

Szabó Sándor András

Stressz és a repülés

(szívfrekvencia-paraméterek jellemzése szimulált és valós repülési stresszhelyzetben)

A repülés veszélyes üzem: repülési vész helyzetben, az élettani fenyegetettség (oxigénhiány, gyorsulás-túlterhelés) jelentkezésekor vagy időkénszerben a pilóta, mint operátor pillanatnyi fizikai-szellemi teljesítménye elégtelenné válhat, amelyet a vegetatív idegrendszer egyensúlyvesztése, stresszállapot kísér. A fokozott stressz és alkalmanként a stresszreakció okozta korlátozott szenzoros érzékelés, téves helyzetértékelés hibás fizikai válaszreakciót eredményez, ami önmagában újra stresszt, akár pillanatnyi cselekvőképtelenséget okoz, pszichés alapon. Célunk az élettani stresszreakció vizsgálata részben földi körülmények között, élettani stresszor (például barokamrában előidézett hypobariás hypoxia) és VR (virtual reality) vizuális szimulációs berendezések kombinációjával, részben valós repülési körülmények között. A szív-agy tengely stresszreakcióját a szívfrekvencia-variabilitás (HRV) vagy pulzusvariancia-mérésekkel követtük, a mérőműszer (Firstbeat Bodyguard) által biztosított adaptációval valós repülési körülmények, vadászpilóta-műrepülés és ejtőernyős ugrás során is.

Kulcsszavak: repülésélettani stresszorok, hypoxia és gyorsulás-túlterhelés okozta HRV, pulzusvariancia, VR (virtual reality) repülés, Firstbeat Bodyguard2

Bevezetés

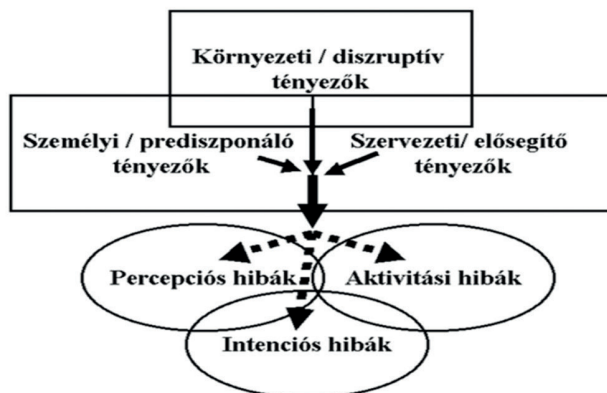
A repülésbiztonság és a humán tényező

A repülés, mint háromdimenziós dinamikus helyzetváltoztatási képesség – még ha technikai eszközökkel, repülőeszközökkel, fokozódó automáciával valósul is meg –, olyan élettani és pszichés kihívásokat jelent az emberi fizikai cselekvőképesség és szellemi munkavégző-képesség számára, amely részben dinamikájában, részben intenzitásában messze meghaladja az emberi evolúció során kifejlesztett és szelekciós előnyként faji szinten megjelenő szív-, érrendszeri és agyi keringési reflexek adaptív reakciókészségét. Miközben az új kabinergonómiai megoldások, a technikai-technológiai rendszerek megfelelő redundanciája és többszörös biztosítása (a mesterséges intelligencia kialakítása révén akár önfejlesztő módon) minimalizálja a pillanatnyi technikai elégtelenség okozta fenyegetettséget, a humán faktor fentiekből adódó kiszámíthatatlan instabilitása őt teszi a repülésbiztonság leggyengébb láncszemévé.

Vagyis az „ember–gép–környezet” dinamikus rendszerében a humán tényező az, amely a modern harci technika irányításában, kezelésében, és a katonai feladat végrehajtásában leginkább korlátozó tényező lehet.

A mai 4–5. generációs harci gépek esetében a technika megbízhatósága gyors ütemben növekedett (precíziós avionika, modern kompozit anyagok, biztonsági és tartalék repülőműszaki, navigációs-elektronikai és hajtóműrendszerek), ugyanakkor a repülés alanya, a pilóta alapvetően ugyanazokkal a szubjektív teljesítménykorlátokkal repül, redundanciája nem változott. Ahogy a HFACS¹-rendszer kidolgozói megfogalmazták: „Az ember természeténél fogva hajlamos a hibára; észszerűtlen hibamentes teljesítményt várni tőle” [1].

A baleset soha nem a pillanat műve, több tényező, történés együttes és fatális egymásutánisága hozza létre a kritikus helyzetet, vagyis dinamikus folyamat. Ezt a Reason-féle „sajtmodell” lineárisan vizualizálja: mint a sajtseleteken a lyukaknak egy egyenesbe kell esni ahhoz, hogy átlássunk rajtuk, úgy az önmagukban ártatlan kis eltérések is felfűzhetők egy eseményláncre, amely a balesethez vezet [2]. Ezzel szemben az amerikai HFACS-modell hierarchikusan, a szervezeti, egyéni prekondicionális és végrehajtói tevékenységi szinteket egymás alá rendezve mutatja meg, a brit modell pedig térképszerűen, alap- és háttérdoméneket feltüntetve szemlélteti, amelyek mindegyikében külön-külön azonosítható az emberi hibakomponens (1. ábra) [3].



1. ábra
Hibatípusok és háttértartományok [3]

Hibatípusok és a stressz

Bármelyik pilótahiba-modellt alkalmazzuk, mindegyikben az egyéni szinten azonosítható az észlelés és válaszreakció szintjén a stressz okozta hibás, hiányos, elkapkodott repülési választévkénység vész helyzetben, időkénszerben.

¹ Human Factor Analysis and Classification System: Emberi hiba Elemzési és Osztályozási Rendszere (US).

Az egyik legfontosabb direkt hatása a stressznek a percepció vagy észlelési hibák csoportjában van: egy fontos információt a pilóta nem észlel időben vagy félreértelmez (például vizuális illúzió miatt). A vizuális illúziók, a térbeli dezorientáció a félreértelmezés tipikus példái, amit elbizonytalanodás, stressz kísérhet. A második nagy emberi hibacsoport a szándék, az intenció hibái: a pilóta által követett repülési terv részlete kockázatot hordoz magában, mert ütközik a repülési körülményekkel. A pilóta szándékosan is megszegheti, illetve félreértelmezi a szabályokat, ez is emelkedett stressz-szinttel járhat. A harmadik nagy emberi hibacsoport a kivitelezés, a tényleges tevékenység hibája: egyszerű kihagyás egy összetett, egymásra épülő cselekvéssorban bajt okozhat, például a fel/leszálláskor a checklist (utasításlista) felolvasásakor kimarad valami, a tett nem követi a szót, vagyis a parancssort. A pilótamunka pszichés szempontból legnagyobb stresszt és kihívást jelentő jellemzője az időkénszer: lelassulhat a mozgás, mint válaszreakció, vagy éppen ellenkezőleg, kapkodóvá és összerendezetlenné válik, mindkettő veszélyes. Különösen kritikus lehet az éjszakai bevetés NVG² alkalmazása mellett, különösen helikopteren, erre vonatkozóan a NATO Tudományos Kutatási és Technológiai Szervezete munkacsoportja közöl – főleg helikopteres repülések esetében – emelkedő trendről tanúskodó statisztikát (2. ábra) [4].

	1983–1992			1993–2002		
	SD baleseti ráta (/100 000 repült óra)	Összes baleseti ráta (/100 000 repült óra)	SD-baleset %-os aránya* (/100 000 repült óra)	SD baleseti ráta (/100 000 repült óra)	Összes baleseti ráta (/100 000 repült óra)	SD-baleset %-os aránya* (/100 000 repült óra)
vadászgép	1,70	7,02	24,2%	1,63	5,78	28,2%
helikopter	0,99	4,07	24,3%	1,00	2,37	42,2%
minden típus	1,03	4,17	24,7%	0,88	2,70	33,0%

*(%-os arány két egymást követő évtizedben, 100 000 repült órára számítva, helikopteres és sugárhajtású repülőeszközökön)

2. ábra
Térbeli dezorientáció (SD) okozta balesetek repülésbiztonsági jelentősége [4]

Legnyilvánvalóbb a biológiai stressz és az oxigénhiány kapcsolata, amelynek során a szívdrom direkt munkavégző képessége és az agy autonóm (tudattól független, zsigeri) idegrendszeri szabályozása révén a szívfrekvencia modalitása, oszcillációja is megváltozik. Az agyi keringés és oxigenizáció romlása direkt módon befolyásolja a mentális-kognitív teljesítményt, fokozza a hibahajlamot, csökkenti az ítélőképességet a magassági részegség állapotában. Hasonló élettani stresszt és vegetatív egyensúlyvesztést okoz a gyorsulások-túlterhelések alatti pulzus- és vérnyomás-ingadozás (G-LOC³, akár vérnyomásesés és pulzuslassulás veszélyes együttállásával a push-pull manőver során, a botkormány/joystick dinamikus előrenyomásával-hátrahúzásával), ez is változatlanul jelentős repülésbiztonsági kockázat [5].

² NVG (Night Vision Goggles) éjjellátó készülék és FLIR (Forward Looking Infrared) előretékinítő infravörös képalkotó rendszer.

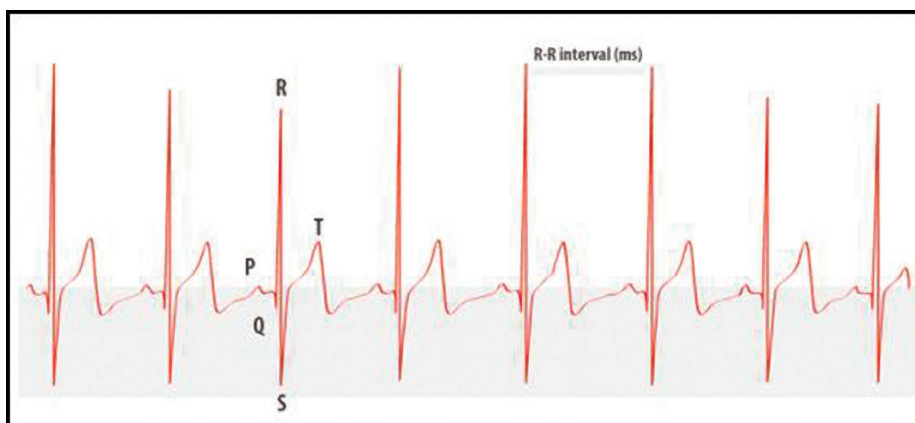
³ G-LOC – G induced loss of consciousness (gyorsulás-túlterhelés okozta eszméletvesztés).

Stressz és HRV

Szívfrekvencia és HRV-paraméterek

Földi szimulált stresszhelyzetben a monitorizálás elsődleges eszköze a szív- és érrendszer vonatkozásában a vérnyomás, pulzus és a testfelszíni 12 elvezetéses EKG volt, amellyel a földi szimuláció során mind barokamrában (nagy magasságú hypobáriás hypoxiában), mind centrifugában rögzíthetők az esetleges keringési zavarra utaló repolarizációs és ritmuszavarok. Ez előre jelezheti a vegetatív (zsigeri) idegrendszer megingási fogékonyságát, a pulzuslassulásra és vérnyomásesésre való hajlamot.

A szívfrekvencia egyik fő meghatározója az acetilkolin és noradrenalin (mint direkt idegi mediátor/transzmitter molekulák és a paraszimpatikus (tónusos X. bolygó agyidegi) hatás/szimpatikus idegrendszeri hatás finomhangolt, ellentétes befolyása.



3. ábra

EKG-görbe RR-intervallumainak oszcillációja [saját szerkesztés]

A vegetatív idegrendszer szívre gyakorolt hatásaként a szívfrekvencia oszcillációja figyelhető meg, így élettani jelenség, hogy a szív ciklusok közötti idő normális körülmények között kissé változik, de ciklusról ciklusra változik. A ciklusok közötti idők mérésével kapott idősorokban kvázi-periodikus ingadozások figyelhetők meg, amelyek egymásra rakódása, szuperpozíciója (más hullámtermészetű jelenségekhez hasonlóan) hozza létre a variabilitást. Ennek frekvenciadomén-függése a szimpatikus (zsigeri) idegrendszer két ága, a szimpatikus (izgalmi) és a paraszimpatikus (megnyugvó, regeneratív) folyamatokért felelős részek közötti dinamikus és harmonikus egyensúlyi állapottól függ. Ez az összefüggés visszafelé is igazolható, vagyis a kvázi-periodikus ingadozásoknak a frekvencia és időtartomány szerinti elemzése egyúttal az agyi folyamatokat is jellemzi. (3. ábra)

A szív- és érrendszeri funkció autonóm idegrendszeri kontrolljának kifinomultabb jellemzésére fejlesztették ki a szívfrekvencia spontán variabilitásának mérését (rövid EKG-regisztrátum vagy 24 órás Holter EKG-felvétel alapján). A légzési szinusz aritmia, a szívfrekvencia-variabilitás fő meghatározója atropinnal vagy vagotómiával (bolygó agyideg ágának átvágásával) felgyesztethető/kiüthető (ez a paraszimpatikus aktivitás fő közvetítője a fő ingerképző helyhez,

a jobb pitvarban lévő szinuszcsomóhoz). A legkézenfekvőbb módja a szívfrekvencia-variabilitás (HRV) jellemzésének az RR-intervallumok (egymást követő R hullámok, mint a kamrai elektromos aktivitás főkilengésének, a kamrai szívizomzat elektromos depolarizáció fő momentumának távolsága) átlagára vonatkozóan a standard deviáció kiszámítása és a pulzusra normalizált átlagra a standard deviáció (azaz a variancia koefficiens) számítása ($SD/\text{átlag} \times 100$). A vegetatív idegrendszeri struktúrák és a HRV-frekvenciatartományok közötti kapcsolatot a következő (4. ábra):

**SZÍVFREKVENCIA-VARIABILITÁS (HRV)
ÉS AZ AUTONÓM IDEGRENSZER KAPCSOLATA**

<i>frekvenciatartomány (erő komponens)</i>	<i>efferens vegetatív ideg</i>	<i>élettani szabályozó</i>
Ultra low frequency ULF: < 0,003 Hz	vagus, szimpatikus	renin-angiotenzin (RAS) rendszer
Very low frequency VLF: 0,003-0,04 Hz	?	?
Low frequency LF: 0,04-0,15 Hz	vagus, szimpatikus	baroreceptorok
High frequency HF 0,15-0,4 Hz	vagus	légzés
LF / HF	vagus, szimpatikus	baroreceptorok

4. ábra

HRV és a zsigeri autonóm vegetatív idegrendszer szabályozási kapcsolata [17]

Különösen fontos a közepes-alacsony frekvenciás komponens (LF – 0,1 Hz körül), ami a vazomotor (értónus szabályozó) rendszer vezérelte vérnyomásváltozásokkal, a baroreceptorok (nyaki verőerek nyomásérzékelő sejtjeinek) aktivitásával hozható összefüggésbe. Ebben a tartományban az oszcillációkat mind a szimpatikus, mind a paraszimpatikus rendszer befolyásolja, utóbbi a X. bolygó agyideg (nervus vagus) idegfonatán keresztül [6]. Ez a frekvenciatartomány érzékenyen reagál szellemi munkára: a szellemi terhelés elnyomja az oszcillációt ebben a tartományban, viszont a terhelés megszűntével egyféle visszacsapás-jelenség figyelhető meg, *utóbbi mértéke arányos a megelőző terhelés nagyságával*. Másrésztől, Izsó szerint, hosszabb ideig tartó, folyamatos terhelés során a középső frekvenciatartomány elnyomásának ingadozása az idő vetületében (szórás) arányos lehet a munkaterheléssel, amit egy adott feladat okoz az alanyban.

A fokozott HRV (paraszimpatikus túlsúly) jelzi a kellő regeneratív képességet, amely csökkent szív- és érrendszeri halálozással és megbetegedési mutatókkal párosul. A jelenlegi szoftverek (automatikusan továbblépő idő- és frekvenciakeretek mellett, például Fourier-analízis alkalmazásával idő- és frekvenciadomén szerint) elemzik az egyes frekvenciatartományokban a spektrális eloszlást [7], [8], [17].

A fentiek alapján a közepes tartomány, a vazomotor tónus ingadozása az autonóm idegrendszer egyensúlyi állapotának változását tükrözi, amely egészséges alanyon az alábbi szórási (SD) és variancia (RMSDD) paraméterekkel (az egymást követő NN-időintervallumok

ingadozásai alapján) jellemezhető a közepes-alacsony (LF) és magas (HF) frekvencia tartományokban. (5. ábra).

HRV-paraméterek definíciója és egymáshoz rendelése

IDŐ SZERINTI PARAMÉTER	FREKVENCIA SZERINTI PARAMÉTER	NORMÁL ÉRTÉK (átlag +- SD)
SDNN: az összes normális RR távolság standard deviációja	Teljes erő (power total), azaz a variancia négyzetgyöke	141 +- 39 msec (24 óra)
rMSSD: az egymást követő RR intervallumok közötti négyzetes differenciák átlagának négyzetgyöke	HF nagy frekvenciájú komponens	127 +- 35 msec (24 óra)
pNN50: a normális RR intervallumok közötti, 50 msec-nél nagyobb különbségek százaléka	HF nagy frekvenciájú komponens	20 % fölött

HRV spektrumanalízis (5 perces intervallumra)

LF (nu)	54 +- 4
HF (nu)	29+- 3
LF / HF	1,5 – 2,0

5. ábra

Egészséges fekvő alany 5 perces EKG felvételének idő- és frekvenciadomén szerinti HRV-adatai (lásd 4. ábra) [17]

Korábbi vizsgálatok szerint alacsonyabb magasságnak megfelelő oxigénhiány deprimálja mind a középső, mind a magas frekvenciájú komponenseket, továbbá ezek aránya (LF/HF azaz közepes/magas) eltolódik a közepes felé. Ennek oka a hipoxia okozta szimpatikus aktiváció és a kompenzáló légzési aktivitás (hiperventiláció) hatása a szívfrekvencia-variabilitásra [9], [10], [11].

A testszenzoros pulzusvariancia-mérő műszerek, mint a jelen pályázatban szereplő Bodyguard 2, vagy az Aviatronics Kft. által korábban fejlesztett Taguán mérőműszer jelenlegi változata vagy a Schimmer többcsatornás Holter EKG is miniatűrízált, ultrakönnyű, szinte észrevehetetlen testfelszíni elektródákkal rendelkeznek, a kamrai elektromos aktivitást jelző fő kilengések, azaz az RR-hullámok közötti távolságot elemzik.

Az agy-szív tengely megfelelő működése esetén, döntően szellemi munkavégzés alatt is objektív mérési módszerekkel kimutatható változások jelennek meg: változik az idegrendszeri aktivitás (szummációs EEG-P300⁴, fMRI⁵, CFF⁶), az endokrin, például mellékvesekéreg szteroid hormonszint (kortizol), a motoros tevékenység (EMG⁷, pupillatágasság), vagy a kardiovaszkuláris (pulzus, vérnyomás, szívfrekvencia-variabilitás) aktivitás. Az EKG-alapú analízisek előnye a non-invazivitás és a relatíve alacsony költség.

Saját vizsgálati protokollunkban a standard barokamrai vizsgálat által megszabott időkeret között vészhelyzeti oxigénhiányt szimulálva, egyúttal a kognitív teljesítményt és agyi

⁴ EEG P-300 újdonság P300 hullám az Elektromos Encephalogrammon – agyi elektromos aktivitási görbén, 300 msec-mal a primer jel után.

⁵ fMRI – funkcionális Mágneses Rezonancia Imagery, agyi képalkotó eljárás az aktív agyi területek feltérképezésére.

⁶ CFF – kritikus fúziós frekvencia – szemfenéki fényérző receptorok időbeli fényimpulzus-feloldási képessége.

⁷ EMG – Electromyogramm – izomzat elektromos aktivitásának mérése.

keringést agyi pulzoxymetria⁸ módszerével monitorizálva keressük a HRV-trendekben megjelenő esetleges elhúzó stresszreakció jeleit. A módszer alkalmas lehet a hypoxia elhúzó hatásainak elemzésére, a hypoxia és a „postexpoziós” után hatást tükröző 1-2 órás felvétel szeparált elemzésére is, az agyi keringés és oxigénhasznosulás elhúzó helyreállításának objektivizálásával, agyi pulzoxymetria szimultán, szinkron értékelésével. A hypoxia hangover („másnaposság”), mint az elhúzó mentális teljesítménycsökkenés lehetséges oka a közel-múltban merült fel, erre vonatkozó kísérleteink még folyamatban vannak [12]. Szinkronizált HRV és rOxSat agyi homloklebeny kevert vénás vér és perifériás (ujjon mért) oxigéntelítettségi értékek hypoxiás demonstráció után rendelkezésre állnak. Feltűnő, hogy kognitív feladat végrehajtása során a homloklebeny keringésében elhúzó hypoxaemia (kevert vénás vér csökkent oxigéntelítettsége) észlelhető egyes alanyoknál, még a folyamatos oxigénlélegzés és tengerszínti nyomásra történő visszatérés után is [5].

Természetesen a kognitív feladat végrehajtásának teljesítménye is mérhető pszichológiai, pszichometriai műszeres tesztekkel a barokamrában. A nagy magasság okozta individuális keringési eltérések mellett azonban a pszichés teljesítmény romlása is nagy egyéni variációt mutat, utólag értékelhető csak az egyszerű és összetett reakcióidő-romlás, hibahajlam.

Ezért a pszichológiai tesztek általában csak a hypoxiatudatosság fokozására, minősítési kötelezettség nélkül alkalmazzák barokamrában. Fontos lehet a kutatási szempont, a kognitív válaszadás hypoxiaérzékeny részfolyamatainak elemzése, amelyre a Magyar Honvédség Kecskeméti Repülőorvosi Intézet barokamrájában végzett kísérleteket a Magyar Tudományos Akadémia Pszichológiai Intézetének kutatócsoportja [13]. A korábbi vizsgálatokkal összehangzóan kimondható, hogy a magasabb szintű mentális teljesítményt, valamint a szenzomotoros koordinációt általánosságban a hipobáriás hypoxia rontja [14], [15], [16].

HRV és a klinikai betegségek

A szív- és érrendszeri működés autonóm vegetatív idegrendszeri szabályozására vonatkozóan elkészült tanulmányok segítenek azonosítani azokat a betegcsoportokat, amelyek nagyobb halálozási kockázatnak vannak kitéve a HRV-paraméterek csökkent értéke miatt, különösen infarktus utáni állapotban. Így a HRV-paraméterek hozzájárulhatnak a hagyományos rizikó-tényezőkkel (magas vérnyomás, szívelégtelenség stb.) együtt a prediktív érték javításához, a túlélés és halálozás előrejelzéséhez, mivel csökkent paraméterértékei hozzájárulhatnak a magas rizikójú posztinfarktusos betegek azonosításához, ahogy az ATRAMI-vizsgálat is igazolta.⁹

Egyéb klinikai betegségekben (cukorbetegséghez társuló autonóm idegrendszeri bántalom – diabéteszes neuropathia – korai jeleként) az LF és HF domén abszolút ereje (densitása) csökkent, de – mivel az autonóm idegrendszer mindkét ágát érinti az elváltozás – a kettő aránya (normalizált egységekben történő összevetése) nem változik. Vizsgálják egyéb szív-betegségekben (szívtranszplantáció, pangásos szívelégtelenség, krónikus kéthegyű vitorlás billentyűelégtelenségben) és neurológiai problémákban (Parkinson-kór, Sclerosis multiplex, Guillain-Barré-szindróma) is a HRV-paraméterek összesített/globális vagy individuális

⁸ MEDTRONIC Hungary Kft. által forgalmazott, NIRS (near infrared spectroscopy) elvén működő INVOS cerebrális (agy) pulzoxymeter készülék és kapnográf.

⁹ ATRAMI: Autonomic Tone and Reflexes After Myocardial Infarction – multicentrikus prospektív klinikai tanulmány.

változóinak prognosztikai értékét. Az eredményeket mindig standardizált, hosszú EKG-felvételt statisztikailag elemző program segítségével kell egészséges nyugalmi EKG-felvétel HRV-paramétereivel összevetni [17].

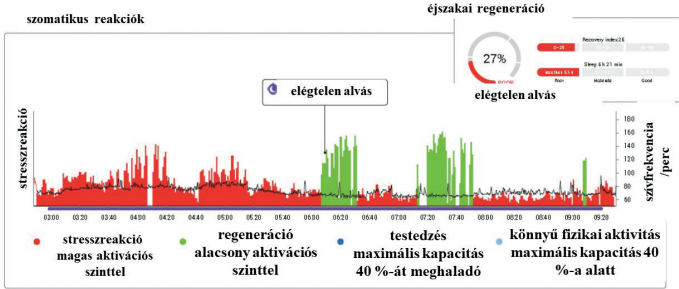
Az Európai Kardiológiai Társaság idézett klinikai irányelve már felveti a HRV-paraméterek non-lineáris, dinamikus (rövid távú) változásait mérő és jellemző matematikai módszerek, algoritmusok alkalmazhatóságát is, amelyek jobban illeszkednek a szív ciklus élettani változásaihoz (periodogram), akár stresszhelyzetben is.

Ez a zsigeri idegrendszeri tónus okozta moduláció nemcsak az aktuális stressz-szintet jellemzi, hanem a longitudinális (akár többnapos) követéssel a kifáradás-kimerülés és a regenerációs folyamat objektívizálását is szolgálja, az alvás minőségét is jellemzi. (Gyártó cég és algoritmus függvényében még az alvás minőségére, a fizikai aktivitás megfelelő szintjére is ad egyfajta numerikus jellemzést, illetve ennek ismeretében életmódi (automatikus standardizált) ajánlást is ad, illetve többszöri méréssel longitudinálisan, folyamatosan követi a „teljesítmény” javulását (alacsonyabb stressz-szint mellett alacsonyabb nyugalmi és terheléses pulzusszám, kevesebb „rossz stressz” szituációra utaló „peckelő”, rigid szívritmus, beszűkült RR-intervallum variabilitással. Természetesen ezek a komplex statisztikai jegyzőkönyvek már alapvetően a wellness/well-being/fitness marketing célú alkalmazásához vezetnek, amelyek a tudományos objektív eredményesség megítélését torzíthatják. Ugyanakkor (a céges profit-orientált megjelenéstől függetlenül) nagyon hasznos, informatív útmutatót jelenthetnek amatőr és profi sportolók számára például az éjszakai regeneráció és az aktív tréning/sportverseny periodizálására, az optimális teljesítménynövekedés eléréséhez, hasznos lehet a cirkadián ritmus utazás okozta felborulása (jet lag) esetén is (természetesen itt az idő felbontás kevésbé fontos, a hosszabb monitorizálási időtartam és a mobilitás javára) (6. ábra) [18].

Katonai célú alkalmazása is felmerült: a fokozott (vagy napszakokat, egymást követő napokat összehasonlítva ismét fokozódó HRV (paraszimpatikus túlsúly) jelzi a kellő regeneratív képességet, amely csökkent szív- és érrendszeri halálózással és megbetegedési mutatókkal párosul. A Bodyguard 2 komplett rendszer Fusion Vital által alkalmazott szoftvere (automatikusan továbblépő idő- és frekvenciakeretek mellett, például Fourier-analízis alkalmazásával idő- és frekvenciadomén szerint) elemzi a nyers adatok internetes honlapra történő feltöltése után az egész napi aktivitást.

A Kanadai Fegyveres Erők keretében most kezdődött Fitness (edzettségi állapot felmérését célzó) Program tudományos elemzése például a haditengerészet katonáinak aktivitását követi 6 napon keresztül, összehasonlítva a stresszes munkanapok és a pihenőnap alatti pulzusvariációt, ebből következtetve a stresszreakció okozta eltérésekre és a regeneráció hatékonyságára, a csökkenő rezerv (pszichés tartalék) minőségére [19]. Többnapos vizsgálat során ez már összevethető, akár analógiaként alkalmazva a repülésélettani megterhelés kapcsán jelentkező kifáradás és elégtelen alvás időbeli lefolyását is demonstrálni lehet (7. ábra).

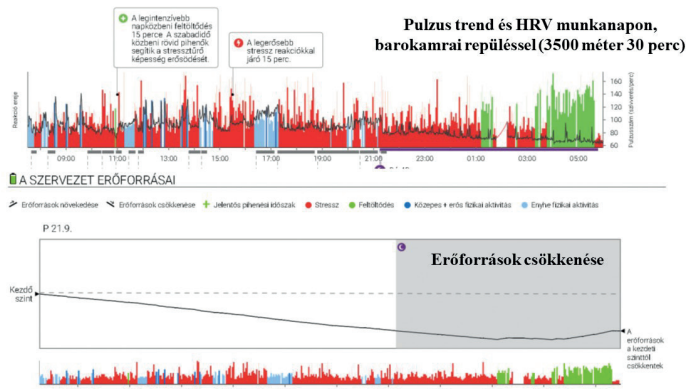
SZÍVFREKVENCIA PARAMÉTEREK ÉS ALVÁSMINŐSÉG (FIRSTBEAT/FUSION VITAL)



6. ábra

Szívfrekvencia paraméterek (pulzus és HRV) szinkódolt ábrázolása az alvásmínőség jellemzésére [18]

ÉLETMÓD FELMÉRÉS (FIRSTBEAT KÉSZÜLÉKKEL)



7. ábra

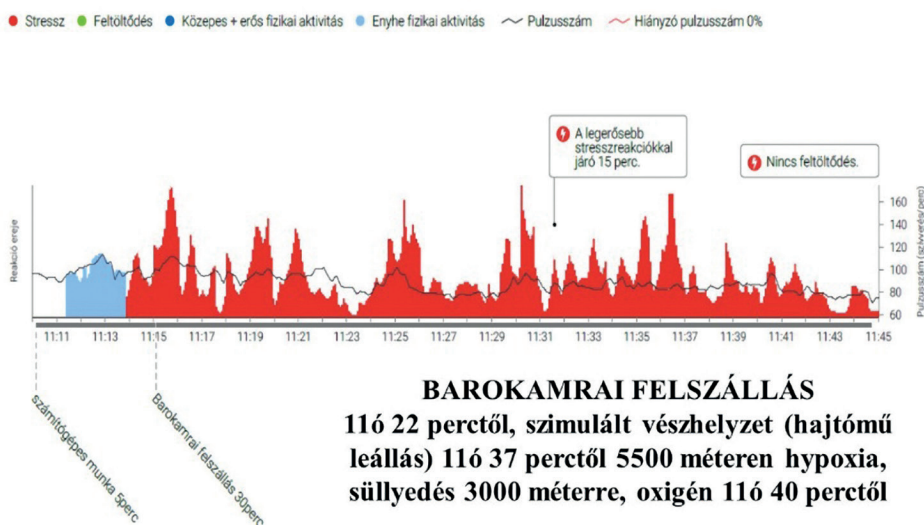
Pulzus trend és HRV alakulása barokamrai repülés napján, a rezerv csökkenésével [saját felvétel, Fusion Vital Bodyguard 2 készülékkel]

HRV mint stresszparaméter és a repülés

Jelenleg a vegetatív idegrendszeri paramétereket longitudinális validálással (beleértve a HRV, vagy egyéb EKG-jel átlagolt paramétert a pulzusszám kivételével) egyik légielő sem alkalmazza szelekciós kritériumként. Ugyanakkor kutatási jelleggel, a stressz-szint jellemzésére például a finn légielő nagy hűségű földi szimulátorban, megközelítés-leszállás repülési fázisában, műszeres repülés körülményei között vizsgálja a pszichés kognitív terhelés alatt a szívfrekvencia és HRV-paraméterek (elsősorban az idődomén-jellemzők) alakulását. (A pszichés terhelés

PMWL¹⁰-szintje a megközelítés előtti időtartam, vagyis a műszeres orientációra rendelkezésre álló idő csökkentésével növelhető, amíg a műszeres bejveteli teljesítmény – ILS¹¹ – a standard elfogadott szint alá csökken.) A teljesítmény és HRV-paraméterek szignifikáns változásait összehárosítva a manőverezés során szinte valamennyi HRV-paraméter szignifikánsan változott. Összesítve a PMWL szellemi munkaterhelés alatt a HRV-paraméterek alakulását, különböző tanulmányok alapján kirajzolódik a vegetatív idegrendszer instabilitása, a paraméterek disztorziója révén: miközben az átlagfrekvencia növekszik, az LF frekvenciatartományban és az LF/HF hányadosban a szimpatikus tónusnövekedés egyértelműen megfigyelhető, a pulzus rigiddé válik [20].

Más kutatások a térbeli dezorientáció (vagyis a térbeli tájékozódóképesség elvesztése) kapcsán létrejövő stressz és a megelőzést szolgáló vizuális pásztázó technika (scanning) egymásra gyakorolt hatását vizsgálták, szintén magas hűségű (hi-fi) szimulátorban. 18 kiképzett pilóta levegő-föld feladat végrehajtása közben az eye-tracking (szemmozgásokat leképező berendezés) segítségével követték a szemmozgást (szkennelést) és a dezorientáció jeleit [21]. Kiderült, hogy a jobb térbeli tudatosságot (SA¹²) mutató pilóták alacsonyabb munkaterhelést érzékeltek, és a rossz SA-teljesítmény (= dezorientáció hajlam) magas stressz-szinttel (érezkelt munkaterheléssel) párosult. Jelentős különbségek voltak a feladat végrehajtása közben a fixáció („leragadás”) tekintetében a pilóták között és a fixáció időtartamában is, amelyek a szemmozgás követésével objektívizálhatóká váltak.



8. ábra

HRV-monitorizálás eredményei barokamrai passzív VR-repülés közben, hypoxiás vészhelyzettel [szerző saját regisztrátuma FusionVital Bodyguard 2 készülékkel]

¹⁰ PMWL: Pilot Mental Work Load – a pilóta mentális terhelési szintje.

¹¹ ILS – Instrument Landing System – műszeres bejveteli és leszállási rendszer.

¹² SA – Situational Awareness – térbeli tudatosság, azaz orientáció és tájékozódóképesség.

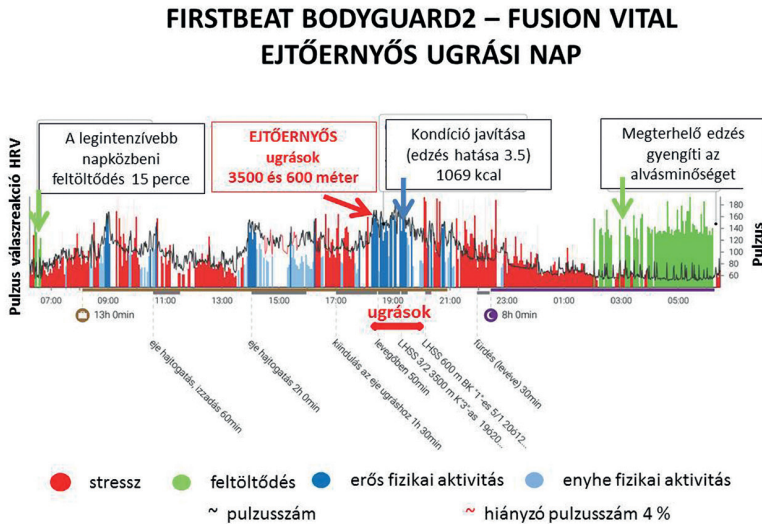
Saját esettanulmányunk (amely alapján jelenleg standardizált barokamrai felszállási protokoll kialakítása folyik) azt mutatja, hogy a szimulált barokamrai VR repülési vészhelyzet közben a HRV-monitorizálás hasznos lehet a stressz-szint jellemzésére (8. ábra).

Ezzel párhuzamosan valós repülési helyzetben is mértük a HRV-trendeket, elsődlegesen felmérve a Bodyguard 2 készülék gyorsulás-túlterhelés tűrőképességét és összehasonlítva a repülésmentes (felkészülési vagy pihenőnap) és az operatív kiképzési nap (GRIPEN harci repülőn pilóta műrepülése és hivatásos ejtőernyős beosztásban lévő ejtőernyős ugrása) alatti szívfrekvencia-modulációt.

Megállapítható, hogy tapasztalt, a repülési/ugrási feladatra kiválóan képzett hajózó, illetve ejtőernyős számára az „éles bevetés” limitált időszaka nem jelent extrém megterhelést, még a normális fizikai kiképzés (konditerem) fizikai terheléséhez képest sem, utána pedig kellő ütemű a regeneráció. Ugyanakkor a 9 G_z (fej-láb irányú) túlterheléssel végrehajtott műrepülés alatti túlnyomásos légzéses rezsim vagotóniára (fokozódó paraszimpatikus tónusra) gyakorolt hatása is felismerhető: a kék szín a vagotóniára utaló fokozott pulzusvariancia, amely az AGSM légzésvisszatartás és izomfeszítés folyamatos kényszere miatt itt nem a stressz oka, hanem élettani következménye! A G (túlterhelés) tűrőképesség megítélésére viszont a HRV-görbe jól használható, amely alapján a bradycardia hajlam – pulzuslassulás rossz tűrőképességgel – időben felismerhető. Valós ejtőernyős ugrások kapcsán ejtőernyős növendékeknél az ugrás kritikus fázisaiban magasabb volt az átlagpulzus, csökkent az SDNN (egymást követő RR-távolságok szórása). A kiképzés során a pulzusszám csökkent, a HRV-paraméterek (RMSSD standard deviancia négyzetgyöke) és az LF/HF hányados nőtt, igazolva a paraszimpatikus tónus növekedését, a szimpatikus izgalmi állapot csökkenését (9–11. ábra) [22].

A pszichés terhelés (stressz-szint) és a HRV kapcsolatát vizsgáló nagy tanulmányokra vonatkozó metaanalízis szerint az indukált stressz kapcsán a HRV-paraméterek közül legkonzekvensebb változás az alacsony paraszimpatikus aktivitás volt, amely a HF (magas frekvenciasáv) csökkenésével (HF) és az alacsony frekvenciasáv (LF) növekedésével járt együtt. Szimultán végzett neuroimaging (agyi leképező, képalkotó) technikák alkalmazása arra utal, hogy a HRV eltolódása köthető bizonyos agyi területek aktivitásához (például ventromediális prefrontális agykérgi régió) [23].

és csökkent paraszimpatikotónia irányába mozdulnak (főleg ülő testhelyzetben). Ez párhuzamba állítható a hosszú távú bevetés okozta kifáradás mérhető véralkohol-koncentrációval egyenértékű pszichés teljesítmény csökkenésével [24]. Vannak a (különböző módon indukált) rövid távú fájdalom okozta HRV-paramétertorzulásokra és modulációkra vonatkozó elemzések is, amelyek az egyének közötti fájdalomtűrésbeli különbségeket magyarázhatják [25].



Összefoglalás

A Magyar Honvédség technikai eszközrendszerének, személyi és infrastrukturális fejlesztésének nagyléptékű átfogó modernizációját célzó Zrínyi 2026 programban prioritást élvez a pilóta-képzés teljes önálló, nemzeti spektrumának megteremtése. A Nemzeti Közszolgálati Egyetem Honvédtisztképző és Hadtudományi Karán a Katonai Repülő Intézetben a Légiközlekedési Szak beindítása kapcsán olyan jelöltek kiválogatására van szükség, akik pszichés és élettani mutatóik alapján képesek a 21. század katonai repülésében jelentkező repülésélettani kihívásoknak és információs stresszterhelésnek megfelelni. Magas szintű szenzoros képességek követelménye mellett a térbeli látás és tájékozódóképesség, a vizuomotoros (kéz-szem koordinációs) feladatok végrehajtási képessége és a multitasking (párhuzamos feladatok koordinált végrehajtása), a vészhelyzeti menedzselés hatékonysága, mindezek hátterében a stressztűrőképesség megítélése lehet fontos a jelöltek rangsorolásában.

A szív- és érrendszeri működés autonóm vegetatív idegrendszeri szabályozására vonatkozóan elkészült tanulmányok korábban segítettek azonosítani azon betegcsoportokat, amelyek nagyobb halálzási kockázatnak vannak kitéve a HRV-paraméterek csökkent értéke (magasabb

szimpatikotónia) miatt, különösen infarktusz utáni állapotban. Így a HRV-paraméterek a klinikai gyakorlatban hozzájárulhatnak a hagyományos rizikótényezőkkel (magas vérnyomás, cukorbetegség) együtt a mortalitás (halálozás), illetve a túlélési esély (gyógyszeres kezelés hatékonyságának) megítéléséhez, a prediktív (jósló) érték javításához.

Egészséges fiatal, de nagy stressz-szint mellett, nem konvencionális beosztásokban dolgozók (például katonaság, azon belül katonai repülő-hajózási állomány) alkalmassági szűrővizsgálatánál jellemzően az emocionálisan stabil, alacsony stressz-szint mellett magas produktivitást mutató jelöltek élveznek prioritást. Ebben a csoportban a kognitív teljesítménymutatók összevetése (korreláltatása és szimultán értékelése) a mögöttes vegetatív idegrendszeri stabilitás (és gyors regeneráció, vagy reziliencia, lelki rugalmasság), vagy instabilitás (stressz és gyors kimerülés) HRV-mutatóival, esetleg az agyi vérátáramlás és a multicSATornás EEG nyújtotta direkt regionális agyi aktivitási jellemzőkkel hasznos lehet (bár ennek automatizált kiértékeléséhez neurobiológus, neuropszichológus és ideggyógyász szakember segítsége kell).

A kiképzett pilótáknál pedig a fenti képességek terén a teljesítmény longitudinális követése (éves vizsgálatok során az adatbázis összehasonlítása) nyújt információt és visszajelzést a pilóta aktuális szellemi munkavégző-képességéről és stressztűrő-képességéről. Barokamrában standardizált hypoxiás felszállás során a kognitív teljesítmény kényszere szimulátoron végrehajtott repülési feladattal egybekötve még informatívabb lehet a tényleges szellemi teljesítőképességéről. Távlati célként fenti EKG HRV szenzoros követés és kiértékelési képesség fedélzeti alkalmazása (orvosi fekete doboz) is felmerül.

A repülésetteni kihívások hatását a stressztűrőképességre, a humán teljesítő képességre jelenleg kutatási projektben is vizsgáljuk, a GINOP-2.3.2-15-2016-00007 számú, „A légiközlekedés-biztonsághoz kapcsolódó interdiszciplináris tudományos potenciál növelése és integrálása a nemzetközi kutatás-fejlesztési hálózatba a Nemzeti Közszolgálati Egyetemen (VOLARE)” projekt keretében. A kutatási projekt során megvalósuló, a pilóták éves repülőegészségügyi alkalmassági vizsgálataiba integrálódó funkcionális teljesítménydiagnosztikai vizsgálatok és a stresszmonitorozást biztosító HRV-készülék (Fusion Vital cég Firstbeat Bodyguard 2 szívfrekvencia-varianciát mérő készüléke) együtt alkalmas lehet a pilótát érő repülés-életteni kihívások során a vegetatív idegrendszert érő akut hatások jellemzésére, a szív- és érrendszeri rezerv kapacitás és regeneráció megítélésére. A beállított mérési módszerek alkalmasak lehetnek a pulzusstabilitás mérésével a stresszreakció jellemzésére.

Köszönetnyilvánítás

Hálás köszönetünket fejezzük ki Vada Gergely címzetes egyetemi docensnek, a Fusion Vital cég képviselőjének a Firstbeat Bodyguard 2 készülék rendelkezésre bocsátásáért és szakmai tanácsaiért.

Felhasznált irodalom

- [1] S. A. Shappell, D. A. Wiegmann, "A human error approach to accident investigation: The taxonomy of unsafe operations," *International Journal of Aviation Psychology*, vol. 7, no. 4, pp. 269–291, 1997. DOI: https://doi.org/10.1207/s15327108ijap0704_2

- [2] J. Reason, "Human error: models and management," *British Medical Journal*, vol. 320, no. 7237, pp. 768–770, 2000. DOI: <https://doi.org/10.1136/bmj.320.7237.768>
- [3] J. W. Chappelow, "Error and accidents," in: *Aviation Medicine*, J. Ernsting Ed. Oxford: Butterworth-Heinemann, 2000, p. 599.
- [4] NATO RTO/STO Tudományos Technológiai Szervezet – RTO TECHNICAL REPORT TR-HFM-118. SD (térbeli dezorientációs) tréning – kiképzés és elkerülés, TG-039 Munkacsoport Zárójelentés, p. 23. 2008. [Online]. Elérhető: www.researchgate.net/publication/235197713_Spatial_Disorientation_Training_Demonstration_and_Avoidance (Letöltve: 2019. 03. 16.)
- [5] S. A. Szabó, „Repülésélettani kihívások a hadműveleti tapasztalatok tükrében,” *Repülés-tudományi Szemelvények*, 2017, pp. 159–196.
- [6] F. Weise, F. Heydenreich, and U. Runge, "Contributions of sympathetic and vagal mechanisms to the genesis of heart rate fluctuations during orthostatic load: a spectral analysis," *Journal of the Autonomic Nervous System*, vol. 21, no. 2–3, pp. 127–134, 1987. DOI: [https://doi.org/10.1016/0165-1838\(87\)90015-4](https://doi.org/10.1016/0165-1838(87)90015-4)
- [7] E. Láng, „Szívperiódus variabilitás,” Oktatási segédanyag, Munka- és szervezetpszichológia, Budapesti Műszaki Egyetem, 2001.
- [8] L. Izsó, *Developing Evaluation Methodologies for Human-Computer Interaction*, Delft, The Netherlands: Delft University Press, 2001, pp. 11–43., 88.
- [9] R. Perini, S. Milesi, L. Biancardi, and A. Veicsteinas, "Effects of High Altitude Acclimatization on Heart Rate Variability in Resting Humans," *European Journal of Applied Physiology and Occupational Physiology*, vol. 73, no. 6, pp. 521–528, 1996. DOI: <https://doi.org/10.1007/BF00357674>
- [10] Y. Yamamoto, Y. Hoshikawa, and M. Miyashita, "Effects of Acute Exposure to Simulated Altitude on Heart Rate Variability During Exercise," *Journal of Applied Physiology*, vol. 81, no. 3, pp. 1223–1229, 1996. DOI: www.doi.org/10.1152/jappl.1996.81.3.1223
- [11] C. Povea, L. Schmitt, J. Brugniaux, G. Nicolet, JP. Richalet, and JP. Fouillot, "Effects of Intermittent Hypoxia on Heart Rate Variability during Rest and Exercise," *High Altitude Medicine & Biology*, vol. 6, no. 3, pp. 215–225, 2005. DOI: www.doi.org/10.1089/ham.2005.6.215
- [12] T. Leino, "Normobaric hypoxia training in tactical F/A-18C Hornet simulator," előadás, 6th User Meeting, Graz, 2017. szeptember 17.
- [13] E. Takács, I. Czizler, L. G. Pató, and L. Balázs, "Dissociated components of executive control in acute hypobaric hypoxia," *Aerospace Medicine and Human Performance*, vol. 88, no. 12, pp. 1081–1087, 2017. DOI: <https://doi.org/10.3357/AMHP.4771.2017>
- [14] JS. Picard, DP. Gradwell, "Respiratory Physiology and Protection Against Hypoxia," in *Fundamentals of Aerospace Medicine*, J. R. Davis, R. Johnson, J. Stepanek, and J. A. Fogarty, Eds. Philadelphia, USA: Lippincot Williams & Wilkins, (4th Edition) 2008, pp. 20–45.
- [15] M. C. Bonnom, Noël-Jordan, and P. Therme, "Psychological Changes during Altitude Hypoxia," *Aviation, Space, and Environmental Medicine*, vol. 66, pp. 330–336, 1995.
- [16] B. Fowler, D. D. Elcombe, B. Keslo, and G. Porlier, "The Threshold of Hypoxia Effect on Perceptual-Motor Performance," *Human Factors*, vol. 29, no. 1, pp. 61–66, 1987. DOI: www.doi.org/10.1177/001872088702900106
- [17] M. Malik, J. T. Bigger, A. J. Camm, R. E. Kleiger, A. Malliani, A. J. Moss, and P. J. Schwartz, "Heart Rate Variability: Standards of measurements, physiological interpretation, and

- clinical use," *European Heart Journal*, vol. 17, no. 3, pp. 354–381, 1996. DOI: <https://doi.org/10.1093/oxfordjournals.eurheartj.a014868>
- [18] FIRSTBEAT/Fusion Vital: A 360-degree Understanding Helps Get Athletes 100-percent Game Ready, [Online]. Elérhető: <https://content.firstbeat.com/firstbeat-guide-to-understanding-athlete-stress-and-recovery> (Letöltve: 2018. 11. 25.)
- [19] J. Martin, M. Spivock, "Firstbeat Brings Scientific Perspective to Canadian Armed Forces Fitness Study," *firstbeat.com*, [Online]. Elérhető: www.firstbeat.com/en/news/caf/ (Letöltve: 2018. 03. 15.)
- [20], H. Mansikka, P. Simola, K. Virtanen, D. Harris, and L. Oksama, "Fighter pilots' heart rate, heart rate variation and performance during instrument approaches," *Ergonomics*, vol. 59, no. 10, 1344–1352, 2016. DOI: www.doi.org/10.1080/00140139.2015.1136699
- [21] C-s. Yu, E. M-y. Wang, W-C. Li, and G. Braithwaite, "Pilots' Visual Scan Patterns and Situation Awareness in Flight Operations," *Aviation, Space, and Environmental Medicine*, vol. 85, no. 7, pp. 708–714, 2014. DOI: <https://doi.org/10.3357/ASEM.3847.2014>
- [22] K. Mazurek, N. Koprowska, J. Gajewski, P. Zmijewski, F. Skibniewski, and K. Rózanowski, "Parachuting Training Improves Autonomic Control of the Heart in Novice Parachute Jumpers," *Biocybernetics and Biomedical Engineering*, vol. 38, no. 1, pp. 181–189, 2018. DOI: www.doi.org/10.1016/j.bbe.2017.11.004
- [23] H-G. Kim, E-J. Cheon, D-S. Bai, Y-H. Lee, and B-H. Koo, "Stress And Heart Rate Variability: A Meta-Analysis and Review of the Literature," *Psychiatry Investigation*, vol. 15, no. 3, pp. 235–245, 2018. DOI: <https://doi.org/10.30773/pi.2017.08.17>
- [24] X. Zhong, H. J. Hilton, G. J. Gates, S. Jelic, Y. Stern, M. N. Bartels, R. E. DeMeersman, and R. C. Basner, "Increased sympathetic and decreased parasympathetic cardiovascular modulation in normal humans with acute sleep deprivation," *Journal of Applied Physiology*, vol. 98, no. 6, pp. 2024–2032, 2005. DOI: www.doi.org/10.1152/jappphysiol.00620.2004
- [25] J. Koenig, M. N. Jarczok, R. J. Ellis, T. K. Hillecke, and J. F. Thayer, "Heart rate variability and experimentally induced pain in healthy adults: a systematic review," *European Journal of Pain*, vol. 18, no. 3, pp. 301–314, 2014. DOI: <https://doi.org/10.1002/j.1532-2149.2013.00379.x>

STRESS AND FLIGHT (Heart Rate Variability Parameters in Simulated and Real Flight Stress Situation)

Flight is inherently dangerous: in an emergency situation (such as a threat of hypoxia and overload, or in time-constraint) the pilot's actual physical-mental performance might deteriorate rapidly, accompanied by the imbalance of the vegetative nervous system, that is stress. The increased stress and the consequences (reduced sensorial perception, loss of situational awareness) can lead to erroneous physical acts and responses, itself revoking new stress and momentary incapacitation with a psychic background. Our target is to evaluate the physiological stress in ground-based aeromedical stressor settings (in barochamber simulated hypobaric hypoxia) combined with Virtual Reality as a visualised flight simulation. Furthermore, we accomplish real flight stress assessments, as well on board of Gripen multirole fighter aircraft and during parachute deployment. We evaluate the stress reaction of the heart-brain axis by Heart Rate

Variability (pulse variance) parameters produced by Firstbeat Bodyguard 2 and adapted to real flight (aerobic flight of Gripen and paratrooper's jump).

Keywords: aeromedical stressors, hypoxia and acceleration produced heart rate variability parameters, (pulse variance), VR (virtual reality) flight

Dr. habil. Szabó Sándor András, PhD
Nemzeti Közszolgálati Egyetem Hadtudományi
és Honvédtisztképző Kar, Katonai Műszaki Doktori Iskola
oktatója
Szegedi Tudományegyetem Általános Orvostudományi
Kar Repülő- és Űrorvosi Tanszék, mb. tanszékvezető,
docens
sasi19620@gmail.com
<https://orcid.org/0000-0002-1362-4723>

Dr. habil. Sándor András Szabó, PhD
National University of Public Service
Faculty of Military Science and Officer Training
Lecturer in the Doctoral School of Military Engineering
University of Szeged
Faculty of Medicine
Department of Aviation and Space Medicine
Associate Professor, Acting Head of Department
sasi19620@gmail.com
<https://orcid.org/0000-0002-1362-4723>

A GINOP 2.3.2-15-2016-00007 „A légitözlekedés-biztonsághoz kapcsolódó interdisz-
ciplináris 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 valósul meg.

A kutatás a fenti projekt „AVIATION_HUMAN” nevű kiemelt kutatási területén valósult meg.



<http://journals.uni-nke.hu/index.php/reptudkoz/article/view/248/168>

VÁKÁT OLDAL