

Halmi Lajos¹

Szívfrekvencia-variabilitás monitorozása légi járművek fedélzetén

In-flight Heart Rate Variability Monitoring

Absztrakt

A légi járművek irányítása komplex, az emberi figyelem egészét kívánó tevékenység, amely mélyreható információfeldolgozást igényel, ezáltal aktív pszichológiai, kognitív és fizikai terhelést jelent az operátorok számára. A fellépő stresszorok teljesítménycsökkenéshez vezethetnek és redukálhatják a repülésbiztonságot, ennek érdekében a repülőgép-vezetők mentális terhelésének monitorozása kulcsfontosságú adatokkal szolgálhat a biztonság növelésének szempontjából. A mentális terhelés ugyanakkor többtényezős dimenzió, amelyet számos külső és belső (emberi) tényező befolyásolhat, ugyanakkor a mai magasan automatizált fülkékben a konvencionális mérési protokollok kihívásokba ütközhetnek. A szívfrekvencia-variabilitás (heart rate variability, HRV) ígéretes eszközként jelent meg a szakemberek mentális terhelésének valós repülési körülmények közötti detektálására. A szívfrekvencia-variabilitás mérésének lehetősége az operátorok terhelésének vizsgálatára összetett környezetben a jövőben számos új lehetőséget nyit meg. A módszer segítségével generált adatok révén alkalmas az autonóm idegrendszer stresszválaszának és regenerációs képességének feltérképezésére. Szemléltetésül: a fáradtság szubjektív, egyénenként változó ütemben és mélységben megjelenő érzet, amelynek objektív értékelése esetenként nehézségekbe ütközik. A szívfrekvencia-variabilitás olyan minőségű biomarker a fáradtsági állapot felmérésére, amely hozzásegíthet a fáradtság részletesebb megértéséhez.²

Kulcsszavak: emberi tényező, repülésbiztonság, mentális terhelés, szívfrekvencia, stressz, fáradtság

¹ Doktori hallgató, Nemzeti Közszerológiai Egyetem Katonai Műszaki Doktori Iskola, e-mail: halmi.lajos@gmail.com

² WANG-HOUGHTON-MAJUMDAR 2024.

Abstract

Aircraft operation is a complex task that requires the full capacity of human attention and involves extensive information processing, consequently, it imposes significant psychological, cognitive, and physical workload on operators. Stressors encountered during flight can lead to performance degradation and may reduce flight safety. Therefore, monitoring pilots' mental workload can provide valuable data for improving operational safety. Mental workload is a multidimensional construct influenced by numerous external and internal (human-related) factors. However, in today's highly automated cockpit environments, conventional workload measurement protocols may face considerable limitations. Heart rate variability (HRV) has emerged as a promising tool for detecting professionals' mental workload under real flight conditions. The application of HRV measurement to assess operator workload in complex environments opens up numerous future opportunities. Data generated through this method can be used to characterise the stress response and recovery capacity of the autonomic nervous system. Fatigue, for instance, is a subjective sensation that manifests at different rates and intensities across individuals, which makes its objective assessment challenging. Heart rate variability represents a high-quality biomarker for evaluating fatigue status and may contribute to a more comprehensive understanding of fatigue-related processes.

Keywords: human factors, aviation safety, mental workload, heart rate, stress, fatigue

Bevezetés

A katonai és más kiképzési tevékenységekről ismert, hogy magas szintű stresszt idéznek elő, akár felkészítés, akár tényleges műveletek során. Ezen feladatok közül a repülés különösen kiemelkedik a stresszterhelés szempontjából. A repülésben rejlő egyértelmű kockázatok mellett a komplex környezeti hatások magas szintű kognitív aktivitást követelnek meg az operátoroktól, továbbá olyan nem ideális helyzetek kialakulásáért felelősek, amelyek negatívan befolyásolják a teljesítményt, például: dehidratáció, fáradtság, optikai illúzió és térbeli dezorientáció. Ezeknek a pszichológiai, fizikai és kognitív tényezőknek az összessége alkotja a repülőgép-vezetők általános terhelését, amelyekkel számolni kell egy feladat végrehajtása során. Ha ezek a hatások elérnek egy bizonyos mértéket (amely értékek mindenkinél különböznek), akkor, az emberi információfeldolgozás korlátossága miatt, a teljesítményben visszaesés figyelhető meg. Ennek az egyéni korlátnak az elérése fáradtságot okoz, ami korlátozza a munkavégzés folyamatosságát és csökkenti a repülésbiztonság mértékét. A terhelés és a teljesítmény monitorozása tehát kulcsfontosságú, mivel a mért paraméterek előre jelzik, hogy a repülőgép-vezetők hatékonysága rövid időn belül romolhat. A tanulmány célja annak vizsgálata, hogy a szívfrekvencia-variabilitás (HRV) milyen mértékben alkalmazható objektív biomarkerként a repülőgép-vezetők mentális és fiziológiai terhelésének monitorozására a repülési környezetben. A kutatás továbbá arra törekszik, hogy feltárja a HRV-mutatók és a pilóták teljesítményét

befolyásoló stressz- és fáradtsági tényezők közötti kapcsolatot, hozzájárulva ezzel a repülésbiztonságot támogató monitorozási és prevenciós rendszerek fejlesztéséhez.

Az utóbbi évtizedekben a kutatások növekvő számban használták fel a szívfrekvencia-variabilitást (HRV) a repülésben részt vevők terhelésének vizsgálatára.³

Az 1. táblázat a fő HRV-indexeket és azok értelmezését mutatja be.

1. táblázat: A fő HRV-indexek

Módszer	Index	Leírás	Autonóm hatás
Időtartomány	SDNN standard deviation of NN intervals	A normál szinuszritmusú szívütések közötti időintervallumok szórása ezredmásodpercben (ms)	Szimpatikus és paraszimpatikus
	RMSSD root mean square of successive differences	A normál szívütések közötti egymást követő különbségek négyzetes középértéke (ms)	Paraszimpatikus
	pNN50 percentage of successive NN	Az egymást követő R-R intervallumok azon százaléka, amelyek több mint 50 ms-mal térnek el egymástól (%)	Paraszimpatikus
	HRVti triangular index	HRV háromszög index: az RR-intervallum-hisztogram sűrűségének integrálja osztva annak magasságával	–
Frekvencia-tartomány	ULF ultra low frequency	Ultraalacsony frekvenciájú teljesítmény: $\leq 0,003$ Hz (ms^2)	Szimpatikus és paraszimpatikus
	VLF very low frequency	Nagyon alacsony frekvenciájú teljesítmény: $0,0033\text{--}0,04$ Hz (ms^2)	–
	LF low frequency	Alacsony frekvenciájú teljesítmény: $0,04\text{--}0,15$ Hz (ms^2)	Főként szimpatikus, részben paraszimpatikus
	HF high frequency	Magas frekvenciájú teljesítmény: $0,15\text{--}0,4$ Hz (ms^2)	Paraszimpatikus
	LF/HF	Az LF és HF aránya (%)	Vegetatív egyensúly
	TOTpow total power	Teljes spektrális teljesítmény (ms^2)	–
Nemlineáris módszerek	SD1 standard deviation	Poincaré-diagram szórása az identitásvonalra merőlegesen (ms)	Paraszimpatikus
	SD2	Poincaré-diagram szórása az identitásvonal mentén (ms)	Szimpatikus és paraszimpatikus
	SampEn	Mintázatterófia, amely az idősor szabályosságát és komplexitását méri	–
	$\alpha 1$	Detrended fluctuation analysis (DFA) paraméter, amely a rövid távú fluktuációkat írja le	–

Forrás: SHAFFER–GINSBERG 2017

³ MANSIKKA et al. 2015.

A HRV-érték a szívütések közötti időintervallumokon (RR-intervallum, kamrai összehúzódások) alapuló matematikai számítások összessége, segítségével következtetni lehet az autonóm idegrendszer (*autonomic nervous system*, ANS) aktivitására, avagy a szimpatikus és paraszimpatikus idegrendszeri működés arányára. Leggyakrabban a HRV-érték csökken a kognitív igénybevétel hatására, ami szimpatikus működést indikál. Abban az esetben, ha a stresszhatás félbeszakad, vagy a terhelés mérséklődik, a homeosztázis (önszabályozás) helyreáll a paraszimpatikus összetevők bekapcsolódása révén. A gyakorlati orvosi alkalmazásokban a magas HRV-érték egészséges, ideális alkalmazkodóképességgel rendelkező egyéneket jelez. A HRV-érték kulcsfontosságú mérőeszköz az akut ingerekre adott fiziológiai válaszok értékelésére, jöllehet az érték egyéni, és függ az alany kognitív kompetenciáitól, pszichomotoros készségeitől és teljesítménykapacitásától. A magas HRV-vel rendelkező repülő személyek magasabb pontossággal és gyorsabban hajtják végre a kognitív kihívásokat, valamint hatékonyabban reagálnak a stressz okozta hatásokra.⁴

A szívfrekvencia mérését széles körben alkalmazzák a klinikai területeken, sportteljesítmény meghatározásában és egyes wellness programokban, napjainkban kezd a repülésben adaptálódni és terjedni. A repülésben gyűjtött és értékelt HRV-adatok hozzásegítenek a repülőgép-vezetők aktuális fiziológiai állapotának mélyebb megértéséhez valós időben, ami hozzájárulhat a képzési és regenerációs időszakok optimalizálásához, valamint a túlteljesítés és az azt követő teljesítménycsökkenés prevenciójához. A módszert kihasználva lehetőségünk nyílik szisztematikusan feltérképezni a pilóták repülés közbeni autonóm szabályozásában bekövetkező változásokkal kapcsolatos hatásokat, annak érdekében, hogy objektív mérőszámok segítségével jellemezzük terhelésüket a repülés különböző szakaszaiban és repülési profiljaiban.

HRV-mérés alapjai

A szívfrekvencia-variabilitás (HRV) a pszicho-fiziológiai jellemzők szemléltetésére és elemzésére szolgáló mérhető mutató, amely az egymást követő szívverések közötti időintervallumok (*inter-beat interval*, IBI) matematikai vizsgálatára támaszkodik. Az IBI-időt az EKG-mérés során állapítják meg, mégpedig a szív elektromos jelének legjellegzetesebb pontjai, az R-csúcsok (kamrai összehúzódás fő elektromos jele) alapján, nagy pontosságú mintavételezéssel, jellemzően 250–1000 Hz közötti frekvenciával. Minél nagyobb a mintavételi frekvencia, annál pontosabb HRV-mutatókat kaphatunk, különösképpen a dinamikus cselekvések és komplex kognitív folyamatok során. A HRV-érték az autonóm idegrendszer aktivitásának közvetett mutatója. A szimpatikus aktivitás és a paraszimpatikus (vagális) aktivitás mérséklődése rövidebb és nem oly változékony R–R-intervallumokat produkál, ami az esetek nagy hányadában a HRV-mutató csökkenésében nyilvánul meg. Ugyanakkor a paraszimpatikus fölény nagyobb HRV-vel jár, amely a szervezet jobb adaptációs és regenerációs képességére enged következtetni. A szívfrekvencia-variabilitás időbeli változásainak vizsgálata lehetővé teszi a stresszreakció, a terhelés és a regeneráció tárgyilagos értékelését, továbbá a teljesítményt meghatározó pszicho-fiziológiai események

⁴ BRANDELLO FARIAS SOARESET et al. 2025.

nyomon követését.⁵ A gyakorlati mérések során a leghatékonyabban alkalmazható HRV-paramétereket az időtartományi és frekvenciatartományi módszerekkel elemzik. Ezek az eljárások statisztikai megközelítéseket alkalmaznak a szívfrekvencia időbeli alakulásának középértékére vonatkozóan. A HRV segítségével a szívfrekvencia szabályozását az átlagértékek és a kilengések komplett skálájának figyelembevételével számszerűsítik az idő függvényében. Mindazonáltal előfordulhat, hogy két alany meg egyező átlagos R–R-intervallummal és szívfrekvenciával reagál egy adott eseményre, miközben az intervallumok variabilitása szignifikánsan eltér. Időtartományi mutatók tekintetében a két leggyakrabban alkalmazott az R-intervallumok szórása (SDNN) és az egymást követő R-intervallumok különbségeinek négyzetes középértéke (RMSSD). Az SDNN az autonóm szabályozás nagyságrendi számszerű leírását adja, mivel a szimpatikus és a paraszimpatikus jellemzőket is leírja. Ezzel szemben az RMSSD elsősorban a paraszimpatikus aktivitást reprezentálja. Az SDNN-nel ellentétben az RMSSD nem tartalmazza a szívfrekvencia lassú hullámú összetevőit, ennek köszönhetően elenyésző befolyás éri a légzés által keltett mikromozgásokból, ezáltal pontosabb képet ad a paraszimpatikus működésről.⁶ A frekvenciatartományi HRV-mutatók az R–R-intervallumok matematikai transzformációján alapulnak, amelyek lehetőséget adnak a jel egyes frekvenciasávokban történő modulációjának számszerű kifejezésére: ultraalacsony frekvencia (ULF), nagyon alacsony frekvencia (VLF), alacsony frekvencia (LF) és magas frekvencia (HF). Az időtartományi mutatókhoz képest a frekvenciatartományi HRV-mérőszámok részletesebb adatot generálnak a jelek tulajdonságairól, az egyes elemek szerepéről, valamint azok viselkedéssel kapcsolatos kimenetéről. Az LF-teljesítményt mind a szimpatikus, mind a paraszimpatikus idegrendszer befolyásolja, nyugalmi állapotban (például alvás) az LF inkább a vérnyomás-szabályozó mechanizmus (baroreflex) működését mutatja meg, nem pedig a szív szimpatikus viselkedését, ennek okán nem minden esetben alkalmas a teljesítmény és regeneráció értékelésére. A HF-sáv közvetlenül a paraszimpatikus tevékenységet tükrözi, azonban nagyban befolyásolja a légzési ciklus, továbbá a kognitív terhelés (például érzelmi állapot). A mérsékelt vagy csökkenő HF-értékek sok esetben a paraszimpatikus erőforrások apadására, negatív stresszhatásra (például szorongás) vagy nem hatékony erőforrás-felhasználásra utalnak, ami teljesítményromláshoz vezethet.⁷

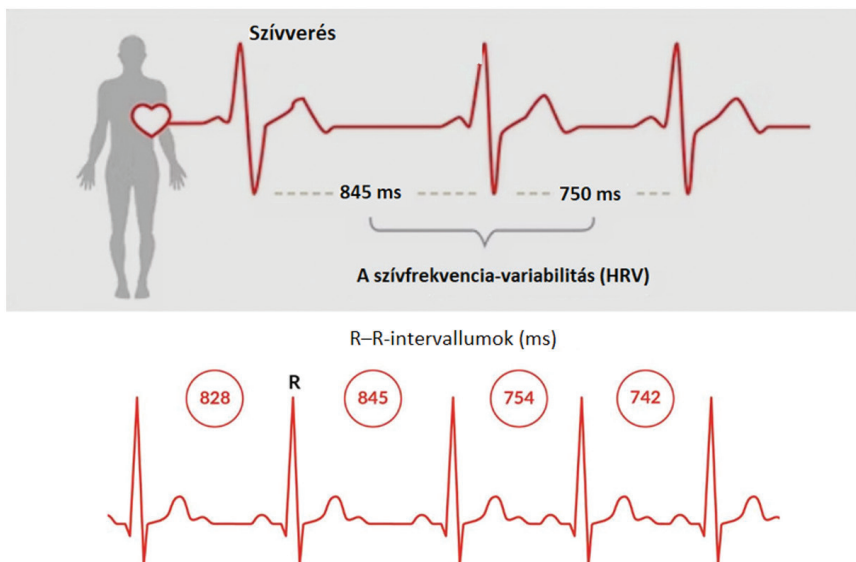
Együttvéve sokféle HRV-mutató létezik, amelyek az idegrendszer eltérő aspektusait reprezentálják, azonban alkalmazhatóságukat minden esetben az adott környezet kontextusában kell értelmezni és értékelni. Az adatok információtartalma számos tényezőtől függ (életkor, nem, fizikai állapot, demográfiai jellemzők), ennek tükrében az eredmények kiértékelései mindig egyéni szubjektív szempontok alapján kell hogy történjenek. Akut stressz, alváshiány, nem megfelelő táplálkozás, mérsékelt fizikai aktivitás vagy tartós pszichikai terhelés esetén (például egy hosszú távú repülésekben érintett repülőgép-vezető esetében) a HRV-értékek csökkenhetnek, ami gyors kifáradáshoz és az immunrendszer legyengüléséhez vezet. Ugyanakkor magasabb

⁵ MAKIVIĆ – DJORDJEVIĆ NIKIĆ – WILLIS 2013.

⁶ DONG 2016.

⁷ SCHERER–MARTINEK–MAYR 2019.

HRV-értékek általában kedvezőbb egészségi állapottal, jobb kardiovaszkuláris fittséggel és nagyobb stressztűrő képességgel társulnak.



1. ábra: A szívfrekvencia-variabilitás szemléltetése

Forrás: DUDER 2025

Mentális egészség és a szívfrekvencia

A légi közlekedésben részt vevő szakemberek körében tendenciaként figyelhető meg, hogy mentális egészségi problémáikat – beleértve a súlyosabb tüneteket, például az öngyilkossági gondolatokat – sok esetben nem jelentik vagy nem kommunikálják megfelelő hatékonysággal.⁸ A szívfrekvencia-variabilitás (HRV) fontos objektív biomarkerként jelenhet meg, amelyet mérhető hatékonysággal lehet alkalmazni a depresszió, a poszttraumás stressz-zavar (PTSD), valamint a differens stresszreakciók vizsgálatában. Ezek mellett a HRV-alapú visszajelzési módszerek egyre nagyobb szerepet tölthetnek be a mentális kihívások felszínre kerülésében és prevenciójában. Megfigyelésen alapuló vizsgálatok során megfigyelték, hogy a PTSD releváns összefüggést jelez mind a magas frekvenciájú (HF-HRV), mind az alacsony frekvenciájú (LF-HRV) komponensek csökkenésével.⁹

A HRV adatai az agyi működés tevékeny indikátoraként is felfoghatók: stressz vagy egyéb kognitív terhelés hatására csökkenés figyelhető meg, ami sok esetben párosul az agyi véráramlás mérséklődésével. Ugyanakkor a magasabb HRV-értékek

⁸ Wu et al. 2016.

⁹ Kim et al. 2018.

effektívebb érzelmszabályozással és jobban alkalmazkodó pszichofiziológiai működéssel azonosíthatók. Kutatások alapján az ismétlődő stresszhatások a vegetatív idegrendszer tartós tompulását és a szimpatikus idegrendszer fokozott tevékenységét eredményezhetik, ami fokozott izgalmi állapot kialakulásához vezet. Ez a megállapítás fontos kiindulási pontot biztosít a trauma és a szorongás neurofiziológiai értelmezéséhez, továbbá a terápiás beavatkozások hatékonyságának tárgyilagos vizsgálatához.¹⁰

HRV-vizsgálatok pilóták körében

A repülési környezetben alapvető a lelki-élettani státuszt befolyásoló tényezők vizsgálata az emberi hibák előfordulásának mérséklése szempontjából. Alacsonyabb HRV-értékek adódnak olyan tényezők fennállása esetén, mint a magas testtömegindex, az előrehaladott életkor vagy a megnövekedett feladat-végrehajtás és az azzal járó komplexitás, míg más környezeti mutatók – például a CO₂-koncentráció – nem mutattak jelentős hatást. A megfigyelések egyúttal azt is megvilágítják, hogy a stressz és a teljesítmény közötti kapcsolat nem szükségszerűen lineáris: bizonyos esetekben az emelkedett stressz-szint a teljesítmény javulásával társulhat.¹¹ Valós repülési körülmények között végzett HRV-mérések során – rövid, egyperces R–R-intervallum-szakaszok elemzésével – kimutatták, hogy bár a szimulált és a valós repülések között számszerű különbségek figyelhetők meg, a HRV-változások dinamikája a repülés különböző fázisaiban hasonló mintázatot mutat. Ez a tendencia független attól, hogy a repülés szimulált környezetben vagy valós körülmények között történik. A hasonló HRV-mintázatok elsősorban a repülés kritikus szakaszaiban, például a felszállás, a megközelítés és a leszállás során voltak megfigyelhetők.¹²

A HRV-mérési architektúrák integrálása a pilótafülkébe és repülőgép fedélzetére lehetőséget nyit a valós idejű monitorozás módszerére. Tapasztalatok és megfigyelések alapján az önbevalláson alapuló módszerek önmagukban korlátozott érvényességgel és megbízhatósággal bírnak, míg a HRV-alapú mérés objektívebb képet biztosít a mentális terhelés intenzitásáról, továbbá prediktív képessége is lehet a hibázások előfordulása tekintetében. Ezenfelül megfigyelték repülőgép-vezetők kiképzése során, hogy amikor analóg kijelzőkről digitális rendszerekre térnek át, csökkenés következik be a HRV-értékben, tehát növekszik a stressz-szintjük. Ezek ismeretében a HRV szignifikáns hozzáadott értéket képviselhet a repülési szimulációs képzések során a teljesítményértékelésben.

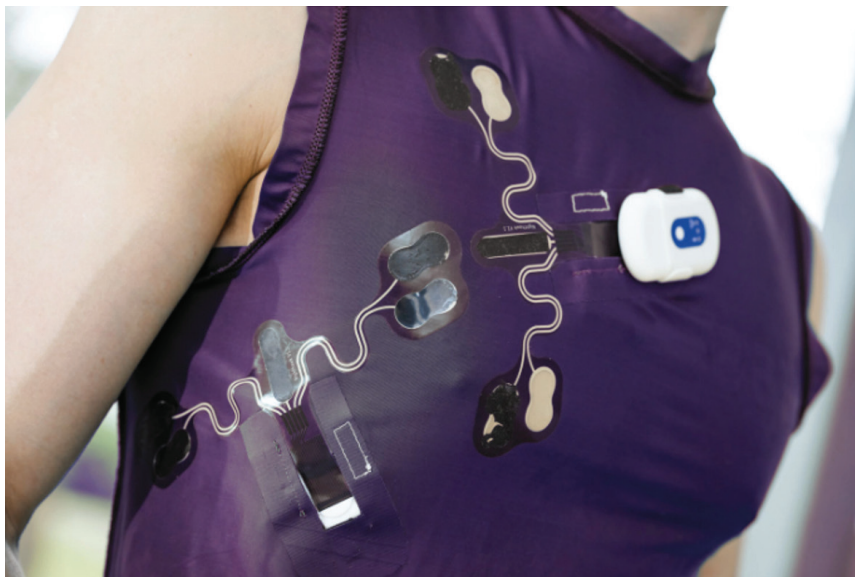
A HRV-adatok elemzése repülések közben lehetőséget biztosít a váratlan eseményekhez kapcsolódó fiziológiai reakciók – például ijedtség – detektálására, amelyek szélsőséges esetben jelentős kognitív korlátoltsághoz vagy döntéshozatali blokkoláshoz vezethetnek. A szimulációs környezetben alkalmazott *biofeedback* technológiák elősegíthetik a repülőszemélyzet felkészítését ezen helyzetek megfelelő kezelésére, továbbá hozzájárulhatnak a stresszhez köthető belső élettani válaszok kontrolljához.

¹⁰ THAYER et al. 2012.

¹¹ PORGES 2022.

¹² CAO et al. 2019.

Természetesen az optimális állapot is kifejezésre kerülhet a szívfrekvencia-variabilitás segítségével, elősegítve a szimpatikus és paraszimpatikus idegrendszer kiegyensúlyozott működésének megértését, így a teljesítmény és a megfelelő regeneráció állapota is egyszerűbben indikálható. A HRV-alapú visszajelzők alkalmazása ígéretes eszköznek bizonyul a mentális ellenálló képesség és a pszichés jóllét elősegítésében. Emellett a HRV lehetségesen integrálható a repülőorvosi vizsgálatokba is mint kiegészítő diagnosztikai és beavatkozást segítő eszköz, amely támogatja az egyénre szabott, életmódalapú megközelítéseket különböző egészségügyi és munkakörnyezeti feltételek mellett.¹³



2. ábra: Ruhába épített szenzor

Forrás: www.2mel.nl/wearable-textile-electronics/

HRV a katonai repülésben

A jövőben az egyénre szabott *biofeedback* rendszerek alkalmazása a katonai repülőképzésben a humán-gép együttműködés modernizálódás fontos elemévé válhat. Ezek a rendszerek hozzájárulhatnak az olyan élettani folyamatok vizsgálatához is, amelyek szerepet játszanak a repülési események kialakulásában. A katonai repülésben alkalmazott élettani monitorozás a jövőben többféle mérési módszert is magában foglalhat. Ide tartozhat például a vér oxigénszintjének mérése, a funkcionális közeli infravörös spektroszkópia (*functional near-infrared spectroscopy*, fNIRS), amely infravörös fény segítségével méri a vér oxigénszintjének változását, és ezáltal a véráramlás növekedésén keresztül valós időben képes követni az agyi aktivitást. Emellett az EEG- és EKG-alapú

¹³ MASJET et al. 2023.

mérések is fontos szerepet kaphatnak a pilóták élettani állapotának monitorozásában. Ugyanakkor ezen technológiák egy részének alkalmazása további kutatásokat igényel, különösen a katonai felszerelésbe és a repülőgép fedélzeti rendszereibe történő integráció szempontjából. A HRV-alapú mutatók alkalmasak lehetnek a kognitív terhelés mérésére szimulált katonai környezetben, valamint képesek különbséget tenni sikeres és sikertelen manőverek között is. Ennek megfelelően a HRV-t egyre szélesebb körben alkalmazzák a mentális terhelés kvantitatív értékelésére repülési szimulációk során, hozzájárulva a pilótanövendékek képzésének biztonságosabbá és hatékonyabbá tételéhez. A HRV-t egyéb más mérési módszerekkel együtt több ország légierőinél már jelenleg is alkalmazzák szimulátorokban a stressz és a kognitív terhelés kimutatására, valamint a regeneráció hatékonyságának értékelésére.¹⁴

Összegzés

A megvizsgált és elemzett terület hangsúlyozza, hogy a szívfrekvencia-variabilitás (HRV) meghatározó a repülési környezetben előforduló kognitív terhelés, stressz és fáradtság objektív mérésében. A korszerű, nagymértékben automatizált pilótafülkékben a hagyományos, szubjektív értékelési metódusok egyre inkább elérik alkalmazhatóságuk határait, ezért szükségessé válik olyan megbízható, valós idejű monitorozási procedúrák alkalmazása, amelyek képesek reális képet adni az operátorok aktuális kognitív és fiziológiai állapotáról. A HRV mint fiziológiai marker lehetőséget biztosít az autonóm idegrendszer működésének leképzésére, ezáltal közvetett módon a kognitív terhelés, a stresszreakciók és a regenerációs folyamatok vizsgálatára és értékelésére. A tárgyalt módszerek és eredmények tényekkel igazolják, hogy a HRV nemcsak a pilótai teljesítmény kondíciójának indikátora, hanem prediktív értékkel is szolgálhat a hibavalószínűség és a kifáradás kialakulásának előrejelzésében. A HRV-alapú egységek integrálása a repülőgépek fedélzeti rendszereibe új lehetőségeket kínál a repülésbiztonság növelésében, továbbá a valós idejű megfigyelés, a *biofeedback* alkalmazása, valamint az egyénre szabott képzési és regenerációs eljárások kidolgozása elősegítik a humán teljesítmény optimalizálását és a kockázati tényezők redukálását. Különösen a katonai repülés területén jelenthet áttörést a szívfrekvencia-variabilitás alkalmazása, ahol a szélsőséges körülmények, a magas fokú terhelés és a fokozott stressz adnak értelmet a pontos élettani monitorozásnak. Ezenfelül a HRV integrálása során figyelembe kell venni az egyénenként változó élettani sajátosságokat, valamint a mérési és értelmezési módszerek standardizálását ezen szempontok alapján kell elvégezni. A jövőbeni kutatások kiemelt feladata a különböző HRV-paraméterek validálása repülési környezetben, valamint ezen mutatók integrálása komplex, multimodális élettani monitorozó rendszerekbe.

Összességében megállapítható, hogy a HRV ígéretes, multidiszciplináris megközelítést képviselő eszköz és rendszer, amely jelentősen hozzájárulhat a repülésbiztonság

¹⁴ SHAW–HARRELL 2023.

szintjének növeléséhez, az emberi tényezők mélyebb megértéséhez, valamint a jövő adaptív, intelligens repülési rendszereinek kialakításához.¹⁵

Felhasznált irodalom

- BRANDELLO FARIAS SOARES, Amanda et al. (2025): Heart Rate Variability in Military Pilots During Flight: A Scoping Review. *Military Medicine*, 190(3–4), e515–e522. Online: <https://doi.org/10.1093/milmed/usae390>
- CAO, Xiaodong et al. (2019): Heart Rate Variability and Performance of Commercial Airline Pilots during Flight Simulations. *International Journal Environmental Research Public Health*, 16(2). Online: <https://doi.org/10.3390/ijerph16020237>
- DONG, Jin-Guo (2016): The Role of Heart Rate Variability in Sports Physiology. *Experimental and Therapeutic Medicine*, 11(5), 1531–1536. Online: <https://doi.org/10.3892/etm.2016.3104>
- DUDER, Kate (2025): Your Guide to Heart Rate Variability Tracking–Prevent Burnout and Support Recovery from Illness. *Inside Matters*, 2025. április 23. Online: www.insidematters.co.nz/post/a-guide-to-heart-rate-variability-tracking-prevent-burnout-and-support-recovery-from-illness
- KIM, Hye-Geum et al. (2018): Stress and Heart Rate Variability: A Meta-Analysis and Review of the Literature. *Psychiatry Investigation*, 15(3), 235–245. Online: <https://doi.org/10.30773/pi.2017.08.17>
- LINDSAY, Karen – VAN DEN TOP, Erik (2025): The Utility of Heart Rate Variability in Aviation and Space Medicine. *Journal of the Australasian Society of Aerospace Medicine*, 14(1), 19–26. Online: <https://doi.org/10.2478/asam-2025-0002>
- MAKIVIĆ, Bojan – DJORDJEVIĆ NIKIĆ, Marina – WILLIS, Monte S. (2013): Heart Rate Variability (HRV) as a Tool for Diagnostic and Monitoring Performance in Sport and Physical Activities. *Journal of Exercise Physiology Online*, 16(3), 103–131. Online: <https://bit.ly/4vA3OK9>
- MANSIKKA, Heikki et al. (2015): Fighter Pilots' Heart Rate, Heart Rate Variation and Performance During Instrument Approaches. *Ergonomics*, 59(10), 1344–1352. Online: <https://doi.org/10.1080/00140139.2015.1136699>
- MASI, Giulia et al. (2023): Stress and Workload Assessment in Aviation. A Narrative Review. *Sensors*, 23(7). Online: <https://doi.org/10.3390/s23073556>
- PORGES, Stephen W. (2022): Heart Rate Variability: A Personal Journey. *Applied Psychophysiology and Biofeedback*, 47(4), 259–271. Online: <https://doi.org/10.1007/s10484-022-09559-x>
- SCHERER, Matthias – MARTINEK, Johannes – MAYR, Winfried (2019): HRV (Heart Rate Variability) as a Non-Invasive Measurement Method for Performance Diagnostics and Training Control. *Current Directions in Biomedical Engineering*, 5(1), 97–100. Online: <https://doi.org/10.1515/CDBME-2019-0025>

¹⁵ LINDSAY – VAN DEN TOP 2025.

- SHAFFER, Fred – GINSBERG, J. P. (2017): An Overview of Heart Rate Variability Metrics and Norms. *Frontiers in Public Health*, 5. Online: <https://doi.org/10.3389/fpubh.2017.00258>
- SHAW, David M. – HARRELL, John W. (2023): Integrating Physiological Monitoring Systems in Military Aviation: A Brief Narrative Review of Its Importance, Opportunities, and Risks. *Ergonomics*, 66(12), 2242–2254. Online: <https://doi.org/10.1080/00140139.2023.2194592>
- THAYER, Julian F. et al. (2012): A Meta-Analysis of Heart Rate Variability and Neuroimaging Studies: Implications for Heart Rate Variability as a Marker of Stress and Health. *Neuroscience & Biobehavioral Reviews*, 36(2), 747–756. Online: <https://doi.org/10.1016/j.neubiorev.2011.11.009>
- WANG, Peizheng – HOUGHTON, Robert – MAJUMDAR, Arnab (2024): Detecting and Predicting Pilot Mental Workload Using Heart Rate Variability: A Systematic Review. *Sensors*, 24(12). Online: <https://doi.org/10.3390/s24123723>
- WU, Alexander C. et al. (2016): Airplane Pilot Mental Health and Suicidal Thoughts: A Cross-Sectional Descriptive Study via Anonymous Web-Based Survey. *Environmental Health*, 15. Online: <https://doi.org/10.1186/s12940-016-0200-6>