerk., Budapest, Ludovika Egyetemi Kiadó, 2021, pp. 11–42. Online: https://tudasportal.uni-nke.hu/xmlui/bitstream/handle/20.500.12944/17761/01_Szabo_Totka_Domjan_Dunai_Vada.pdf?sequence=1
- [2] A. R. Jr. Artino, R. V. Folga, B. D. Swan, „Mask-On Hypoxia Training for Tactical Jet Aviators,” *Aviation, Space, and Environmental Medicine*, Vol. 77. No. 8. pp. 857–863. 2006.
- [3] „F-35A Pilots Have Experienced Five Physiological Events Since June,” *Air Force Magazine*, 2017. október 25. Online: www.airforcemag.com/daily-report/October%2025%202017
- [4] T. Rogoway, Now That The F-35a Is Also Having Oxygen Issues a Solution is More Likely. *The Drive*, 2017. június 13. Online: www.thedrive.com/the-war-zone/11468/now-that-the-usafs-f-35a-has-oxygen-issues-too-a-solution-is-more-likely
- [5] J. J. Elliott, D. R. Schmitt, „Unexplained Physiological Episodes: A Pilot’s Perspective,” *Air & Space Power Journal*, Vol. 33. No. 3. pp. 15–32. 2019. Online: <https://apps.dtic.mil/sti/pdfs/AD1081774.pdf>

- [6] Magyar Honvédség Repülésbiztonsági konferencia, MH 59. Szentgyörgyi Dezső Repülőbázis 2008.
- [7] MH 59. SzDRB 880-7-2021. sz. 2021. február 26.
- [8] Amerikai Képviselőház (US House of Representatives), Légierő vezetőjének (Department USAF) meghallgatása a Harckészültségi Albizottság (Subcommittee on Readiness), Fegyveres Erők Bizottság (Committee on Armed Forces) ülésén, in Rödíg, E.,: Unexplained Physiological Episodes (UPEs) – Phenomenon or an Inflight Hazard? 7th User Meeting of AMST, előadás Debrecen, 2019. szeptember 14.
- [9] R. Mayes, USAF & NATO STO HFM (Tudományos és Technológiai Szervezet, Humán Faktor és Medicina Panel) Summit, March 2017.
- [10] GINOP 2.3.2-15-2016-00007 „A légiközlekedés-biztonsághoz kapcsolódó interdiszciplináris tudományos potenciál növelése és integrálása a nemzetközi kutatás-fejlesztési hálózatba a Nemzeti Közszolgálati Egyetemen–VOLARE” című projekt az Európai Unió támogatásával, az Európai Regionális Fejlesztési Alap társfinanszírozásával valósult meg.
- [11] Domján K., Vada G., „Katonai pilóták élettani paramétereinek monitorozása szimulált repülési körülmények között,” *Haditechnika*, 54. évf. 3. sz. pp. 2–7. 2020. Online: <https://doi.org/10.23713/HT.54.3.01>
- [12] Szabó S. A., „Orvosbiológiai monitorizálás jelene és jövője a katonai repülésben (különös tekintettel a stressz okozta szívfrekvencia variabilitás és agyi vérátáramlás variancia jellemzésére),” *Repüléstudományi Közlemények*, 30. évf. 2. sz. pp. 145–162. 2018. Online: <https://folyoirat.ludovika.hu/index.php/reptudkoz/article/view/4360/3559>
- [13] J. B. Phillips, D. S. Horning, R. E. Dory, *A Comparison of Pulse-Oximetry, Near-Infrared Spectroscopy (NIRS), and Gas Sensors for In-Cockpit Hypoxia Detection*. Technical Memorandum Report Number 12–60. Naval Medical Research Unit – Dayton, 2012. Online: <https://apps.dtic.mil/sti/citations/ADA571028>
- [14] A. Moerman, S. D. Hert, „Recent Advances in Cerebral Oximetry. Assessment of Cerebral Autoregulation with Near-Infrared Spectroscopy: Myth or Reality?” *F1000Research*, Vol. 6. p. 1615. 2017. Online: <https://doi.org/10.12688/f1000research.11351.1>
- [15] J. Steppan, C.W. Hogue, „Cerebral and Tissue Oximetry,” *Best Practice & Research Clinical Anaesthesiology*, Vol. 28. No. 4. pp. 429–439. 2014. Online: <https://doi.org/10.1016/j.bpa.2014.09.002>
- [16] Xu Cui, S. Bray, D. M. Bryant, G. H. Glover, A. L. Reiss, „A Quantitative Comparison Of NIRS And fMRI Across Multiple Cognitive Tasks,” *NeuroImage*, Vol. 54. No. 4. pp. 2808–2821. 2011. Online: <https://doi.org/10.1016/j.neuroimage.2010.10.069>
- [17] University of Iowa Health Care, *Pulse Oximetry Basic Principles and Interpretation*. Online: <https://medicine.uiowa.edu/iowaprotocols/pulse-oximetry-basic-principles-and-interpretation>
- [18] Hornyik Zs., „A koronavírus-járvány kezelésének hazai tapasztalatai az infektológus szemével nézve. Interjú dr. Szlávik Jánossal, a Dél-pesti Centrumkórház infektológiai osztályának vezetőjével,” *Belügyi Szemle*, (é. n.). Online: <https://belugyiszemle.hu/hu/node/532>
- [19] L. Wang, C. A. Alexander, „COVID-19 Compared with Other Viral Diseases: Novelities, Progress, and Challenges,” *Electronic Journal of General Medicine*, Vol. 18. No. 1. pp. 1–12. 2021. Online: <https://doi.org/10.29333/ejgm/8575>

- [20] A. Mangili, M. A. Gendreau, „Transmission of Infectious Diseases during Commercial Air Travel,” *The Lancet*, Vol. 365. No. 9463. pp. 989–996. Online: [https://doi.org/10.1016/S0140-6736\(05\)71089-8](https://doi.org/10.1016/S0140-6736(05)71089-8)
- [21] M. Alonso, K. Murray, H. Silverman, „United Passenger Died of Covid–19 and Acute Respiratory Failure, Coroner Says,” *CNN*, 2020. december 22. Online: <https://edition.cnn.com/2020/12/19/us/united-passenger-died-covid-symptoms/index.html>
- [22] Nagy V., „A renin–angiotenzin–aldoszteron rendszer gátlása súlyos akut légúti tünetegyüttest okozó koronavírus 2 (SARS-COV-2) járvány idején,” *Cardiologia Hungarica*, 50. évf. 2. sz. pp. 93–99. 2020. Online: <https://doi.org/10.26430/CHUNGARICA.2020.50.2.93>
- [23] S. Dhont, E. Derom, E. Van Braeckel, P. Depuydt, B. N. Lambrecht, „The Pathophysiology of 'Happy'hypoxemia in COVID-19,” *Respiratory Research*, Vol. 21. No. 1. pp. 1–9. 2020. Online: <https://doi.org/10.1186/s12931-020-01462-5>
- [24] R. T. Gandhi, J. B. Lynch, C. Del Rio, „Mild or Moderate Covid–19,” *The New England Journal of Medicine*, Vol. 383. No. 18. pp. 1757–1766. 2020. Online: <https://doi.org/10.1056/NEJMcp2009249>
- [25] O. Barnes, „Coronavirus: Vietnam Coma Pilot Warns People 'Not To Be Blasé,’” *BBC News*, 2020. július 27. Online: www.bbc.com/news/uk-scotland-53544345
- [26] A. Nalbandian, K. Sehgal, A. Gupta et al., „Post-Acute COVID-19 Syndrome,” *Nature Medicine*, Vol. 27. No. 4. pp. 601–615. 2021. Online: <https://doi.org/10.1038/s41591-021-01283-z>
- [27] Balogh L. (szerk.), *Bevezetés a sportdiagnosztikába*. Debrecen, Campus, 2015. Online: https://sportsci.unideb.hu/sites/default/files/upload_documents/bevezetes-a-sport-diagnosztikaba.pdf
- [28] Bogos K., Temesi G., Kerpel-Fronius A. et al., *A Covid–19 vírushelyzeten átesett – és visszamaradó károsodásokat szenvedő – Poszt-Covid szindrómás betegek gondozási protokollja*. (EMMI és országos szakintézetek útmutatója) 2021. Online: <https://tudogyogyasz.hu/Media/Download/30445>
- [29] National Institute for Health and Care Excellence (UK), *COVID-19 Rapid Guideline: Managing the Long-Term Effects of COVID-19*. London, 2020. Online: <https://pubmed.ncbi.nlm.nih.gov/33555768/>
- [30] NATO Repülőorvosi Munkacsoport Fórum (publikus): Kanadai Légierő klinikai útmutatója post-Covid-betegek minősítésére (nso.nato.int védett honlap)
- [31] M. Sashindranath, H. H. Nandurkar, „Endothelial Dysfunction in the Brain Setting the Stage for Stroke and Other Cerebrovascular Complications of COVID-19,” *Stroke*, Vol. 52. No. 5. pp. 1895–1904. 2021. Online: <https://doi.org/10.1161/STROKEAHA.120.032711>
- [32] D. Yetman, „What to Know about Covid–19 and Brain Fog?” *Healthline*, 2021. március 17. Online: www.healthline.com/health/covid-brain-fog#causes
- [33] Rödög, E.: Unexplained Physiological Episodes (UPEs) – Phenomenon or an Inflight Hazard? 7th User Meeting of AMST, előadás Debrecen, 2019. szeptember 14.

Altitude Dependent Oxygen Deficit and Covid–19 Pandemic

In military flight even nowadays, one of the most important aeromedical hazards leading to sudden incapacitation is the threat of hypobaric hypoxia. Based on the data of flight safety statistics and disaster investigations there is a reasonable suspicion in increased rate that recently developed OBOGS (on-board oxygen generating system) cannot provide full oxygen supply, or the cerebral circulation cannot maintain proper oxygen utilization for every moment. There is a certain risk for pilot as an operator to lose physical-mental performance momentarily. Based on our experiments in bar chamber during VR (Virtual Reality) flight mission we concluded that in brain cells a long lasting oxygen utilization problem can commence due to the controversial compensation mechanisms and unpredictable stress response of heart-brain axis. The analysis of hypoxic incidents and fatal events (as UPEs, unexplained physiological events) on-board of most advanced fighter aircrafts is especially important after infection in Covid–19 pandemic, provoking even further aggravated pathophysiological abnormalities in virus pneumonia and ARDS (Adult Respiratory Distress Syndrome), even after recovery from acute phase.

Keywords: *hypobaric hypoxaemia, VR (Virtual Reality) flight profile in bar chamber, cerebral pulsoxymetry NIRS (near infrared spectroscopy), UPE (unexplained physiological events), Covid–19 pandemic and Adult Respiratory Distress Syndrome, post Covid symptoms*

<p>Nagy-Bozsok József Semmelweis Egyetem, 5. évf. orvostanhallgató Szegedi Tudományegyetem Általános Orvostudományi Kar Repülő és Űrorvosi Tanszék, TDK-hallgató</p> <p>jozsef.nagybozsoky@gmail.com orcid.org/0000-0003-3130-451X</p>	<p>József Nagy-Bozsok Semmelweis University 5th year medical student TDK (Students' Scientific Research Program) fellowship at University of Szeged Faculty of Medicine Department of Aviation and Space Medicine, jozsef.nagybozsoky@gmail.com orcid.org/0000-0003-3130-451X</p>
<p>Dr. habil. Szabó Sándor András PhD Nemzeti Közszolgálati Egyetem Hadtudományi és Honvédtisztképző Kar, egyetemi magántanár Katonai Műszaki Doktori Iskola oktatója Szegedi Tudományegyetem Általános Orvostudományi Kar Repülő és Űrorvosi Tanszék tanszékvezető docens</p> <p>sasi19620@gmail.com orcid.org/0000-0002-1362-4723</p>	<p>Sándor András Szabó, PhD. habil. University of Public Service Faculty of Military Science and Officer Training, Professor Lecturer of Doctoral School of Military Engineering University of Szeged Faculty of Medicine Department of Aviation and Space Medicine, assigned Associate Professor sasi19620@gmail.com orcid.org/0000-0002-1362-4723</p>

<p>Dr. Tótká Zsolt Magyar Honvédség Egészségügyi Központ Kecskeméti Repülőorvosi, Alkalmasságvizsgáló és Gyógyító Intézet Magasság-élettani Osztály, osztályvezető főorvos</p> <p>tolzs@gmail.com orcid.org/0000-0002-4326-3287</p>	<p>Zsolt Tótká, MD, MC Military Medical Center of Hungarian Defence Forces, Aeromedical, Medical Screening and Healthcare Institute, Kecskemét Head of High Altitude Physiology Department</p> <p>tolzs@gmail.com orcid.org/0000-0002-4326-3287</p>
------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------	--------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------
