

## Az emberi tényezők objektív mérési lehetőségei biztonságkritikus környezetekben: Áttekintés

Kling Fanni<sup>1</sup>, Pethő Enikő<sup>1</sup>  
Papp Gábor<sup>1</sup>, Dr. Rohács Dániel<sup>1,2</sup>

<sup>1</sup> HungaroControl Magyar Légiforgalmi Szolgálat Zrt, Szakmai Fejlesztési Osztály  
([fanni.kling@hungarocontrol.hu](mailto:fanni.kling@hungarocontrol.hu), [eniko.petho@hungarocontrol.hu](mailto:eniko.petho@hungarocontrol.hu), [gabor.papp@hungarocontrol.hu](mailto:gabor.papp@hungarocontrol.hu),  
[daniel.rohacs@hungarocontrol.hu](mailto:daniel.rohacs@hungarocontrol.hu))

<sup>2</sup> Budapesti Műszaki és Gazdaságtudományi Egyetem, Vasúti Járművek, Repülőgépek és Hajók Tanszék  
([drohacs@vrht.bme.hu](mailto:drohacs@vrht.bme.hu))

**Absztrakt:** A cikk fókuszált áttekintést nyújt a biztonságkritikus környezetek szimulációs folyamataiban vizsgált emberi tényezőkről: (i) definiálja a munkaterhelés koncepcióját, (ii) bemutatja kapcsolatát más mentális állapotokkal, (iii) részletesen véleményezi a munkaterhelés és a stressz neurális korrelátumait és (iv) mérési lehetőségeit. A legfrissebb kutatási eredmények alapján mérlegeli az egyes módszerek relevanciáját munkaterhelés mérésére egy speciális, valós idejű szimulációs környezetben, annak érdekében, hogy a validációkban résztvevő személyek munkaterhelése folyamatosan követhető legyen.

### 1 BEVEZETÉS

Az emberi teljesítmény vizsgálata - különösen a komplex, biztonság-kritikus környezetek szimulációiban (pl a légiközlekedésben használt szimulációs validációknál) - kiemelt kutatási téma, ahol a résztvevőknek esetenként magas munkaterheléssel, stresszes vagy váratlan helyzettel kell szembenéznük (Mandrick, Peysakhovich, Rémy, Lepron & Causse, 2016).

A légiközlekedésben ismert "Human Performance Envelope" (HPE) koncepció rávilágít arra, hogy az emberi teljesítmény több, egymással interakcióba lépő tényező eredménye, mint a fáradtság, munkaterhelés, helyzetudatosság, döntéshozás, kommunikáció, csapatmunka és stressz (Edwards, Sharples, Wilson & Kirwan, 2012; Arico, Borghini, Di Flumeri, Bonelli, Golfetti, Graziani, Pozzi, Imbert, Granger & Benhacene, 2017). Bizonyos aspektusok már a szimuláció előtt kifejthetik hatásukat, míg mások a szimulált koncepció körülményeinek hatására (Graziani, Berberian, Kirwan, Le Blaye, Napoletano, Rognin & Silvagni, 2016). Mindazonáltal a munkaterhelés bizonyult eddig az egyik leginkább kutatott területnek, lévén, hogy direkt kapcsolatban áll a HPE-ben megfogalmazott egyéb mentális állapotokkal, és így a teljesítmény degradációjával is (Wickens, 1991; Nocera, Fabrozo, Terenzi & Ferlazzo, 2006).

A cikk a továbbiakban:

- i. áttekinti és definiálja a munkaterhelés koncepcióját;
- ii. bemutatja kapcsolatát más mentális állapotokkal (mint a task load és a stressz);
- iii. részletesen kifejti a munkaterhelés és a stressz alapvető mérési lehetőségeit;

iv. kitekintést nyújt a mérések alkalmazási területeire.

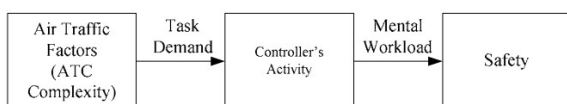
### 2 A MUNKATERHELÉS DEFINÍCIÓJA

A légiközlekedés területén munkaterhelés alatt azt a mentális mind fizikai aktivitást értjük, amely a légi forgalom kezeléséből adódik (Mogford, Guttman, Morrow & Kopardekar, 1995, idézi Edwards, Martin, Bienert & Mercer, 2017). A légiforgalmi irányítók elsődleges feladata az elkülönítés biztosítása a felelősségük alatt álló légtérben (Loft, Sanderson, Neal & Mooji, 2007), ami magában foglalja a konfliktuskutatást – és megoldást. Szintén kiemelten fontos a hatékony munkavégzés, így például az érkező gépek sorba rendezése a gazdasági szempontok figyelembe vételével (Edwards és mtsai, 2017). A feladat karakterisztikájából adódóan az irányító leginkább kognitív igénybevételnek van kitéve (folyamatos kalkuláció), habár a gépek számától és a helyzet típusától függően fizikai igénybevételről is beszélhetünk, pl. gyakori telefonkoordináció a szomszédos szektorokkal, különböző interfészek kezelése (Edwards és mtsai, 2017). Hasonló megállapításra jutott Ellis és Roscoe is, akik pilóták munkaterhelésével kapcsolatban végeztek átfogó tanulmányt (1982); definíciójuk szerint a pilóták munkaterhelése azon mentális és fizikai erőfeszítések együttese, amely a specifikus repülési feladat szubjektív követelményeinek teljesítéséhez szükséges. A cikk elsősorban a szimulációkban is tapasztalt légiforgalmi irányítás aspektusaira fókuszál, ugyanakkor bizonyos helyeken reflektál egyéb biztonság-kritikus foglalkozásokban vizsgált emberi tényezőkre is.

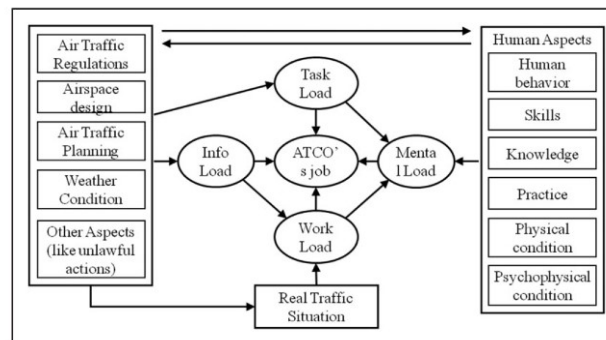
A szimulációk során is megfigyelhető, hogy a munkaterhelést több faktor befolyásolhatja (szektorstruktúra, időjárás), és nem is egyszerű modellezni az állapot komplexitása miatt (Rohács, Rohács & Jankovics, 2016; Zohrevandi, 2016).

Ennél valamivel egyszerűbb a task load, mint konstruktum definiálása és modellezése (Zohrevandi, 2016). Schmidt (1978) azt az elképzelést vettette fel, hogy a megvalósítandó feladat szubjektív nehézsége nagyban korrelál a feladat elvégzéséhez szükséges idővel. Fontos limitációja viszont a task load-nak, mint munkaterhelés magyarázójának, hogy a feladat elvégzéséhez szükséges idő ritkán egyezik meg a rendelkezésre álló idővel (Schmidt, 1978).

A task load és a mentális munkaterhelés közötti fontos különbség Djokic és mtsai (2008) szerint, hogy az irányító hatást fejt ki a dinamikusan változó környezetre, és a munkaterhelés e komplex interakció eredménye (lásd 1. Ábra). Ezen felül az irányítók szimulációkban is különböző (kompenzációs) stratégiák alkalmazásával szabályozhatják a feladat igényeinek alakulását azért, hogy elfogadható szinten tartsák a munkaterhelést és a teljesítményt (Djokic és mtsai, 2008; több információért lásd Edwards, Sharples, Kirwan & Wilson, 2016). Ez a viselkedés magyarázható Kahnemann (1973) modelljével, ami a mentális erőfeszítés mögött a korlátozott feldolgozási kapacitást hangsúlyozza (Wickens, 1992). Amennyiben egy feladat túl sok erőforrást, kapacitást igényelne, az egyén a kontrollstratégia megváltoztatásával képes a feladat követelményeit enyhíteni (pl. a hatékonyság kárára keres egyszerűbb megoldást az elkülönítés biztosítására, lásd Edward és mtsai, 2014). Erre alapozva, Wilson és Eggemeier (1991) megfogalmazása szerint a mentális munkaterhelés az információfeldolgozási kapacitás azon része, amely szükséges a feladat követelményeinek kielégítéséhez (idézi: Borghini, Astolfi, Vecchiato, Mattia & Babiloni, 2012). Nagyon fontos a konstruktum hipotetikus volta, amely az adott feladat követelményeinek, a jelen körülmények karakterisztikáinak, az operator viselkedésének és kognitív képességeinek együttes interakciójából alakul ki (Hart & Staveland, 1988). Így annak a felismerése, hogy a mentális munkaterhelés nem egyenlő a teljesítménnyel, a kutatókat arra ösztönözte, hogy a fennmaradó kognitív kapacitást vizsgálja a feladat végrehajtása alatt (Ellis & Roscoe, 1982; Roscoe & Ellis, 1990; Borghini és mtsai, 2012). Ellis és Roscoe (1982) arról számolt be, hogy a pilóták is egyszerűnek tekintették a munkaterhelés szintjét a fennmaradó kapacitás fogalmával értelmezni. A kapacitáselméletek alapján- amelyek lehetségesnek tartják a figyelemmegosztást (Kahnemann, 1973; idézi Csépe és mtsai, 2007, Wickens, 2008)-, a szabad kapacitás és így a mentális munkaterhelés vizsgálható az ún. kettős feladatok módszerével; azaz, az elsődleges feladat végzésével azt vizsgáljuk, mennyi kapacitása marad a pilótának/irányítónak egy szinten releváns, de másodlagos feladatra (lásd bővebben Ellis & Roscoe, 1990; Rodriguez, Sanchez, Lopez & Canas, 2015).



1. Ábra. Sematikus ábra a feladat követelményei és mentális munkaterhelés kapcsolatáról, Djokic és mtsai (2008) alapján

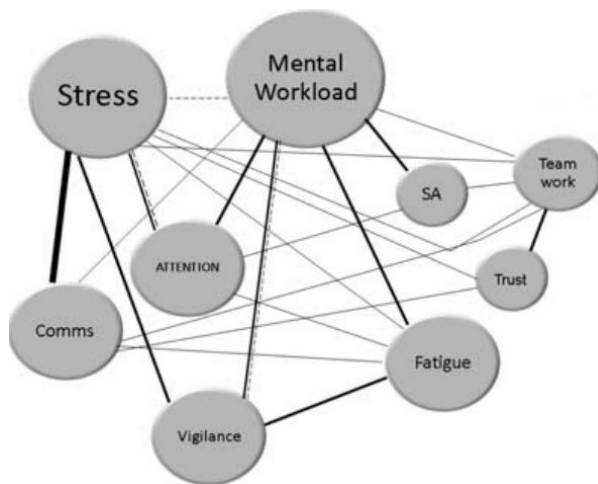


2. Ábra. Sematikus ábra a feladat követelményei és mentális munkaterhelés kapcsolatáról, Rohács és mtsai (2016) alapján

Szintén érdemes elkülöníteni a mentális munkaterhelés fogalmát a stressztől, ami egy fiziológiai válasz a mentális, érzelmi vagy fizikai kihívásokra, amit meghatároz a feladat igényeinek szubjektív megítélése és az operátor fennmaradó kapacitása, hogy a feladat igényeit kielégítse. Fontos, hogy átélt stressz nem csak feladat által kiváltott lehet, hanem magánéleti tényezőkből is adódhat (Edwards és mtsai, 2016).

Több kutatás is rámutatott a magas munkaterhelés és/vagy stressz kártékony hatására a munkamemória és a végrehajtó funkciók tekintetében (Eysenck, Derakshan, Santos & Calvo, 2007; Causse et al., 2011). A végrehajtó funkciók egy olyan képességhalmaz, amely lehetővé teszi, hogy reprezentáljunk egy viselkedéses célt, viselkedéses tervet alakítsunk ki a cél elérése érdekében, ugyanakkor folyamatosan monitorozni tudjuk a környezetet, hogy amennyiben szükséges, flexibilisen változtathassunk a terven (Csépe, Györi, Ragó, 2007). A végrehajtó funkcióknak így szerepe van többek között a szelektív figyelemben (Posner & Petersen, 1990; Petersen & Posner, 2012) a viselkedésszervezésben (Norman & Shallice, 1986) és problémamegoldásban (Simon & Newell, 1972). Ebből is levezethető, hogy a magas munkaterhelés negatívan érintheti konfliktusmonitorozási képességet és hibázás valószínűségeit növeli (Park & Jung, 1996; Reason, 2000; Arico et al, 2017). Továbbá jól ismert, hogy a stressz beszűkíti a figyelmi fókuszot a kognitív megterhelés enyhítése érdekében (Mann & Tan, 1993; idézi Edwards és mtsai, 2012) Edwards és mtsai (2012) felmérést készítettek arról, milyen emberi tényezők együttes megjelenése vezethet a teljesítmény romlásához és a szeparáció sérüléséhez. Irányítók válaszai alapján a 4 legjellemzőbb együttes előfordulása a magas mentális munkaterhelés és a nem megfelelő csapatmunka; a magas mentális munkaterhelés és az alacsony helyzet tudatosság; a magas mentális munkaterhelés és stressz; a magas mentális munkaterhelés és a nem megfelelő kommunikáció párosa; jelezve a mentális munkaterhelés domináns szerepét. Hasonló mintázatot mutatott a kivizsgálók ítélete is. A kutatók ugyanakkor hangsúlyozzák, hogy mivel az irányítók hatékonyan alkalmaznak kompenzációs stratégiákat a magas mentális munkaterheléssel járó helyzetekben, így az egyéb, szintén jelen lévő tényezők inadekvátsága vezethet mégis a

teljesítmény romlásához (Edwards és mtsai, 2012; Edwards és mtsai, 2016).



3. Ábra. Különböző emberi tényezők megjelenési gyakorisága és interakciója a szakirodalomban, Edwards és mtsai (2012) áttekintése alapján. A körök nagysága a gyakoriságra utal, a vonalak a kapcsolatra, de nem jelentenek kauzalitást.

### 3 A MUNKATERHELÉS MÉRÉSI LEHETŐSÉGEI

#### 3.1 Szubjektív mérések

A munkaterhelésre való következtetés többféle mérési módszerrel lehetséges. A leginkább elterjedt mérés szubjektív ítéleteken alapul- ez legtöbbször kérdőíves úton vagy interjú során felvett adatokat jelent. A legismertebb kérdőívek között megtalálható a NASA Task Load Index (Hart, & Staveland, 1988) vagy a Bedford Workload kérdőív (Ellis & Roscoe, 1990), Instantaneous Self Assessment (ISA, Hering & Coatleven, 1996), Assessing the Impact of Automation on Mental Workload (Dehn, 2008). Bár vitathatatlanul hasznos információkkal szolgálnak, a kérdőíves technikának jól ismert korlátai vannak, amelyekre az alkalmazási területek szekcióban a cikk bővebben kitér (Kirwan, Evans, Donohoe, Kilner, Lamoureux, Atkinson, & MacKendrick, 1997; Arico et al., 2017).

A megfigyelés is gyakran alkalmazott módszer. Edwards és mtsai (2016) csoportosították, milyen mutatói vannak a magas munkaterhelésnek, az alulterheltségnek, a stressznek és a helyzet tudatosságnak.

Magas munkaterhelésre jellemző indikátorok az alábbiak:

- Percepció változások, pl. nem hall az végrehajtó irányító, amennyiben társa megszólítja
- Kognitív változások, pl. fókuszált figyelem
- Teljesítmény változás, pl. nem látja a fától az erdőt, nem vesz észre repülőket, elfelejt bizonyos cselekvést végrehajtani
- Látható jelek: izgatóság, közelebb ül a monitorhoz

A stressz esetében Edwards és mtsai (2016) rámutatnak, hogy nem csak distresszről kell beszélni, hanem ugyanúgy jellemző lehet a pozitív hatású stressz is. A negatív hatású stresszt az alábbi indikátorok jelezhetik:

- Látható jelek: izgatóság, remegés, vörös, kipirult arc és nyak, a személy közelebb ül a monitorhoz és előre dől,
- Teljesítmény változás: az egyén lemarad a feladatban, helytelen instrukciókat ad
- Hangbeli változás: gyorsabban, magasabban és hangosabban beszél
- Kognitív változások: Belassult gondolkodás
- Fiziológiai változások: Gyorsuló szívverés, izzadás

Ezek a jelek részben önmegfigyelés alapján tudatosulhatnak, vagy más hívhatja fel rá a figyelmet (Edwards és mtsai, 2016). Amennyiben az indikátorok nem kerülnek tudatosításra, a teljesítmény nagy valószínűséggel romlani fog. Fontos hangsúlyozni, hogy lényeges egyéni különbségek lehetnek a jelek felismerésében és interpretációjában, ami tovább nehezíteni megítélni, mikor ér el az operátor a kapacitás korlátjához (Edwards és mtsai, 2016).

#### 3.2 Teljesítmény alapú mérések

Kahnemann (1971) és a Wickens (2008) által továbbfejlesztett kapacitásmodell alapján a munkaterhelés szintje jól vizsgálható a kettős feladatok módszerével. Amennyiben a személy teljesítménye romlik a másodlagos feladat beiktatásával, azt jelenti, hogy jelentős mentális erőfeszítést igényelt az elsődleges feladat. Ez a típusú munkaterhelést vizsgáló módszer a laboratóriumon kívül nehezen alkalmazható, hiszen megnöveli a hibázás valószínűségét (Rodriguez és mtsai, 2015).

#### 3.3 Objektív, szenzoros mérések

A különböző HPE aspektusok, azon belül is a munkaterhelés és stressz objektív mérésében a különböző szenzorok alkalmazása kezd teret nyerni.

#### Videó-alapú

Az arckifejezés az egyik legegyszerűbben megfigyelhető jel, amely információt szolgáltat az operátorok kognitív és érzelmi állapotáról. Több kutatás foglalkozik az érzelmek felismerésével mind emberi megfigyelések alapján, mind a gépesített szoftveres szinten (Mikó, 2009; Kovács & Várad, 2017; Esposito, Vinciarelli, Vicsi, Pelachoud & Nijholt, 2011) Habár nem csak a kamerás és érzelmfelismerő szoftveres módon vizsgálható az operátorok állapota, mégis fontos hangsúlyt kapnak a nem invazív módon történő vizsgálatok, mivel az arckifejezések nagyon gazdagok az érzelmi tartalmakban. A technika jelenlegi állása elsősorban az Ekman által megfogalmazott alapvető érzelmekre



összpontosít (Friesen & Ekman, 1978), de elhagyja az összetettebb érzelmeket, mint például a frusztrációt.

Emellett sok kereskedelmi algoritmus nem különbözteti meg a valódi érzelmeket a hamis kifejezéseitől, pl. igazi és hamis mosolyt. Ez azt jelenti, hogy az algoritmusok könnyen megtéveszthetők, ha az ember önként szabályozza az arckifejezését, és más érzelmeket mutat, mint amilyenek valójában érzi magát. Ezzel szemben az emberi megfigyelők gyakran képesek megkülönböztetni a valódi és hamis mosolyt, azáltal, hogy figyelmet fordítanak az arckifejezések apró részleteire (időben vagy térben, pl. Mikro-kifejezések), és más jelekkel összhangban figyelik a vizsgált egyént, például testbeszédekkel vagy beszédintonációval.

A legtöbb szoftver jobb az érzelmek felismerésében a videóknál, mint az állóképeknél, mivel a videók képesek az arckifejezés változásait felfogni, amelyek jelzik a semleges kifejezésektől való eltérést. Az arckifejezések az ember kognitív állapotáról, így például munkaterhelésről is adnak információt (Erikson, 2006).

### Hang-alapú

Az emberi beszédelemzés egy másik, nem invazív módszer az operátorok kognitív és érzelmi állapotainak felderítésére, amely a szimuláció során viszonylag egyszerűen rögzíthető.

Azonban annak ellenére, hogy egy emberi hallgató, megfigyelő sok információt kaphat egy másik ember érzelmeiről, ha annak beszédét hallgatja, az algoritmikus észlelés a beszédből általában jóval bonyolultabb, mint az arckifejezések. Ez azért van, mert egyrészt a jel nem mindig áll rendelkezésre (hiszen az emberek nem beszélnek folyamatosan), másrészt az érzelem több csatornán át terjed az emberi beszédben. Az érzelem vagy a stressz nemcsak olyan akusztikai jellemzőkben mérhető, mint az amplitúdó, a frekvencia vagy a fázis (ami hangszínezetre, az intonációra és a ritmusváltozásra hat), hanem a szóválasztásban, és azok kontextusba helyezésében is mérhető (Sztahó, 2013). Ez azt jelenti, hogy az érzelem mind a magas szintű (például a szóválasztás), mind az alacsony szintű (például amplitúdó) jellemzőkben fejeződik ki, és a különböző beszéd állapotok sokat változhatnak abban az értelemben, hogy mennyire használgják a különböző csatornákat.

Kiemelendő, hogy magas a beszélők közötti változékonyság, és a jellemzők többszörös kifejezése megnehezíti, hogy algoritmussal megbízhatóan vizsgáljuk az érzelmeket az operátorok beszédén keresztül. Fontos, hogy nem az érzelem kommunikálása a beszéd elsődleges célja, hanem maga a tartalom átvitele. Ezért a tartalom is bekerül a jelbe, így nehezebb kiszűrni az érzelmeket magától. Ugyanakkor mindez plusz adatnak tekinthető, ezért különféle algoritmusok állnak rendelkezésre ezen a szakterületen és fejleszthetőek tovább. Beszéd vagy annak hiánya, például a beszéd késése (azaz a válaszüti) és a hosszú szünetek, vagy a beszéd sebessége is sokatmondó lehet a vizsgálat számára az operátor kognitív állapotáról.

Hosszú távú megfigyelés során kiderülhet, hogy a beszélő fáradt, beteg, esetleg valamilyen hangképzőszervi elváltozásban szenved. A munkaterhelés szempontjából viszont fontosabb, hogy a neurológiai állapotára is következtethetünk, mivel az ember fiziológiai, neurológiai és pszichológiai állapota hatással van a beszéd fizikai paramétereire (Sztahó & Vicsi 2016). Bizonyos típusú betegségek kialakulásakor a különböző akusztikai, fonetikai paraméterek egyértelműen megváltoznak, eltérnek a normál beszédétől, és ezek a változások mérhetőek. Ezek a megfigyelések szolgálnak alapul az utóbbi években előtérbe kerülő automatikus beszéd-diagnosztizálási lehetőségek kutatásának. A depressziós ember beszéde például fakó, monoton, élettelen, lomha, fémes. A Sztahó és munkatársai (2017) által létrehozott depressziós beszéd-adatbázis segítségével nagy valószínűséggel kimutatható válnak az operátorokon hosszán megfigyelt időszak után a hasonló mentális betegségek.

### Mozgás-alapú

A mozgásalapú impulzusérzékelés előnyei között szerepel, hogy a testtartáshoz és a gesztusokhoz kapcsolódó testmozgások jellemzően kevésbé jól kontrolláltak (Calvo & D'Mello, 2010). Ezen kívül az információforrás kihasználása lehetővé teszi az olyan hatások észlelését, amelyek hosszabbak a fent említett két jelhez képest, illetve, ha az arcvonások és a beszéd felismerése nehéz vagy megbízhatatlan. Az ilyen típusú automatikus érzelmek felismerését azonban kevésbé vizsgálják, mint az arckifejezés detektálását, mivel komplexitás és a minta sokszínűsége jellemzi (Mota & Picard, 2003).

Az izommozgás-alapú mérésekkel kimutathatóak olyan rejtett állapotok, mint a felkészültségi („readiness”) állapot, amelyet nehéz vizualizálni, viszont bizonyított a negatív érzelmekkel való korrelációja (Nakasone és mtsai 2005). Az izmok elektromos aktivitásának elvezetése az elektromiográfia, az elvezetett jel pedig az elektromiogram (EMG, Molnár, 2006).

A vezeték nélküli technológia, az átfogó számítástechnika és a többdimenziós analitika terén elért előrehaladások lehetővé tették a kognitív tevékenység szinte észrevétlen mérését az egyén saját munkakörnyezetében, minden alkalommal, amikor az operátor közreműködik a közös eszközökkel, például számítógéppel, gépkocsival, repülővel, telefonnal.

Munkaeszközökbe integrált mikroérzékelők így lehetőséget nyújtanak az operátor munkaterhelésére való inferenciához (Rohács, Rohács & Jankovics 2014). Az integrált mikroszenzorok segítségével olyan mentális állapotra utaló pszichofiziológiai és teljesítményjellemzők mérhetőek, mint a körülmények változására adott válaszok reakcióideje, az ujjak, tenyér izzadásának mértéke, a pulzusszám, az eszközök használatának mértéke pl. gyorsulásérzékelőkkel (Rohács, Rohács & Jankovics 2016).

Seelye és munkatársai (2015) egérmozgási méréseket végzett, melynek alapja az egérmutató nyíl volt, amely az egér mozgásakor a képernyőn mozgott. Az egérmutató adatfolyam egy adott számítógépes munkamenet számára

egyetlen pozíció- és időadat-pálya volt, amelyet időben egyenlőtlenül vettek fel. Ezen adatok feldolgozására egy algoritmust alkalmaztak az egérmutató adatfolyamának a résztvevő által célzottan végrehajtott egyes mozgások sorozataként való megosztására. Az algoritmus az egérmozgásokat fizikailag észszerű tulajdonságokkal azonosította, és ezeket a mozgásokat arra lehetett használni, hogy becslést készítsen az operátor teljesítményéről. Az objektív egérmozgásminták továbbá szignifikánsan pozitív összefüggést mutattak a szokásos neuropszichológiai tesztekkel a teljes mintában a végrehajtott funkciók, a figyelem, a vizuális-térbeli és a globális kogníció területein (Seelye és mtsai 2015). A kutatási eredmények megerősítik, hogy a kognitív funkciók romlása egyértelműen kimutatható az egérmozgás dinamikájából.

### **Pszichofiziológiai mérések**

A munkaterhelés és stressz mérésében a pszichofiziológiai mérési technikák jelenthetik a várt áttörést, amelyek fokozatos elterjedésében nagy szerepet játszik a növekvő interdiszciplináris szemlélet. A kognitív pszichológia, neuroergonómia, data science vagy szoftverfejlesztés eszköztárának segítségével a jármű- és légiközlekedési kísérletekben és szimulációkban is mérhetővé válhat az operator mentális állapota szemmozgáskövető, elektroencefalográf, szívritmusvariabilitás és bőrellenállásmérő eszközökkel (Arico et al., 2017).

Az idegtudomány vizsgáló eszközei többféleképpen klasszifikálhatóak. A pszichofiziológiai mérések csoportosíthatóak aszerint, hogy központi vagy periférikus (automóm) idegrendszeri aktivitással vannak kapcsolatban (Rowe, Sibert & Irwin, 1998; Borghini és mtsai, 2012; Arico és mtsai, 2017), de tovább is bontható szervek szerint; agyhoz köthető, szívhez vagy szemhez köthető mérésenként (Ryu and Myung, 2005). A továbbiakban áttekintjük azokat a neuropszichológiai indikátorokat és módszereket, melyek korrelátumai lehetnek a vizsgált mentális állapotoknak.

Mentális munkaterhelés tekintetében több kutatás is rámutatott a prefrontális kéreg (PFC) lényeges szerepére a munkamemória feladatok (pl. n-back teszt) végzése során (Owen, McMillan, Laird, Bullmore, 2005; Brouwer, Hogevoort, van Erp, Heffelaar, Zimmerman & Oostenwald, 2012; Mandrick és mtsai, 2016). A stressz negatív hatásaival is mutat korrelátumot a PFC, főként mivel szerepet játszik a kognitív és érzelmi folyamatok integrálásában, és kiterjedt összeköttetései vannak (elsősorban az orbitofrontális és ventromediális PFC-nek) az érzelmi folyamatokért felelős limbikus rendszerrel (Cerqueira, Almeida & Sousa, 2008, Hänsel & Känel, 2008; Arnsten, 2009). A dorzális PFC ugyan indirekten, de szintén kapcsolatban áll az érzelmi folyamatokért felelős amygdalával (az orbitofrontális PFC-vel és anterior-cinguláris kérgen keresztül, Salzman & Fusi, 2010).

A központi idegrendszer mérési lehetőségei között leggyakrabban az elektroencefalográfot (EEG) és a funkcionális közeli infravörös spektroszkópiát (fNIRS)-t

említik az alkalmazott kutatásokban. Az EEG azonban méretében, kiváló idői felbontási képességében és biztonságkritikus környezeti alkalmazhatóságában is felülmúlja az fNIRS-t, ezért a legfrissebb kutatások inkább az EEG-t javasolják a mentális munkaterhelés méréséhez (Derosière, Mandrick, Dray, Ward & Perrey, 2013; Arico és mtsai, 2017). A módszer az agy bioelektromos tevékenységének vizsgálata, és a szinaptikus potenciálok összegződéséeként értelmezhető. Az EEG frekvenciája alapján öt sávra osztható, és a kutatások leginkább ezen frekvenciasávok mentális munkaterhelésre vonatkozó funkcionális jelentőségével foglalkoznak. Ezen belül is a frontális területen a theta tartomány növekedésével és a parietális területeken az alfa tartomány tevékenységének csökkenésével hozzák összefüggésbe (Smith, Gevins, Brown, Karnik & Du, 2001; Lei & Roetting, 2011; Brouwer és mtsai, 2012; Arico, Borghini, Graziani, Taya, Sun, Bezerianos, & Babiloni, 2014; Borghini és mtsai, 2014; Arico és mtsai, 2017). Borghini és munkatársai (2015) ezen frekvenciatartományok hányadosaként egy egy ún. munkaterhelés indexet fejlesztettek ki, ami alkalmas a különböző koncepciók összehasonlítására a kognitív megterhelésre való jelentőségük szempontjából.

Ma már léteznek olyan EEG eszközök, melyek minimális elektróddal rendelkeznek, nem igényelnek hosszú előkészítést, és gyorsan elemezhető, akár valós-időben követhető eredményekkel szolgálnak (Knoll, Wang, Chen, Xu, Ruiz, Epps & Zarjam, 2011; Hou, Liu, Sourina & Mueller-Wittig, 2015; Wang, Gwizdka, & Chaovalitwongse, 2016; Liu, Subramaniam, Sourina, Liew, Krishnan, Konovessis, & Ang, 2017). Ugyanakkor ezen eszközök továbbra is relatíve intruzívak; kényelmetlenek és ezáltal zavaróak lehetnek az elsődleges feladat végrehajtásában, ráadásul a vizsgált személyek folyamatosan a mérés tényének tudatában maradnak.

Az irodalomban szintén jól ismert, hogy a pupilla átmérője fontos pszichofiziológiai marker a figyelemben bekövetkező változásoknál (Unsworth & Robinson, 2016, Beatty & Lucero-Wagoner, 2000). Kahnemann és Beatty (1966) bizonyította, hogy ahogy egyre több elemet kellett megjegyezni egy rövid-távú emlékezeti feladatban, úgy nőtt a pupilla átmérő is. Ezt a jelenséget nevezik feladat által kiváltott pupilláris válasznak (Task Evoked Pupillary Response, Peysakhovich, Causse, Scanella & Dehais, 2015, Klingner, Kumar & Hanrahan, 2008; áttekintésért lásd Beatty, 1982). A válasz kicsi, önkéntelen és a mentális erőfeszítéssel való összefüggése jól dokumentált (Kang, Huffer & Wheatly, 2014; Kahnemann & Beatty, 1966, Kahnemann, 1973, lásd: Beatty, 1982). A fixációk időtartama, pislogások száma és frekvenciája is lehetőséget ad a munkaterhelés mértékére való inferenciához (Tsai, Viirre, Strychacz, Chase & Jung, 2007).

A szemmozgás és pupilla átmérő mérése leggyakrabban szemkamerával történik. Megkülönböztethetünk számítógép alapú („remote”) kamerát, mely a monitor alá helyezhető; és fejre felvehető szemüveget, mellyel mozoghatunk is. Az

előbbi előnye, hogy a vizsgálati személy számára szinte észrevehetetlen marad, hátránya azonban, hogy egy bizonyos távolság után elveszti a jelet, ráadásul nehezen kivitelezhető több monitor/kijelző esetén a mérés. A mobil, hordható szemkamera („head-mounted; glasses”) hasznos ott, ahol a remote kamera már nem alkalmas; több monitor vagy mozgás esetén. Légiforgalmi irányítás szimulációiban, egy-egy koncepció validálásakor több kutatás is alkalmazta a hordozható szemkamerát. Rodriguez és mtsai (2015) pupillometriát használt a mentális munkaterhelés mérésére valós idejű radarszimuláció során. Kiegészítve a szubjektív ítéleteken alapuló ISA módszert- ahol két percenként be kell számolni a szubjektív munkaterhelésről egy gomb megnyomásával-, a kutatók korrelációt mutattak ki a pupillaátmérő és az ISA értékei között. Fontos, hogy bármely típusú szemkamera esetén biztosítani kell a konstans megvilágítást a téves adatok elkerülése érdekében (terem és monitor szinten is). Erre utal Bos, Zon, Füredi, Dudás és Rohács (2017) is, akik a budapesti torony és az új, távoli toronyirányító központ (Remote Tower) működésének humán faktor vonatkozásait vizsgálta szemmozgás alapú mérésekkel, rávilágítva a két környezetben való mérés összehasonlításának nehézségére, amennyiben munkaterhelésre szeretnénk következtetni (pl. pupilla felismerésnél nehézségek a besűrűdő napfény miatt a toronyban, így a pislogási frekvencia elemzése nem volt lehetséges).

Bos és mtsai (2017) ugyanakkor nem csak a szemmozgást vizsgálták, hanem a szívritmusvariabilitást (heart rate variability-HRV) is. A szívritmusvariabilitás (Bernston, Bigger, Eckberg, Grossman, Kaufmann & Malik, 1997; Hercegfői 2011) és a bőrellenállás (Roth, 1983, Hogervorst és mtsai, 2014) ugyanis szintén jól ismert periférikus idegrendszeri korrelátumai a mentális munkaterhelésnek. Emelkedett mentális erőfeszítés együtt jár az autonóm (vegetatív) idegrendszerre jellemző szimpatikus dominanciával és paraszimpatikus aktivitás csökkenéssel (Meijman & Mulder, 1987; De Rivecourt, Kuperus, Post & Mulder, 2008). Szívritmus mérése esetében a szimpatikus aktivitás megemeli a szívritmust és így csökkenti a variabilitást. A HRV méréssel a szimpatikus-paraszimpatikus egyensúly aktuális helyzetét tudjuk mérni; a frekvenciasávokból az alacsony frekvenciakomponens (0.04-0.15) bizonyult relevánsnak a kognitív erőfeszítés vizsgálatánál (Rowe és mtsai, 1998).

Többféle módszerrel mérhető a szívritmusvariabilitás. A mellkaspánt az elektrokardiogram elvén működik, így bár megbízható eredményeket ad, intruzivitása miatt ritkán alkalmazzák szimulációkban, biztonságkritikus környezetben. A legújabb hordható szenzorok („wearables”) alternatívaként a csuklóra helyezhetők, ún. optikai pulzusmérők és elsősorban a sportolók, egészségtudatos személyek számára lettek kifejlesztve (olyan márkákkal, mint Polar, Fitbit, Firstbeat, Apple), de klinikai célokra is kezdenek elterjedni természetes környezetekben (pl. roham detekció). A perifériás pulzust a bőr átvilágításával méri az eszköz. Egy neves kutatás viszont rámutatott, hogy ezen

eszközök kevésbé megbízható adatokat szolgáltatnak, mint a mellkaspántok, így amennyiben a pontosság különösen fontos, érdemes a mellkaspánt mellett maradni (Cadmus-Bertram, Gangnon, Wirkus, Thran-Borowski & Gorzelitz-Liebhauser, 2017).

Az elektrodermális módszer a bőr elektromos ellenállásváltozásának mérésén alapszik. Fokozott érzelmi terhelés hatására nő a tenyéren, kézujjakon a bőr eccrin izzadásgmirigyének az elválasztása, és a bőr ellenállása csökken. Az elektrokardiogrammal szemben az elektrodermális aktivitás segítségével csak a szimpatikus tónus változását regisztrálják, amely előny a munkaterhelés és stressz mérésénél (Roth, 1983; Hugdahl, 1995). Az ingerekre történő fázisos változás az elektrodermális válasz, latenciája viszonylag hosszú (Molnár, 2006).

A bőrellenállásmérő elektródák elsősorban mutató- és középsőujjra helyezhetők, de ismert a lábujjra és a vállra való alkalmazhatósága is (van Dooren & Jansse, 2012). Figyelni kell, hogy ne mozgassuk a mért testrésznket, mert rontja az adatminőséget. Ez különösen fontos aspektus olyan biztonságkritikus környezetben, ahol mindkét kéz folyamatosan elfoglalt. Érdekes, hogy a szívritmusmérőkhöz hasonlóan a bőrellenállás mérésére is kifejlesztettek csuklóra helyezhető pántokat/órákat, amivel az egyén stressz szintjét tudják mérni (Garbarino, Lai, Bender, Picard, & Tognetti, 2014; Kikhia és mtsai, 2016; Greene, Thapliyal & Caban-Holt, 2016).

#### 4 KIHÍVÁSOK

Mentális munkaterhelés tekintetében a feladat nehézségét mutatja, hogy különböző cikkek a fent említett fiziológiai korrelátumok közül más-mást tartanak ígéretesnek (Hogevorst, Brouwer & van Erp, 2014). Míg egyes szerzők a szívritmusvariabilitást tartják a legmegbízhatóbbnak (Hancock, Meshkati & Robertson, 1985), addig mások szerint munkaterhelés esetében perifériás korrelátumok csak a központi idegrendszert mérő módszerekkel hatékonyak (Borghini és mtsai, 2013; Borghini és mtsai, 2014; Ryu & Myung, 2005). Mások arra mutatnak rá, hogy az EEG önmagában is elégséges a mentális munkaterhelés hatékony mérésére (Brookings, Wilson & Wsain, 1996; Taylor, Reinerman-Jones, Cosenzo, & Nicholson, 2010; Christensen, Estep, Wilson & Russel, 2012; idézi Hogevorst és mtsai, 2014).

Egyre több kutatás helyezi előtérbe több szignál felvételét a legpontosabb munkaterhelés mérésre, azzal is érvelve, hogy feltehetően a változók a munkaterhelés más-más aspektusaival állnak összefüggésben (Brouwer és mtsai, 2014; Hogevorst és mtsai, 2014). Ahogy a munkaterhelés bemutatása során a cikk kitért rá, a munkaterhelés magas szintje a kognitív erőfeszítéssel és érzelmi folyamatokkal is kéz a kézben jár, ezáltal különböző szignálokban ezen állapotok megnyilvánulhatnak.

Egy másik nagy kihívás a szenzorok intruzivitása. Az EEG, a pulzusmérő mellkaspánt vagy az ujjakra helyezett bőrellenállásmérő mind-mind zavaró lehet munkavégzés



folyamán. Bár folyamatos fejlesztés alatt állnak a hordozható szenzorok, esetükben a mérés pontossága okozhat nehézséget. A szemmozgáskövető esetében a számítógép alapú, „remote” eszköznek is megvannak a limitációi a laboratóriumi vizsgálatokon kívül. Érdekes új fejlesztési irány ugyanakkor az infravörös képalkotó módszeren alapuló hőkamera, amely a stresszmérésre lehet egy nem invazív alternatíva (Cardone & Merla, 2017). Ez az infravörös termográfia módszer tehát a hőenergia látható képként való megjelenítése, és az idegtudományban a vegetatív idegrendszer pszichofiziológiai markerei esetében az arcbőr hőmérsékletének elemzése miatt releváns (Pavlidis és mtsai, 2013). Viszont Cardone és Meerla (2017) az áttekintő munkájukban megjegyzik, hogy amennyiben az emberi testet vizsgáljuk ilyen módszerrel, fontos, hogy semmilyen befolyásoló vazomotoros anyag (pl. kávé, tea, cigaretta) nem használható a kísérlet napján, mert befolyásolja a bőr hőmérsékleti mintázatát. A mért területen nem lehet hidratálókrém vagy smink, egyenletes fényt és szobahőmérsékletet kell biztosítani, és 15 perces baseline, aklimatizáló periódust kell beiktatni a mérés előtt.

## 5 ALKALMAZÁSI TERÜLETEK

A biztonságkritikus területeken egy új koncepció bevezetése előtt annak validációja, tesztelése kiemelten fontos (Nánai, 2016). A validáció különféle módszerrel történhet a koncepció érettségétől függően, a(z) European Operational Concept Validation Methodology (E-OCVM) ajánlásai alapján (Eurocontrol, 2010). A valós-idejű szimuláció, mint validációs eszköz Hopkins (2017) szerint nélkülözhetetlen, hiszen irányítói bevonás mellett tesztelhető az új eljárás vagy irányítói segédeszköz.

A valós idejű szimulációk lényege, hogy valós szimulációs időben, részletesen, akár a valóságot teljes mértékben reprezentáló irányítói felülettel, és a légiforgalmat valós karakterisztikákkal (pl. pilóta - légiforgalmi irányító párbeszéd, légi jármű repülési jellemzők) szimulálva, légiforgalmi irányító és pilóta bevonása mellett vizsgálható és validálható egy-egy új koncepció. A platform méretétől függően akár 20-30 légiforgalmi irányító egyszerre történő munkavégzése is vizsgálható. A hangkommunikációnak köszönhetően az irányítók egymással és az álpilótákkal is interakcióban állhatnak. Az álpilóták tökéletesen ismerik a légiforgalmi szaknyelvet, az eljárásokat és a pilóta HMI felületet, így még életszerűbbé válhat a szimuláció. Míg a teljes szimuláció hossza projektől függően pár naptól 2 hétig is tarthat, addig egy-egy szimulációs gyakorlat általában 1-2 óráig tart, majd rövid szünet után folytatódik (bővebb áttekintésért lásd Kling, Papp & Rohács, 2018).

A HungaroControl Tudásközpontjában megtalálható CRDS szimulátor alkalmas egyaránt távolkörzet (Area Control Centre- ACC) és közalkörzet (Approach Control Centre - APP) szimulációjára. A CRDS platform 34 irányítói pozícióból (CWP – Controller Working Position) és 27 álpilóta munkahelyből (PWP – Pilot Working Position) áll. Az elmúlt 5 évben különféle témájú validációnak adott otthont a CRDS, úgy, mint a határokon átívelő szabad légtér

koncepció (FAB CE Crossborder Free Route Airspace, South-East Axis Free Route Airspace, lásd 4. Ábra) vagy az irányító és pilóta közötti adatkommunikáció tesztelése (Controller-Pilot Data-Link Communications).



4. Ábra. Valós idejű szimuláció a South-East Axis Free Route Airspace koncepció validálására a HungaroControl CRDS szimulátorán.

Egy új eljárás, légtér módosítás vagy irányítói eszköz fejlesztésének validációjánál az operátor mentális állapotának mérése elengedhetetlen azért, hogy bizonyítsuk (vagy cáfoljuk), az új koncepció a kritikus emberi tényezőkre pozitívan hat- azaz a munkaterhelést csökkenti, és a helyzet tudatosság fenntartható marad. A szimuláció alatt teljesítményre utaló és szubjektív adatok is mérhetők, szakértők megfigyeléseket végezhetnek, majd csoportos interjúkat vehetnek fel, amelyek aztán kiértékelésre kerülnek (Kling, Papp & Rohács, 2017). Ugyanakkor a kérdőíves mérésnek több korlátja van; az egyik komoly limitáció az, hogy azokat a résztvevők a szimuláció után töltik ki, így a folyamatos értékelés szinte lehetetlen a szimulációs munka megszakítása nélkül (lásd ISA módszer). Ez csökkenti annak az esélyét, hogy felismerjünk olyan periódusokat a szimulációban, amikor a résztvevőnek alig maradt szabad kapacitása, és voltak-e vajon pillanatok, amikor az egyén stresszreakciókat mutatott. Továbbá többször is felmerült, hogy a résztvevők nem értették meg pontosan az idegen nyelvű teszteket, amit egy sok résztvevős, sok anyanyelvű szimulációnál különösen nehéz kiküszöbölni. Ezen felül gyakran találkozhatunk olyan résztvevőkkel, akik azt

igyekeznek kommunikálni, hogy a feladat nagyon könnyű volt- ezzel kiugró adatokat produkálva; vagy éppen nem megfelelő komolysággal töltik ki a kérdőívet. Azt sem szabad elfelejteni, hogy maga a szimulációs környezet ténye sokaknál csökkenti az átélt munkaterhelést, így bármilyen változás, még ha emeli is picit papíron a munkaterhelést a szimuláció végén, ismét nem mutatja meg pontosan, hogy mégis voltak-e olyan helyzetek, amikor a résztvevő valóban túl volt terhelve.

Erre jelenthet megoldást az objektív, szemmozgáskövetéses és/vagy pszichofiziológiai alapú mérés integrálása a validációs szimulációkba (Rodriguez és mtsai, 2015; Borghini, Aricò, Di Flumeri, Cartocci, Colosimo, Bonelli & Pozzi, 2017). Célszerű, ha ezek a szenzorok a szimulációs pultra helyezhetőek, vagy beépíthetőek (Rohács, Rohács & Jankovics, 2016). Ahogy az előző fejezetben is kifejtésre került, egyes mérési eljárások, eszközök invazívabbak, mint mások, ugyanakkor a vizsgálat szempontjából releváns adatokkal szolgálhatnak. A szemmozgáskövető észrevehetetlenül tudná mérni a pupillaátmérőt a pultra integrálva; a hang alapú mérés szintén zavartalanul elemezheti a hangmagasságot, beszédgyorsaságot. A szívritmusról és bőrellenásról esetében törekedni érdemes, hogy a szenzorok ne akadályozzák a munkában a résztvevőt, és ne érezze úgy, hogy rá van aggasztva különféle bonyolult eszköz. Folyamatos fejlesztés alatt állnak kevés csatornás EEG készülékek, melyek szimulációban való alkalmazhatósága még vizsgálatok kérdése. Mindenképpen fontos azonban, hogy a szubjektív és objektív mérések között az egyensúly felállításra kerüljön, és együttesen a lehető leginformatívabb képet szolgáltatassák a munkaterhelésről és stresszről egy új koncepció tesztelése folyamán.

## 6 ÖSSZEFOGLALÁS

A cikk részletesen bemutatta az egyik legfontosabb emberi teljesítményt befolyásoló aspektus, a munkaterhelés definícióját, kapcsolatát a task load, physical és mental load, stressz állapotával. Részletesen áttekintette, milyen központi és perifériás idegrendszeri korrelátumai vannak a munkaterhelésnek és a stressznek, és ezeket figyelembe véve milyen eszközökkel valósítható meg az objektív mérésük. Rámutatott továbbá az objektív mérések valós idejű szimulációkba való integrálásnak fontosságára annak érdekében, hogy a szimulációkban résztvevő személyek munkaterhelése és stressz szintje folyamatosan követhető legyen.

Az objektív mérési lehetőségek integrálása lehetőséget biztosíthatna továbbá arra, hogy a HungaroControl továbbra is kiemelkedő nemzeti/nemzetközi szerepkört töltsön be a kutatás-fejlesztési és innovációs tevékenységekben.

## REFERENCES

- Aricò, P., Borghini, G., Graziani, I., Taya, F., Sun, Y., Bezerianos, A., ... & Babiloni, F. (2014, August). Towards a multimodal bioelectrical framework for the online mental workload evaluation. In *Engineering in Medicine and Biology Society (EMBC), 2014 36th Annual International Conference of the IEEE* (pp. 3001-3004). IEEE.
- Aricò, P., Borghini, G., Di Flumeri, G., Bonelli, S., Golfetti, A., Graziani, I., ... & Schaefer, D. (2017). Human factors and neurophysiological metrics in air traffic control: a critical review. *IEEE reviews in biomedical engineering*, 10, 250-263.
- Arnsten, A. F. (2009). Stress signalling pathways that impair prefrontal cortex structure and function. *Nature Reviews Neuroscience*, 10(6), 410.
- Beatty, J. (1982). Task-evoked pupillary responses, processing load, and the structure of processing resources. *Psychological bulletin*, 91(2), 276.
- Beatty, J., & Lucero-Wagoner, B. (2000). The pupillary system. *Handbook of psychophysiology*, 2, 142-162.
- Berntson, G. G., Bigger, J. T., Eckberg, D. L., Grossman, P., Kaufmann, P. G., Malik, M., ... & VAN DER MOLEN, M. W. (1997). Heart rate variability: origins, methods, and interpretive caveats. *Psychophysiology*, 34(6), 623-648.
- Borghini, G., Astolfi, L., Vecchiato, G., Mattia, D., & Babiloni, F. (2014). Measuring neurophysiological signals in aircraft pilots and car drivers for the assessment of mental workload, fatigue and drowsiness. *Neuroscience & Biobehavioral Reviews*, 44, 58-75.
- Borghini, G., Aricò, P., Di Flumeri, G., Salinari, S., Colosimo, A., Bonelli, S., ... & Babiloni, F. (2015, August). Avionic technology testing by using a cognitive neurometric index: a study with professional helicopter pilots. In *Engineering in Medicine and Biology Society (EMBC), 2015 37th Annual International Conference of the IEEE* (pp. 6182-6185). IEEE.
- Borghini, G., Aricò, P., Di Flumeri, G., Cartocci, G., Colosimo, A., Bonelli, S., ... & Pozzi, S. (2017). EEG-based cognitive control behaviour assessment: an ecological study with professional air traffic controllers. *Scientific reports*, 7(1), 547.
- Bos, T., Zon, R., Furedi, E., Dudas, D. & Rohacs, D. (2017). A pilot study into bio-behavioural measurements on air traffic controllers in remote tower operations. H-Workload 2017: The first international symposium on human mental workload, Dublin Institute of Technology, Dublin, Ireland, June 28-30. doi:10.21427/D7ZH02
- Brookings, J. B., Wilson, G. F., & Swain, C. R. (1996). Psychophysiological responses to changes in workload during simulated air traffic control. *Biological psychology*, 42(3), 361-377.
- Brouwer, A. M., Hogervorst, M. A., Van Erp, J. B., Heffelaar, T., Zimmerman, P. H., & Oostenveld, R. (2012). Estimating workload using EEG spectral power



- and ERPs in the n-back task. *Journal of neural engineering*, 9(4), 045008.
- Cadmus-Bertram, L., Gangnon, R., Wirkus, E. J., Thraen-Borowski, K. M., & Gorzelitz-Liebhauser, J. (2017). The accuracy of heart rate monitoring by some wrist-worn activity trackers. *Annals of internal medicine*, 166(8), 610-612.
- Calvo, R. A., & D'Mello, S. (2010). Affect detection: An interdisciplinary review of models, methods, and their applications. *IEEE Transactions on affective computing*, 1(1), 18-37.
- Cardone, D., & Merla, A. (2017). New frontiers for applications of thermal infrared imaging devices: computational psychophysiology in the neurosciences. *Sensors*, 17(5), 1042.
- Causse, M., Dehais, F., & Pastor, J. (2011). Executive functions and pilot characteristics predict flight simulator performance in general aviation pilots. *The International Journal of Aviation Psychology*, 21(3), 217-234.
- Causse, M., Péran, P., Dehais, F., Caravasso, C. F., Zeffiro, T., Sabatini, U., & Pastor, J. (2013). Affective decision making under uncertainty during a plausible aviation task: An fMRI study. *NeuroImage*, 71, 19-29.
- Cerqueira, J. J., Almeida, O. F., & Sousa, N. (2008). The stressed prefrontal cortex. Left? Right!. *Brain, behavior, and immunity*, 22(5), 630-638.
- Christensen, J. C., Estep, J. R., Wilson, G. F., & Russell, C. A. (2012). The effects of day-to-day variability of physiological data on operator functional state classification. *Neuroimage*, 59(1), 57-63.
- Csépe, V., Györi, M., & Ragó, A. (2007). Általános pszichológia 1-3.-2. Tanulás-émlékezés-tudás. *Osiris Kiadó, Budapest*.
- De Rivecourt, M., Kuperus, M. N., Post, W. J., & Mulder, L. J. M. (2008). Cardiovascular and eye activity measures as indices for momentary changes in mental effort during simulated flight. *Ergonomics*, 51(9), 1295-1319.
- Dehn, D. M. (2008). Assessing the impact of automation on the air traffic controller: the SHAPE questionnaires. *Air traffic control quarterly*, 16(2), 127-146.
- Derosière, G., Mandrick, K., Dray, G., Ward, T. E., & Perrey, S. (2013). NIRS-measured prefrontal cortex activity in neuroergonomics: strengths and weaknesses. *Frontiers in human neuroscience*, 7, 583.
- Djokic, J., Lorenz, B., & Fricke, H. (2008). ATC Complexity as workload and safety driver. *convergence*, 7(11), 12.
- Edwards, T., Sharples, S., Wilson, J. R., & Kirwan, B. (2012). Factor interaction influences on human performance in air traffic control: The need for a multifactorial model. *Work*, 41(Supplement 1), 159-166.
- Edwards, T., Sharples, S., Kirwan, B., & Wilson, J. R. (2016). Identifying markers of performance decline in air traffic controllers. *human factors in transportation: social and technological evolution across maritime, road, rail, and aviation domains*, 367.
- Edwards, T., Gabets, C., Mercer, J., & Bienert, N. (2017). Task demand variation in air traffic control: implications for workload, fatigue, and performance. In *Advances in Human Aspects of Transportation* (pp. 91-102). Springer, Cham.
- Erickson, F. (2006). Definition and analysis of data from videotape: Some research procedures and their rationales. *Handbook of complementary methods in education research*, 3, 177-192.
- Esposito, A., Vinciarelli, A., Vicsi, K., Pelachoud, C., & Nijholt, A. (2011). Analysis of verbal and nonverbal communication and enactment. *LECTURE NOTES IN COMPUTER SCIENCE*, 6800, 1-480.
- Eysenck, M. W., Derakshan, N., Santos, R., & Calvo, M. G. (2007). Anxiety and cognitive performance: attentional control theory. *Emotion*, 7(2), 336.
- EUROCONTROL (2010): European Operational Concept Validation Methodology E-OCVM, 3rd Edition
- Friesen, E., & Ekman, P. (1978). Facial action coding system: a technique for the measurement of facial movement. Palo Alto.
- Garbarino, M., Lai, M., Bender, D., Picard, R. W., & Tognetti, S. (2014, November). Empatica E3—A wearable wireless multi-sensor device for real-time computerized biofeedback and data acquisition. In *Wireless Mobile Communication and Healthcare (Mobihealth), 2014 EAI 4th International Conference on* (pp. 39-42). IEEE
- Graziani, I., Berberian, B., Kirwan, B., Le Blaye, P., Napoletano, L., Rognin, L., & Silvagni, S. (2016, September). Development of the human performance envelope concept for cockpit HMI design. In *HCI-Aero 2016 International Conference on Human-Computer Interaction in Aerospace*.
- Greene, S., Thapliyal, H., & Caban-Holt, A. (2016). A survey of affective computing for stress detection: Evaluating technologies in stress detection for better health. *IEEE Consumer Electronics Magazine*, 5(4), 44-56.
- Hancock, P. A., Meshkati, N., & Robertson, M.M. (1985). Physiological Reflections of Mental Workload. *Aviat. Space Environ. Med.* 56, 1110-1114
- Hänsel, A., & von Känel, R. (2008). The ventro-medial prefrontal cortex: a major link between the autonomic nervous system, regulation of emotion, and stress reactivity?. *BioPsychoSocial Medicine*, 2(1), 21.
- Hart, S. G., & Staveland, L. E. (1988). Development of NASA-TLX (Task Load Index): Results of empirical and theoretical research. In *Advances in psychology* (Vol. 52, pp. 139-183). North-Holland.
- Hering, H., & Coatleven, G. (1996). ERGO (Version 2) For instantaneous self assessment of workload in a real-time ATC simulation environment. *EEC Note*, (10/96).
- Hercegfi, K. (2011). Heart rate variability monitoring during human-computer interaction. *Acta Polytechnica Hungarica*, 8(5), 205-224.
- Hilburn, B., & Jorna, P. G. A. M. (2001). Workload and air traffic control. In P. A. Hancock & P. A. Desmond (Eds.), *Human factors in transportation. Stress, workload, and fatigue* (pp. 384-394). Mahwah, NJ, US: Lawrence Erlbaum Associates Publishers

- Hogervorst, M. A., Brouwer, A. M., & Van Erp, J. B. (2014). Combining and comparing EEG, peripheral physiology and eye-related measures for the assessment of mental workload. *Frontiers in neuroscience*, 8, 322.
- Hou, X., Liu, Y., Sourina, O., & Mueller-Wittig, W. (2015, October). CogniMeter: EEG-based emotion, mental workload and stress visual monitoring. In *Cyberworlds (CW), 2015 International Conference on* (pp. 153-160). IEEE.
- Kahneman, D., & Beatty, J. (1966). Pupil diameter and load on memory. *Science*, 154(3756), 1583-1585.
- Kahneman, D. (1973). *Attention and effort* (Vol. 1063). Englewood Cliffs, NJ: Prentice-Hall.
- Kang, O. E., Huffer, K. E., & Wheatley, T. P. (2014). Pupil dilation dynamics track attention to high-level information. *PLoS one*, 9(8), e102463.
- Keinan, G. (1987). Decision making under stress: Scanning of alternatives under controllable and uncontrollable threats. *Journal of personality and social psychology*, 52(3), 639.
- Kikhia, B., Stavropoulos, T. G., Andreadis, S., Karvonen, N., Kompatsiaris, I., Sävenstedt, S., ... & Melander, C. (2016). Utilizing a wristband sensor to measure the stress level for people with dementia. *Sensors*, 16(12), 1989.
- Kirwan, B., Evans, A., Donohoe, L., Kilner, A., Lamoureux, T., Atkinson, T., & MacKendrick, H. (1997, June). Human factors in the ATM system design life cycle. In *FAA/Eurocontrol ATM R&D Seminar, Paris, France* (pp. 16-20).
- Kling, F., Papp, G. & Rohács, D. (2017) Integrating human factors in real-time simulations. *Repüléstudományi Közlemények 2017. 3. szám*, 233-242.
- Kling, F., Papp, G. & Rohács, D. (2018) Szimulációs képességek a HungaroControlban. *Repüléstudományi Közlemények 2018. 2. szám*, 177-188.
- Klingner, J., Kumar, R., & Hanrahan, P. (2008, March). Measuring the task-evoked pupillary response with a remote eye tracker. In *Proceedings of the 2008 symposium on Eye tracking research & applications* (pp. 69-72). ACM.
- Knoll, A., Wang, Y., Chen, F., Xu, J., Ruiz, N., Epps, J., & Zarjam, P. (2011, September). Measuring cognitive workload with low-cost electroencephalograph. In *IFIP Conference on Human-Computer Interaction* (pp. 568-571). Springer, Berlin, Heidelberg.
- Liu, Y., Subramaniam, S. C. H., Sourina, O., Liew, S. H. P., Krishnan, G., Konovessis, D., & Ang, H. E. (2017, September). EEG-based mental workload and stress recognition of crew members in maritime virtual simulator: a case study. In *Cyberworlds (CW), 2017 International Conference on* (pp. 64-71). IEEE.
- Loft, S., Sanderson, P., Neal, A., & Mooij, M. (2007). Modeling and predicting mental workload in en route air traffic control: Critical review and broader implications. *Human Factors*, 49(3), 376-399.
- Mandrick, K., Peysakhovich, V., Rémy, F., Lepron, E., & Causse, M. (2016). Neural and psychophysiological correlates of human performance under stress and high mental workload. *Biological psychology*, 121, 62-73.
- Mann, L., & Tan, C. (1993). The hassled decision maker: The effects of perceived time pressure on information processing in decision making. *Australian Journal of Management*, 18(2), 197-209.
- Meijman, T. F., & Mulder, G. (1998). Psychological aspects of workload. *Handbook of Work and Organizational Psychology. Volume, 2*.
- Mogford, R. H., Guttman, J. A., Morrow, S. L., & Kopardekar, P. (1995). *The Complexity Construct in Air Traffic Control: A Review and Synthesis of the Literature*. CTA INC MCKEE CITY NJ.
- Molnár, M. (2006). A pszichológia biológiai alapjai. *Oláh Attila. Pszichológiai alapismeretek, Bölcsész Konzorcium, Budapest*, 92-99.
- Mota, S., & Picard, R. W. (2003, June). Automated posture analysis for detecting learner's interest level. In *Computer Vision and Pattern Recognition Workshop, 2003. CVPRW'03. Conference on* (Vol. 5, pp. 49-49). IEEE.
- Nakasone, A., Prendinger, H., & Ishizuka, M. (2005, September). Emotion recognition from electromyography and skin conductance. In *Proc. of the 5th International Workshop on Biosignal Interpretation* (pp. 219-222).
- Nanai, K. (2016). How safe is your change? Safety and validation workshop in Budapest. *Aviation Psychology and Applied Human Factors*, 6(1), 46.
- Newell, A., & Simon, H. A. (1972). *Human problem solving* (Vol. 104, No. 9). Englewood Cliffs, NJ: Prentice-Hall.
- Nocera, F. D., Fabrizi, R., Terenzi, M., & Ferlazzo, F. (2006). Procedural errors in air traffic control: Effects of traffic density, expertise, and automation. *Aviation, space, and environmental medicine*, 77(6), 639-643.
- Norman, D. A., & Shallice, T. (1986). Attention to action. In *Consciousness and self-regulation* (pp. 1-18). Springer, Boston, MA.
- Owen, A. M., McMillan, K. M., Laird, A. R., & Bullmore, E. (2005). N-back working memory paradigm: A meta-analysis of normative functional neuroimaging studies. *Human brain mapping*, 25(1), 46-59.
- Park, K. S., & Jung, K. T. (1996). Considering performance shaping factors in situation-specific human error probabilities. *International Journal of Industrial Ergonomics*, 18(4), 325-331.
- Pavlidis, I., Tsiamyrtzis, P., Shastri, D., Wesley, A., Zhou, Y., Lindner, P., ... & Bass, B. (2012). Fast by nature-how stress patterns define human experience and performance in dexterous tasks. *Scientific Reports*, 2, 305.
- Petersen, S. E., & Posner, M. I. (2012). The attention system of the human brain: 20 years after. *Annual review of neuroscience*, 35, 73-89.
- Peysakhovich, V., Causse, M., Scannella, S., & Dehais, F. (2015). Frequency analysis of a task-evoked pupillary response: Luminance-independent measure of mental

- effort. *International Journal of Psychophysiology*, 97(1), 30-37.
- Posner, M. I., & Petersen, S. E. (1990). The attention system of the human brain. *Annual review of neuroscience*, 13(1), 25-42.
- Reason, J. (2000). Human error: models and management. *Bmj*, 320(7237), 768-770.
- Rodríguez, S., Sánchez, L., López, P., & Cañas, J. J. (2015, September). Pupillometry to assess Air Traffic Controller workload through the Mental Workload Model. In *Proceedings of the 5th International Conference on Application and Theory of Automation in Command and Control Systems* (pp. 95-104). ACM.
- Rohács, J., Rohács, D., & Jankovics, I. (2014). Járművezetők szubjektív döntéseinek vizsgálata. „Innováció és fenntartható felszíni közlekedés” IFFK 2015 - Konferencia, 2015. október 15-16 paper 03
- Rohács, J., Rohács, D., & Jankovics, I. (2016). Conceptual development of an advanced air traffic controller workstation based on objective workload monitoring and augmented reality. *Proceedings of the Institution of Mechanical Engineers, Part G: Journal of Aerospace Engineering*, 230(9), 1747-1761.
- Roscoe, A. H., & Ellis, G. A. (1990). *A subjective rating scale for assessing pilot workload in flight: A decade of practical use* (No. RAE-TR-90019). ROYAL AEROSPACE ESTABLISHMENT FARNBOROUGH (UNITED KINGDOM).
- Roth, W. T. (1983). 8 A Comparison of P300 and Skin Conductance Response. In *Advances in Psychology* (Vol. 10, pp. 177-199). North-Holland.
- Rowe, D. W., Sibert, J., & Irwin, D. (1998, January). Heart rate variability: Indicator of user state as an aid to human-computer interaction. In *Proceedings of the SIGCHI conference on Human factors in computing systems* (pp. 480-487). ACM Press/Addison-Wesley Publishing Co..
- Ryu, K., & Myung, R. (2005). Evaluation of mental workload with a combined measure based on physiological indices during a dual task of tracking and mental arithmetic. *International Journal of Industrial Ergonomics*, 35(11), 991-1009.
- Salzman, C. D., & Fusi, S. (2010). Emotion, cognition, and mental state representation in amygdala and prefrontal cortex. *Annual review of neuroscience*, 33, 173-202.
- Seelye, A., Hagler, S., Mattek, N., Howieson, D. B., Wild, K., Dodge, H. H., & Kaye, J. A. (2015). Computer mouse movement patterns: A potential marker of mild cognitive impairment. *Alzheimer's & Dementia: Diagnosis, Assessment & Disease Monitoring*, 1(4), 472-480.
- Smith, M. E., Gevins, A., Brown, H., Karnik, A., & Du, R. (2001). Monitoring task loading with multivariate EEG measures during complex forms of human-computer interaction. *Human Factors*, 43(3), 366-380.
- Sztahó, D. (2013). Automatikus érzelem-felismerés akusztikai paraméterek alapján (PhD értekezés). Letöltve innen: [http://alpha.tmit.bme.hu/speech/docs/phd/disszertacio\\_sztaho.pdf](http://alpha.tmit.bme.hu/speech/docs/phd/disszertacio_sztaho.pdf)
- Sztahó, D., & Vicsi, K. (2016, October). Estimating the severity of Parkinson's disease using voiced ratio and nonlinear parameters. In *International Conference on Statistical Language and Speech Processing* (pp. 96-107). Springer, Cham.
- Sztahó, D., Tulics, M. G., Vicsi, K., & Valálik, I. (2017, September). Automatic estimation of severity of Parkinson's disease based on speech rhythm related features. In *Cognitive Infocommunications (CogInfoCom), 2017 8th IEEE International Conference on* (pp. 000011-000016). IEEE.
- Tsai, Y. F., Viirre, E., Strychacz, C., Chase, B., & Jung, T. P. (2007). Task performance and eye activity: predicting behavior relating to cognitive workload. *Aviation, space, and environmental medicine*, 78(5), B176-B185.
- Unsworth, N., & Robison, M. K. (2016). Pupillary correlates of lapses of sustained attention. *Cognitive, Affective, & Behavioral Neuroscience*, 16(4), 601-615.
- van Dooren, M., & Janssen, J. H. (2012). Emotional sweating across the body: Comparing 16 different skin conductance measurement locations. *Physiology & behavior*, 106(2), 298-304.
- Wang, S., Gwizdka, J., & Chaovalitwongse, W. A. (2016). Using Wireless EEG Signals to Assess Memory Workload in the \$ n \$-Back Task. *IEEE Transactions on Human-Machine Systems*, 46(3), 424-435
- Wickens, C. D. (1991). Processing resources and attention. *Multiple-task performance*, 1991, 3-34.
- Wickens, C. D. (2008). Multiple resources and mental workload. *Human factors*, 50(3), 449-455.
- Wickens, C. D., Hollands, J. G., Banbury, S., & Parasuraman, R. (2015). *Engineering psychology & human performance*. Psychology Press.
- Wilson, G. F., & Eggemeier, F. T. (1991). Psychophysiological assessment of workload in multi-task environments. *Multiple-task performance*, 329360.
- Zohrevandi, E. (2016). Effects of Complexity Factors on Controllers Workload in Stockholm Terminal Area (Dissertation). Retrieved from <http://urn.kb.se/resolve?urn=urn:nbn:se:liu:diva-131154>