

# **A figyelmi feladatok által okozott akut mentális fáradtság pszichofizikai és autonóm idegrendszeri jellemzői**

Doktori (PhD) értekezés

Matuz András



Doktori iskola vezetője: Prof. Dr. Reglódi Dóra

Programvezető: Prof. Dr. Kállai János

Témavezető: Dr. Csathó Árpád

Pécsi Tudományegyetem  
Általános Orvostudományi Kar

2021

## 1. Bevezetés

Az akut mentális fáradtság hosszú ideig tartó, megerőltető szellemi tevékenység eredményként jön létre. Habár a mentális fáradtság (mostantól: fáradtság) egy mindennapi jelenség, melyet sokszor átélünk és “jól ismerünk”, pontos tudományos leírása, illetve meghatározása valójában igen komoly kihívást jelent, amit a témában jelenleg is zajló tudományos viták is hűen tükröznek. Abban mindenesetre egyetértés van, hogy a fáradtság következményei alapvetően negatívak, illetve, hogy komoly egészségügyi implikációi vannak. Mindezt számos statisztika támasztja alá, mint például, hogy a közúti balesetek közel 40%-a tulajdonítható a fáradtságnak (Fletcher, McCulloch, Baulk és Dawson, 2005), vagy hogy a megkérdezett 1366 fiatal orvos közül 42% számolt be fáradtságból eredő hibákról (Gander, Purnell, Garden és Woodward, 2007), ami jelentősen hátráltatja az egészségügyi ellátás sikerességét. Emellett egy tágabb populációt érintő, megközelítőleg 16 ezer fő bevonásával készült longitudinális tanulmány azt is kimutatta, hogy a mindennapi munka által kiváltott fáradtság jelentősen növelheti az inszomnia kialakulásának kockázatát is (Skarpsno, Nilsen, Sand, Hagen és Mork, 2020).

A fáradtságból adódó problémákkal akkor tudunk hatékonyan megküzdeni, ha tisztábban látjuk a jelenség természetét és hatásával kapcsolatban pontosabb predikciókat tudunk megfogalmazni. Ezt azonban jelentősen megnehezíti például az is, hogy a fáradtság egy rendkívül összetett jelenség, különböző megjelenési formákkal, különböző biológiai-, és pszichológiai mechanizmusokkal, amelyek egyének és helyzetek között is igen variábilisak lehetnek (Ackerman, 2011). Ez a komplexitás tehát megköveteli, hogy a jelenség tudományos megismerése is komplex módon, interdiszciplináris szemlélettel történjen. Ennek megfelelően a disszertációban bemutatott vizsgálatokban arra törekedtünk, hogy a fáradtságot különböző kísérletes helyzetekben, mind pszichológiai, mind fiziológiai mérési módszerekkel vizsgáljuk. Emellett kísérletet tettünk arra is, hogy csökkentjük a laboratóriumi eredmények és a gyakorlati hasznosíthatóság közötti távolságot, mégpedig olyan újszerű algoritmusok segítségével, amelyek biológiai szignálok alapján végzett számításokkal lehetővé teszik a fáradtság precíz detektálását és előrejelzését.

## **2. A disszertáció alapját képező vizsgálatok fő célkitűzései**

### 2.1. A mentális fáradtság hatása a vizuálisan vezérelt kurzormozgatók előkészítésére és végrehajtására, fenntartott figyelmi helyzetben

Az első vizsgálat során három kísérletben teszteltük a mozgás két fázisának, az előkészítő és a végrehajtó fázisoknak a fáradtságérzékenységet egy fenntartott figyelmet igénylő ún. rámutató feladatban. A vizuális ingerekre történő rámutatást kurzor mozgásával végezték el a személyek mindhárom kísérletben. A mozgások előkészítő fázisának a célinger és a mozgás elindítása közötti időszakot tekintettük, míg a végrehajtási fázis alatt a mozgás fizikai kivitelezését magába foglaló szakaszt értettük (Elliott, Helsen és Chua, 2001; Woodworth, 1899). Az első két kísérletben csak vizuális ingereket használtunk, és az volt a fő célunk, hogy megtudjuk, a mozgás két fázisa hasonlóan reagál-e a fáradtságra. A harmadik kísérletben auditoros jelzőingereket használtunk annak érdekében, hogy térben vagy időben orientáljuk a személyeket a mozgások előtt, így tesztelhetjük az orientációs képesség és a fázisos-, illetve tónusos éberségi szintek változását is a feladat alatt.

### 2.2. A szívfrekvencia variabilitás által tükrözött autonóm idegrendszeri aktivitás változása hosszantartó feladat alatt

A korábbi tanulmányok eredményei alapján inkonzisztens képet kaphatunk a HRV által tükrözött autonóm idegrendszeri működés változásáról fáradtság alatt: egyesek növekvő szimpatikus és stagnáló paraszimpatikus hatást találtak, míg mások növekvő paraszimpatikus aktivitásról számoltak be a HRV mutatók változásai alapján (Mizuno és mtsai., 2011; Gergelyfi és mtsai., 2015). Ez az inkonzisztencia legalább két forrásból eredhet. Egyrészt a vizsgálatok jelentős százaléka olyan HRV-mutatók (pl. LF, LF/HF arány) alapján vonta le következtetéseit, amelyek fiziológiai forrása nem tisztázott (Billman, 2013). Másrészt kevés tanulmány elemezte a HRV-fáradtság kapcsolatot kétféle (fárasztó és nem fárasztó) helyzetben, egy kontrollcsoport bevonásával. Egy megfelelő kontrollcsoport bevonása pedig segíthetne beazonosítani azokat a HRV-mutatókat, amelyek differenciáltan változnak egy fárasztó és egy kevésbé fárasztó feladat során. Ezzel összhangban a második vizsgálatban a kísérleti személyek egyik csoportja egy osztott figyelmet igénylő, bimodális munkamemória-feladatot végzett kb. 1,5 órán keresztül, míg a kontrollcsoport dokumentumfilmeket nézett. Elsődleges célunk volt annak tesztelése, hogy a HRV és a szívfrekvencia eltérően változik-e a két csoportban a kísérlet során.

### 2.3. A mentális fáradtság hatása a modalitások közötti interferenciára, szelektív figyelmi helyzetben

A modalitás-megfelelőség hipotézis szerint a téri információfeldolgozásban a vizuális modalitás dominál, míg az idői feldolgozásban az auditoros modalitás. Ez a hipotézis többek között Lukas, Philipp és Koch (2014) vizsgálatában is alátámasztást nyert, kimutatva továbbá azt is, hogy egy auditoros-domináns, idődiszkriminációs feladatban az auditoros zavaróingerek jobban interferálnak a vizuális célingerekkel, mint fordítva. Ez azt is jelenti, hogy a szelektív figyelem működésében fontos szerep jut a beérkező információ modalitásának. Vizsgálatunk fő célja az volt, hogy megvizsgáljuk a fáradtság hatásait az egyes modalitásokban nyújtott teljesítményre és a modalitások közötti interferenciára egy szelektív figyelmi helyzetben. A kísérleti személyek egy idődiszkriminációs feladatot végeztek, amely során vizuális és auditoros ingereket is prezentáltunk, azonban minden próbában csak az előzetesen megjelölt modalitásra kellett fókuszálni. Elsődleges célunk volt tesztelni azt az előfeltevésünket, hogy a feladat során a nem-domináns vizuális modalitásban figyelhetünk meg romló teljesítményt. Emellett az is célunk volt, hogy további kísérleti evidenciát találjunk a második vizsgálat autonóm idegrendszeri aktivitással kapcsolatos eredményeire, vagyis, hogy a HRV-vel mért vagus-aktivitás emelkedik a fáradtsággal.

### 2.4. A mentális fáradtság előrejelzése és detektálása HRV adatok alapján, gépi tanulással

A negyedik vizsgálatban a hasonló kutatásokhoz mérten kifejezetten magas elemszám ( $n = 87$ ) mellett végeztünk átfogó elemzéseket, amelyek egy gyakorlati célt szolgáltak: olyan változók, valamint gépi tanulással létrehozott modellek után kutattunk, melyekkel hatékonyan detektálható a fáradtság feladatvégzés közben, vagy amelyekkel már a feladat előtt meg tudjuk becsülni a fáradás valószínűségét. Azokban a korábbi kutatásokban, amelyek gépi tanulással, HRV-adatok alapján próbálták detektálni a fáradtságot kb. 70-80%-os pontosságot értek el (Laurent és mtsai., 2013; Huang és mtsai., 2018). Kisebb módszertani hiányosságok (pl. alacsony elemszám, a fáradtságindukció módjának túlzott specifikussága) miatt azonban az eredmények külső validitása megkérdőjelezhető, tehát az algoritmusok teljesítménye nem feltétlenül általánosítható a tágabb populációra, illetve változatosabb helyzetekre. Így a negyedik vizsgálatban főként az volt a célunk, hogy növeljük a fáradtság HRV-alapú detektálásának validitását és hatékonyságát. Emellett feltáró jelleggel teszteltünk nyugalmi HRV-n alapuló regressziós modelleket is, melyekkel a kognitív feladatok okozta szubjektív fáradtság mértékének előrejelzése volt a célunk.

### **3. A mentális fáradtság hatása a vizuálisan vezérelt kurzormozgatások előkészítésére és végrehajtására, fenntartott figyelmi helyzetben**

#### 3.1. Első kísérlet

##### 3.1.1. Módszertan

###### *Kísérleti személyek*

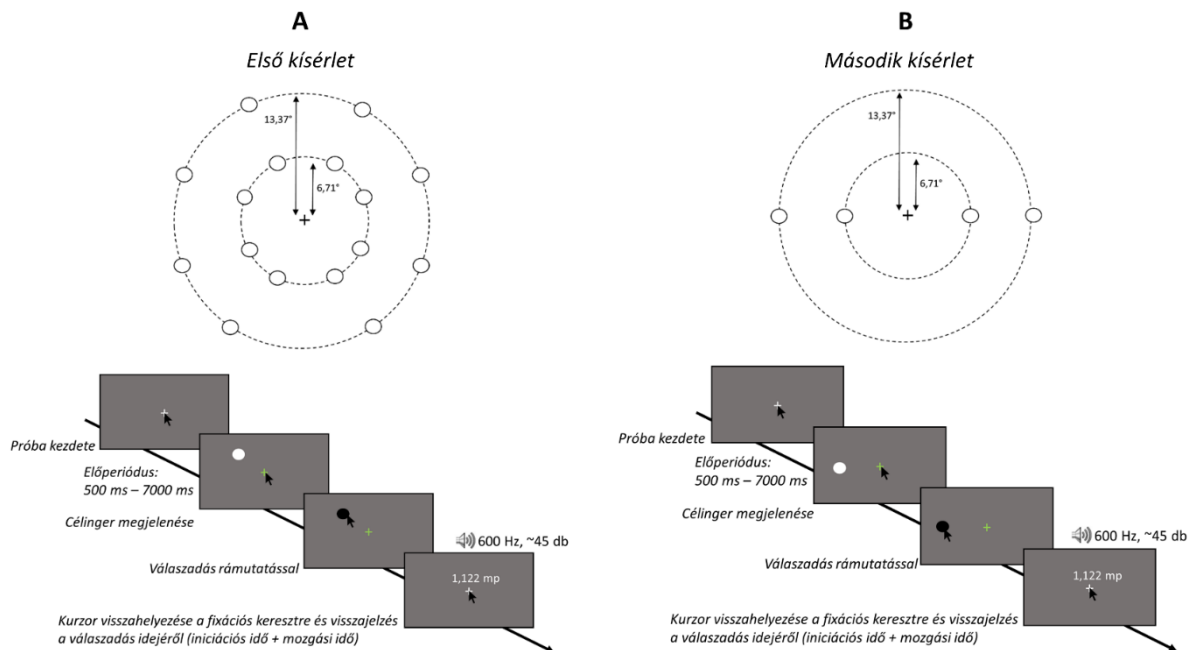
A Pécsi Tudományegyetem 31 hallgatója vett részt a kísérletben önkéntes alapon. Technikai problémák, vagy az instrukciók félreértése (lásd: Adatelemzés) miatt összesen 5 résztvevő adatait nem tudtuk felhasználni, így a végső adatbázis 26 személy adatát tartalmazta (18 nő, 18 és 26 év közöttiek, átlagos életkoruk 19,77 év (SD = 1,58) volt). Minden résztvevő normál egészségügyi állapotról számolt be, továbbá látásuk normál, vagy normálra korrigált volt. Önbeszámoló alapján három résztvevő volt balkezes, de mindhárman úgy nyilatkoztak, hogy általában a jobb kezüket használják a számítógépes eger használatára, ezért megkértük őket, hogy a feladat során is jobb kézzel irányítsák az egeret. A kísérlet előtt a priori elemszámbecslést végeztük a minimálisan szükséges elemszám meghatározása céljából, a Gpower 3.1 program (Faul, Erdfelder, Lang és Buchner, 2007) segítségével. Az elemszámbecslés szerint az általunk tesztelt 26 fős minta minden bizonnyal megfelelő statisztikai erővel rendelkezett, mivel a minimális elemszám 5%-os alfaszint mellett és 90% statisztikai erő eléréséhez pusztán 18 fő volt.

###### *Feladat és ingeranyag*

A kísérlet során egy kurzormozgatáson alapuló rámutatásos feladatot használtunk vizuális ingerekkel. A feladat programozása a PsychoPy 3-mal történt (3.1.5-ös verzió, Peirce, 2007, 2009). Az ingerek prezentációja egy Tobii TX300-as integrált monitoron történt, 1920 x 1080 pixeles felbontás és 60 Hz-es frissítési frekvencia mellett. A kísérleti személyek kb. 60 cm-re ültek a monitortól. A válaszadáshoz szükséges számítógépes egeret jobbkezes használatnak megfelelően helyeztük el, a kurzor érzékenysége pedig az alapértelmezett Windows-beállításnak felelt meg.

A próba-szekvencia grafikus szemléltetését lásd a 2. ábrán. A feladat teljes időtartama alatt egy fehér fixációs kereszt (25 x 25 pixel, vizuális szög: 1,2°) volt látható a képernyő közepén, szürke háttéren. A célinger egy 20 pixel (1,1°) átmérőjű fehér kör volt, amely a 16 lehetséges pozíció egyikén jelent meg. Ezek a potenciális célinger pozíciók két (láthatatlan) koncentrikus körön helyezkedtek el, amelyek origója a fixációs kereszt volt. A kereszthez közelebbi kör átmérője 250 pixel (6,71°), míg a távolabbi kör átmérője 500 pixel (13,37°) volt

(lásd: 1. ábra A része). A kísérleti személyeket arra instruáltuk, hogy mindaddig tartsák tekintetüket, valamint a kurzort a fixációs kereszten, amíg a célinger meg nem jelenik. Ha azonban mégis túl korán mozgatták el a kurzort a keresztről (tehát a célinger megjelenése előtt), akkor a kereszt színe pirosra váltott és a program ideiglenesen gátolta a célinger megjelenését. A célinger megjelenéséig eltelt idő 500-7000 ms között random módon változott (folytonos egyenletes eloszlásból mintavételezve). A személyek feladata az volt, hogy a kurzorral a lehető leggyorsabban és a lehető legrövidebb útvonalat követve érintsék meg a célingert, majd hagyják a kurzort a célingerrel legalább 100 ms-ig. A mozgás közben, az idő mellett a kurzor x és y koordinátáit is rögzítettük. Ha a célinger megérintése sikeres volt, akkor annak színe feketére váltott, jelezve ezzel, hogy a személy már visszahelyezheti a kurzort a fixációs keresztre. Amennyiben ez is megtörtént, egy 250 Hz-es, hangszórókon, 200 ms-ig prezentált hang jelezte a próba végét, amelyet vizuális visszajelzés követett a célinger eléréséhez szükséges időről.



1. ábra. A célingerek pozíciói és a próbák felépítése az első (A) és a második (B) kísérletben.

### Az eljárás menete

A résztvevőket arra kértük, hogy a kísérletet megelőző éjszakán lehetőleg pihentető alvásban legyen részük, valamint hogy a kísérlet napján ne fogyasszanak alkoholt és koffeint tartalmazó termékeket. Miután a személyek megérkeztek a kísérlet helyszínére, tájékoztattuk őket a kísérlet részleteiről és a részvételről írásos beleegyező nyilatkozatot adtak. Ezután ön-bevallásos kérdőív alapján meghatároztuk az alvásmennyiséget, amely átlagosan 7,85 óra (SD = 1,39) volt.

A kísérlet során a résztvevők egy sötétített, hangszigetelt helyiségben foglaltak helyet. A feladat bemutatását követően lehetőségük volt gyakorolni a feladatot. A gyakorlás alatt 20 próbát teljesítettek, majd egy standard 5 pontos kalibráció következett a szemmozgáskövetővel. A fejmozgás okozta műtermékek csökkentése érdekében álltámaszt használtunk. A sikeres kalibráció után a személyek nyilatkoztak aktuális szubjektív fáradtságérzetükről egy 100 mm hosszúságú vizuális analóg skálán (VAS), amelyet a számítógép képernyőjén prezentáltunk. A skála egyik végén az „Egyáltalán nem vagyok fáradt”, míg másik végén a „Nagyon fáradt vagyok” felirat szerepelt. A válaszadást követően azonnal indult a kísérleti feladat, amelyet három blokkra osztottunk. Minden blokkban 56 próba volt, melyek teljesítése kb. 5 percet vett igénybe, így a feladat teljes hossza kb. 15 perc volt. A miénkhez hasonló, rövidebb időtartamú fenntartott figyelmi feladatok korábban megbízható eszköznek bizonyultak a fáradtság előidézésére (Jones és mtsai., 2018; Loh és mtsai., 2004). A blokkokban egyenlő számú célinger jelent meg a közelebbi és a távolabbi körön. Emellett a fixációs keresztet mérten bal, illetve jobb oldali célingerek száma is egyenlő volt. A próbák prezentációja pszeudorandom sorrendben történt. A feladat végén a személyek ismét jelezték szubjektív fáradtságuk szintjét a VAS skálán. Emellett szóban tájékoztunk arról is, hogy a feladatvégzés bármely pontján éreztek-e a személyek fájdalmat a kezükben, vagy bármi módon hátráltatták-e őket fizikai tényezők. Egyikük sem számol be sem fájdalomról, sem fizikai jellegű panaszokról, így a feladat teljesítését valószínűleg nem befolyásolták ilyen jellegű tényezők.

#### *Adatelemzés*

A feladat alatt minden próbában a koordináta-idősorok mellett rögzítettük az első kurzormozgásig eltelt időt is. Spivey és Grosjean (2005) munkáját követve, az elemzés során minden mozgáspálya kiindulópontját a [0,0] koordinátákra (a fixációs kereszt közepére) rögzítettük. A pálya egymást követő x-y koordinátái között kiszámoltuk az euklideszi távolságot és a mozgás sebességét. A mozgáspályákat minden személy minden próbájában vizuálisan is ellenőriztük és szokatlan mozgásmintázat (pl. nagyobb fel-, és lemozgások, vagy a kurzor megcsúszására utaló jelek) esetén az adott próbát töröltük az elemzésből. Az ellenőrzés során egyetlen ilyen próbát azonosítottunk, illetve töröltünk.

A teljesítmény jellemzésére különböző téri és idői mutatókat számoltunk ki. A mozgás-előkészítési szakaszt az iniciációs idővel jellemeztük. Az iniciációs időt a célinger megjelenése és az első kurzormozgás (vagyis, amikor a kurzor legalább 3 mm-t mozdult és elhagyta a fixációs keresztet) között eltelt időként definiáltuk. A mozgás-végrehajtás szakaszának elemzéséhez téri és idői mutatókat is használtunk. Idői mutatók voltak a mozgásidő, amely a

mozgás kezdete és a célinger elérése közötti intervallum, valamint a csúcsebesség, amely a mozgás közben mért legmagasabb sebességet mutatja meg. A mozgásvégrehajtás téri dimenziójának jellemzésére a mozgáshibát használtuk, amely a MacKenzie és mtsai. (2001) által közölt pontossági mutatók egyike. A mozgáshiba az ideális, vagy legrövidebb útvonaltól (az ún. feladattengelytől) való átlagos abszolút eltérést mutatja meg. Végül a mozgásidő és a mozgáshiba arányát (mostantól: MI / MH arány) is elemeztük, amely a gyorsaság és pontosság közötti egyensúlyra reflektál.

A szemmozgásokat a kísérlet teljes időtartama alatt egy Tobii TX300 szemmozgás-monitorozó rendszer segítségével rögzítettük. A mintavételezés frekvenciája 120 Hz volt. Az adatokat exportáltuk, majd egy általunk létrehozott Python-program segítségével elemeztük tovább. A hiányzó adatokat, vagyis azokat az adatpontokat, amelyeknél az eszköz alacsony validitást jelzett (feltehetőleg pislogás, vagy műtermékek miatt), töröltük és lineáris interpolációval helyettesítettük. A validitáshoz hasonlóan a fixációk azonosításában is az eszköz által nyújtott címkéket követtük. Kivontunk minden olyan próbát az elemzésből, amelyben a személy tekintete a célinger prezentációjakor nem a fixációs keresztben volt. Ha egy személynél a próbák több mint 15%-ában nem teljesült az instrukciónak megfelelő centrális fixáció, akkor annak a személynek az adatait kizártuk a további elemzésekből. A szemmozgáskövetővel elemeztük a szakkádok latenciáját és a fixációs instabilitást is. A szakkád-latencia a célinger prezentációja és a célinger irányába induló legelső szakkádikus szemmozgás közt eltelt időt mutatja meg. Kiszámításakor akkor tekintettünk szakkádnak egy szemmozgást, ha a sebessége meghaladta a  $30^\circ/\text{mp}$ -et, gyorsulása a  $8000^\circ/\text{mp}^2$ -et, az általa megtett távolság pedig a  $0,5^\circ$ -ot (Stigchel és mtsai., 2011). Nem végeztünk továbbá statisztikai elemzést, ha a latencia rövidebb volt, mint 80 ms. A fixációs instabilitás a tekintet egyéni belüli variabilitását mutatja meg a feladat azon szakaszaiban, amelyekben a személyeket a fixációs keresztre való fókuszálásra instruáltuk. Meghatározásához a célinger prezentációját megelőző időintervallumban (500-7000 ms) kiszámítottuk a tekintet x-, és y-koordinátáinak szórását, majd átlagoltuk a két szórásértéket (Unsworth, Miller és Robinson, 2019). Mind a szakkád-latenciát, mind a fixációs instabilitást csak azokban a próbákban számoltuk ki, amelyekben a hiányzó adatok aránya nem haladta meg a 33%-ot, valamint teljesült a fixációra vonatkozó instrukció.

A feladattal töltött idő tesztelésére, az egyes teljesítménymutatókat, valamint a szakkádok latenciáját egymástól függetlenül, összetartozó mintás varianciaanalízissel (*ö*mANOVA) elemeztük, amelyben két faktor, a Blokk (a feladat 3 blokkja) és a Távolság (közelebbi és távolabbi kör) hatásait, illetve interakcióját vizsgáltuk. A fixációs instabilitást

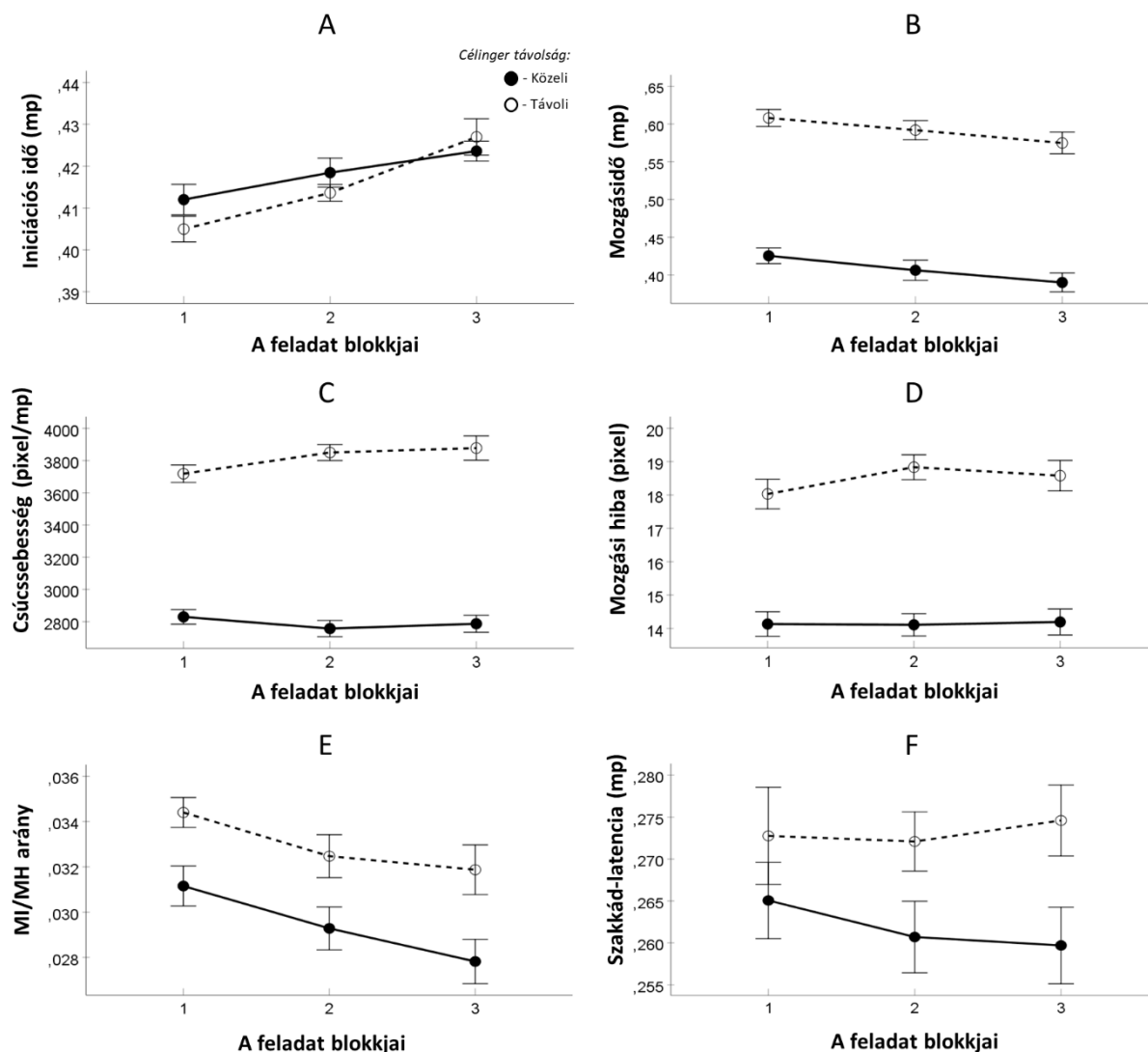


egy-szemponos *öm*ANOVA-val vizsgáltuk, a Blokk főhatással. A szubjektív fáradtságban mutatkozó potenciális változást összetartozó mintás t-próbával elemeztük, a kísérlet előtti és utáni VAS értékek összehasonlításával. A szignifikáns főhatásokat és interakciókat további *öm*ANOVA-kal, vagy összetartozó mintás t-próbákkal elemeztük tovább. A többszörös összehasonlításoknál Bonferroni korrekciót használtunk. Ha a Mauchly teszt alapján nem teljesült a varianciák egyenlősége, a Greenhouse-Geisner- (ha  $\epsilon < 0,75$ ), vagy a Huyn-Feldt (ha  $\epsilon \geq 0,75$ ) korrekcióval módosított p-értékeket vettük figyelembe.

### 3.1.2. Eredmények

A teljesítménymutatók, illetve a szakkádok latenciájának alakulása az idő függvényében a 2. ábrán látható. A szubjektíven megítélt fáradtság szintje szignifikánsan magasabb volt a feladat után, mint azelőtt ( $t(25) = -3,554, p < 0,01$ ), tehát a 15 perc hosszú feladatvégzés sikeresen idézte elő a fáradtság érzetét a személyek értékelései alapján. Az iniciációs idő adatokkal végzett elemzés szignifikáns Blokk főhatást mutatott ( $F(2,50) = 12,87, p < 0,001, \eta_p^2 = 0,34$ ): a mozgások előkészítéséhez szükséges idő a feladattal töltött idővel fokozatosan emelkedett. Első hipotézisünk tehát alátámasztást nyert. Ezzel ellentétben a szakkádok latenciája nem változott a feladattal töltött idővel ( $F(2,50) = 0,12, n.s., \eta_p^2 = 0,01$ ).

A mozgás végrehajtó szakaszára reflektáló változók közül kettő mutatott szignifikáns csökkenést az idővel: a mozgásidő ( $F(2,50) = 5,98, p < 0,01, \eta_p^2 = 0,19$ ), illetve a mozgásidő és a mozgási hiba aránya ( $F(2,50) = 5,28, p < 0,01, \eta_p^2 = 0,07$ ). A mozgások kivitelezése tehát gyorsabbá vált, ugyanakkor a gyorsasággal párhuzamosan nem javult a mozgások precizitása (változatlan mozgási hiba). Végül, a fixációs instabilitás – habár a leíró adatok alapján lineárisan növekvő trendet mutatott – nem változott szignifikánsan a feladattal töltött idővel ( $F(1,25) = 1,21, n.s., \eta_p^2 = 0,05$ ).



2. ábra. A pszichofizikai változók (A-E) és a szakkád-latencia (F) elemzésének eredményei az első kísérletben. A hibásávok az egyénen belüli standard hibát jelölik (Cousineau, 2005).

### 3.2. Második kísérlet

#### 3.2.1. Módszertan

##### *Kísérleti személyek*

A második kísérletben 30 egyetemi hallgató vett részt, önkéntes alapon. Technikai problémák, vagy az instrukciók figyelmen kívül hagyása miatt összesen 5 résztvevő adatait nem tudtuk felhasználni, így a végső adatbázis 25 személy adatát tartalmazta (19 nő, 23 jobbkezes, 18 és 30 év közöttiek, átlagos életkoruk 21,44 (SD = 3,12) volt). Az önbevallás alapján mért alvásidő átlaga 7,92 óra (SD = 0,96) volt.

### *Feladat és ingeranyag*

A kísérleti eljárás és a feladat megegyezett az első kísérletben leírtakkal, kivéve a célingerek potenciális lokációinak számát, amelyet 16-ról 4-re redukáltunk (lásd: 1. ábra B része). Ez a 4 pozíció mind az x-tengelyen helyezkedett el ( $y = 0$ ): kettő a bal és kettő a fixációs kereszt jobb oldalán. Ennek megfelelően a célingerek eléréséhez csak horizontális mozdulatokra volt szükség. Mindkét oldalon 1-1 közeli (távolság = 250 pixel) és távoli (távolság = 500 pixel) pozíciót jelöltünk ki.

#### 3.2.2. Eredmények

Konzisztensen az első kísérlettel, a feladat végére a szubjektív fáradtság szintje szignifikánsan emelkedett a feladat előtti értékeléshez képest ( $t(24) = -4,48, p < 0,001$ ). Szintén konzisztens eredmény, hogy az iniciációs idő a második kísérletben is szignifikánsan növekedett a feladat során ( $F(2,48) = 6,27, p < 0,01, \eta_p^2 = 0,21$ ), míg a szakkád-latencia nem változott szignifikánsan ( $F(2,48) = 2,37, n.s., \eta_p^2 = 0,09$ ). A mozgás-végrehajtás szakaszára vonatkozó elemzések azt mutatták, hogy az MI/MH arány fokozatosan csökkent a feladat alatt ( $F(2,48) = 7,11, p < 0,01, \eta_p^2 = 0,23$ ), ami egyfelől a szignifikánsan növekvő mozgási hibákból ( $F(2,48) = 3,48, p < 0,05, \eta_p^2 = 0,13$ ), másfelől pedig a csökkenő – ugyanakkor nem szignifikáns – trendet mutató mozgásidőből eredhetett ( $F(2,48) = 2,97, p = 0,06, \eta_p^2 = 0,11$ ). Minden összevetve, az eredmények mintázata arra utalhat, hogy a mozgások kivitelezése egyre impulzívabbá vált, így a második hipotézisünk alátámasztást nyert ebben a kísérletben. Végül, a fixációs instabilitás is szignifikánsan növekvő trendet mutatott ( $F(1,24) = 6,90, p < 0,01, \eta_p^2 = 0,22$ ), ami arra utalhat, hogy a fáradtság hatására a személyeknek koncentrációs problémáik voltak.

#### 3.3. Harmadik kísérlet

##### 3.3.1. Módszertan

##### *Kísérleti személyek*

A harmadik kísérletben 27 egyetemi hallgató vett részt, önkéntes alapon. A korábban ismertetett, fixációra vonatkozó kritériumok miatt három személy adatait kizártuk, így a végső adatbázist 24 fő alkotta (18 nő, 21 jobb-kezes, 18 és 30 év közöttiek, átlagos életkoruk 23,92 (SD = 4,66) volt). Önbevallás alapján mért alvásidő átlaga 7,97 óra (SD = 1,18) volt.

##### *Feladat és ingeranyag*

Néhány módosítástól eltekintve, a feladat megegyezett a második kísérletben használt feladattal (4 célinger pozíció). A legfontosabb változtatás az volt, hogy különböző jelzőinger kondíciókat

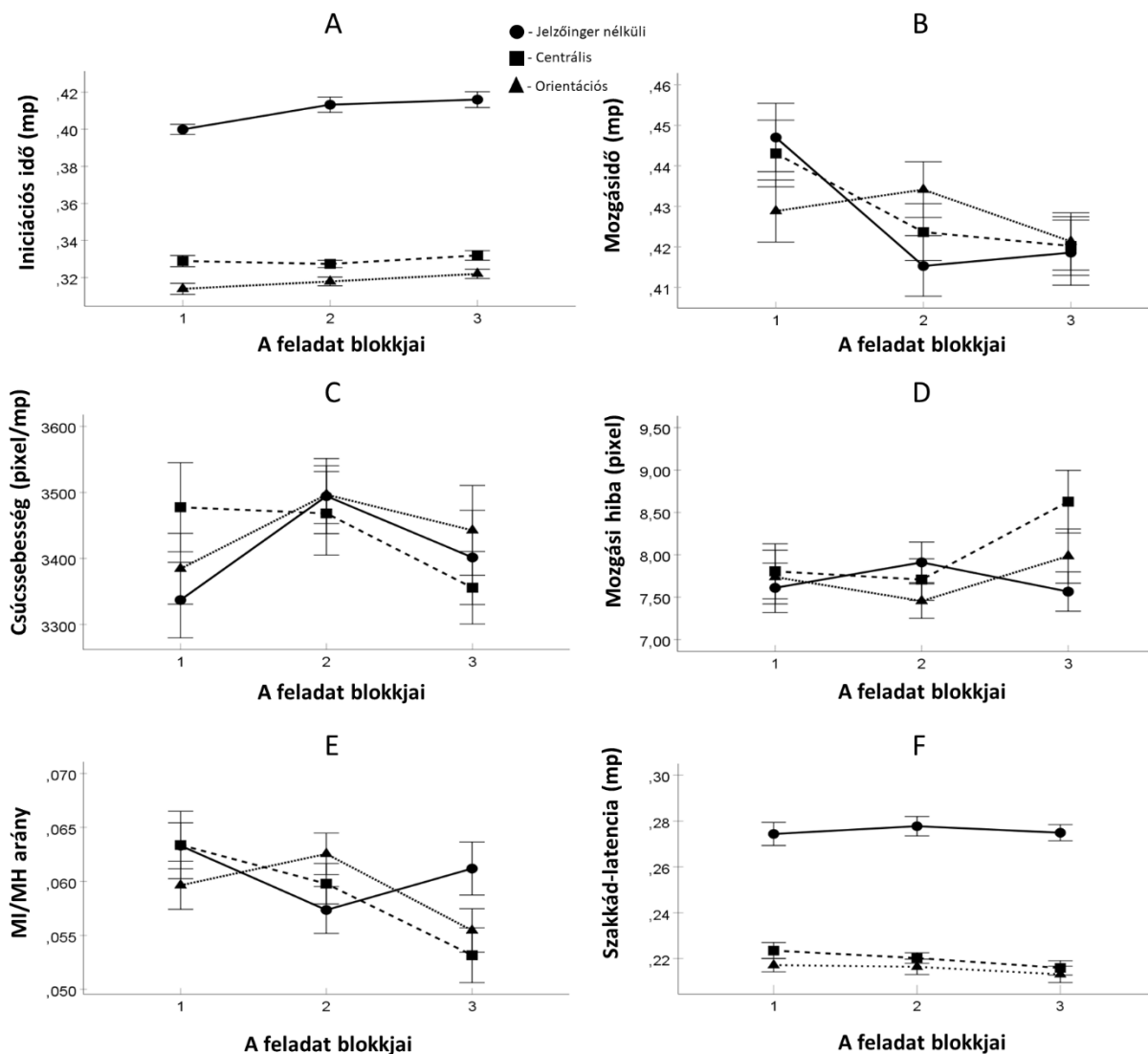
hoztunk létre: Orientációs, Centrális és Jelzőinger nélküli kondíciókat. A jelzőinger egy 250 Hz-es hang volt, amelyet a célinger prezentációja előtt 200 ms-mal, fülhallgatón keresztül játszottunk le 200 ms ideig. Az Orientációs kondícióban a kísérleti személyek vagy a jobb, vagy a bal fülükkel hallották a jelzőingert, amely ezáltal jelezte, hogy a célinger a fixációs kerestől balra, vagy jobbra fog megjelenni. Az orientációs jelzőingerek mindig helyesen tájékoztatták a személyeket a célinger pozíciójáról, azaz nem voltak „invalid” próbák és erről a személyeket is tájékoztattuk. A Centrális kondícióban a személyek mindkét oldalon egyaránt hallhatták a jelzőingert, míg a Jelzőinger nélküli kondícióban egyáltalán nem prezentáltunk jelzőingert. Annak érdekében, hogy elkerüljük a hangingerek interferenciáját, ebben a kísérletben töröltük a próbák végét jelző hangingert. Mivel a három új kondíció miatt a vizsgált faktorok száma is nőtt, az egy blokkon belüli próbák számát 56-ról 72-re emeltük.

### *Adatelemzés*

Az adatelemzés megegyezett az első és második kísérlettel, kivéve, hogy a Blokk és Távolság faktorok mellett a Jelzőinger faktort (3 szint: Orientációs, Centrális és Jelzőinger nélküli kondíció) is vizsgáltuk az *ö*mANOVA-val.

### 3.3.2. Eredmények

Hasonlóan az első két kísérlethez, a feladat teljesítése során a résztvevők által jelzett szubjektív fáradtság szintje szignifikánsan emelkedett a feladat előttihez képest ( $t(23) = -3,42, p < 0,01$ ). Ebből arra következtethetünk, hogy a jelzőingerek bevonása után is megmaradt a feladat fárasztó jellege. Az iniciációs idő elemzésekor szignifikáns Blokk főhatást találtunk ( $F(2,46) = 4,27, p < 0,05, \eta^2 = 0,16$ ), ami a leíró statisztika alapján a lineárisan lassuló trendből eredhetett (lásd: 3. ábra), azonban a páros összehasonlítások nem mutattak szignifikáns különbséget a kísérlet egyes blokkjai között. A szignifikáns Jelzőinger főhatás alapján az egyes kondíciókban eltérő volt a mozgások kezdeményezéséhez szükséges idő ( $F(2,46) = 575,93, p < 0,001, \eta^2 = 0,96$ ). Az Orientációs kondícióban szignifikánsan rövidebb volt az iniciációs idő a másik két kondícióhoz képest, ami arra utalhat, hogy az orientációs jelzőingerek sikeresen irányították a kísérleti személyek figyelmét a célingerek pozíciója felé. Szignifikáns különbséget találtunk továbbá a Centrális és a Jelzőinger nélküli kondíciók között is, ami azt jelentheti, hogy általánosságban egy auditoros jelzőinger hatására a személyek éberebbé válnak, aminek következtében gyorsabban kezdeményezik a szükséges kézmozdulatot.



3. ábra. A pszichofizikai változók (A-E) és a szakkád-latencia (F) elemzésének eredményei a harmadik kísérletben. A hibásávok az egyénen belüli standard hibát jelölik (Cousineau, 2005).

A kérdésfeltevésünk szempontjából legfontosabb eredmény, hogy az iniciációs idő elemzése szignifikáns Blokk x Jelzőinger interakciót hozott ( $F(2,46) = 2,84, p < 0,05, \eta_p^2 = 0,11$ ). A további elemzések szignifikáns Blokk főhatást mutattak a Jelzőinger nélküli kondícióban ( $F(2,46) = 5,71; p < 0,05; \eta_p^2 = 0,20$ ), aminek a forrása az lehetett, hogy az első blokkhoz képest a harmadik blokkban szignifikánsan hosszabb volt az iniciációs idő ( $t(23) = -2,93; p < 0,05$ ). Ezzel szemben sem az Orientációs ( $F(2,46) = 2,32; n.s.; \eta_p^2 = 0,09$ ), sem a Centrális ( $F(2,46) = 0,85; n.s.; \eta_p^2 = 0,04$ ) jelzőinger kondícióban nem találtunk szignifikáns Blokk főhatást. Az iniciációs idő mellett a szakkád-latencia elemzése is szignifikáns Jelzőinger főhatást hozott ( $F(2,46) = 210,03, p < 0,001, \eta_p^2 = 0,90$ ), ami abból eredhetett, hogy a szakkádikus szemmozgások kezdeményezése gyorsabb volt az Orientációs és Centrális

kondíciókban, mint a Jelzőinger nélküli kondícióban. A nem-szignifikáns Blokk x Jelzőinger interakció ( $F(2,46) = 0,83$ , n.s.,  $\eta_p^2 = 0,04$ ) alapján arra következtethetünk, hogy a jelzőingerek előnye a feladat során végig fennmaradt. Mindez arra utal, hogy az éberségi és az orientációs figyelmi rendszerek működése fáradt állapotban sem romlott. A Jelzőinger nélküli kondícióban megfigyelt lassulás a mozgások inicializálásában ugyanakkor alátámasztja az előzetes feltevéseinket, illetve megerősíti az előző két kísérlet eredményeit is.

A mozgás-végrehajtási fázist jellemző MI/MH arányban szignifikáns Blokk x Jelzőinger interakciót találtunk ( $F(2,46) = 3,22$ ,  $p < 0,05$ ,  $\eta_p^2 = 0,12$ ), aminek két forrása lehetett. Egyfelől a MI/MH arány marginálisan szignifikáns csökkenést mutatott a Centrális kondícióban ( $F(2,46) = 3,38$ ;  $p = 0,056$ ;  $\eta_p^2 = 0,13$ ), ellentétben a másik két kondícióval (Orientációs:  $F(2,46) = 2,84$ ;  $p = 0,07$ ;  $\eta_p^2 = 0,11$ ; Jelzőinger nélküli:  $F(2,46) = 1,72$ ;  $p = 0,19$ ;  $\eta_p^2 = 0,07$ ). Másfelől, szemben az első két blokkal, szignifikáns Jelzőinger főhatást találtunk a harmadik blokkban ( $F(2,46) = 4,98$ ;  $p < 0,05$ ;  $\eta_p^2 = 0,18$ ), ami abból eredt, hogy a Centrális kondícióban alacsonyabb volt az MI/MH arány, mint a Jelzőinger nélküli kondícióban ( $t(23) = 2,62$ ,  $p < 0,05$ ). A Centrális jelzőinger negatív hatását a mozgási hiba elemzése is alátámasztotta. A szignifikáns Blokk x Jelzőinger interakció ( $F(2,46) = 2,47$ ,  $p < 0,05$ ,  $\eta_p^2 = 0,10$ ) további elemzése azt mutatta, hogy a harmadik blokkban a mozgási hiba jelentősen nagyobb volt egy centrális jelzőingert követően a jelzőinger nélküli kondícióhoz képest. Ezek az eredmények tehát arra utalnak, hogy a centrális jelzőinger hatására a személyek gyorsabban kezdeményeztek mozgást, azok azonban pontatlanabbá váltak a feladat utolsó blokkjában, amikor a személyek már feltehetően fáradtak voltak.

### 3.4. Megvitatás

Három kísérletben találtunk empirikus bizonyítékot arra, hogy a mozgások előkészítése és kivitelezése is megváltozik a feladattal töltött idővel. Mindhárom kísérletben kimutattuk, hogy a rámutató mozgások elindításához szükséges idő növekszik a fáradtság hatására, amivel alátámasztottuk az első hipotézisünket. A mozgáskivitelezési szakaszra vonatkozó hipotézisünk is részben beigazolódott, mivel a feladattal töltött idővel a mozgások gyorsabbá, ugyanakkor pontatlanabbá is váltak, azonban ez a mintázat nem bizonyult konzisztensnek a kísérletek között. Az eredményeinket a tónusos éberségi szint csökkenéséből adódó redukált kognitív kontrollfolyamatokkal magyarázhatjuk. Ezt az interpretációt erősíti az is, hogy az alternatív magyarázatokat, mint a fázisos éberségi szint csökkenését vagy a figyelmi orientáció zavarát nem támogatják a kísérletes adataink. Pontosabban fogalmazva, a harmadik kísérletben a Centrális kondíció és a Jelzőinger nélküli kondíció összehasonlításával vizsgálni tudtuk a

fázisos éberséget, azonban azt találtuk, hogy a Centrális kondíció előnye a feladat teljes időtartama alatt megmaradt, ami a fázisos éberségi szint érintetlenségére utal. Hasonlóan, az Orientációs kondíció és a Centrális kondíció összehasonlításával reflektálhattunk az orientációs figyelmi képességekre, azonban az Orientációs kondíció előnye szintúgy végig megmaradt a feladat alatt, ami intakt figyelmi orientációra utal. Ezzel összhangban a szakkád-latencia elemzése is azt mutatta, hogy a figyelem téri orientációja egyik kísérletben sem vált lassabbá a feladat alatt. Végül, a második kísérletben a módszertani változtatások ellenére is megismételtük az első kísérlet mozgáskezdeményezésre vonatkozó eredményét, tehát a mozgáskezdeményezés lassulását figyelhettük meg annak ellenére, hogy a kísérleti személyek egy kisebb területre fókuszáltak a figyelmüket, azaz a figyelmi orientációs képességek kevésbé voltak leterhelve.

#### **4. A szívfrekvencia variabilitás által tükrözött autonóm idegrendszeri aktivitás változása hosszantartó feladat alatt**

##### 4.1. Módszertan

###### *Kísérleti személyek*

A vizsgálatban 44 egészséges fiatal személy vett részt, akiket véletlenszerűen két, egyenlő létszámú csoportba soroltunk. Technikai problémák miatt három fő adatait kizártuk, így végül a Gatekeeper csoportot 20 fő (11 nő, 9 férfi, életkori átlag: 21,2 év, szórás: 2,21 év), míg a Dokumentumfilm csoportot 21 fő (11 nő, 10 férfi; életkori átlag: 22,5 év, szórás: 3,9 év) alkotta. A két csoport nem különbözött egymástól szignifikánsan a nemi eloszlás ( $\chi^2 = 0,22$ ,  $p = 0,64$ ), illetve az életkor ( $t(39) = -1,33$ ,  $p = 0,19$ ) tekintetében. Önbevallás alapján a kísérleti személyek nem szenvedtek semmilyen neurológiai betegségben, továbbá látásuk jó, vagy jóra korrigált volt. A kísérletet megelőzően elemszámbecslést végeztünk, amely során a mi kísérleti elrendezésünkhöz legközelebb álló, szintén HRV-t vizsgáló korábbi tanulmányok (pl. Hidalgo-Muñoz és mtsai. 2018; Delliaux és mtsai., 2019; Gergelyfi és mtsai., 2015) által közölt legalacsonyabb hatáserősséggel számolva megállapítottuk, hogy csoportonként legalább 18 fő szükséges ahhoz, hogy a statisztikai erő legalább 90% legyen, 5%-os alfaszint mellett. A minimálisan szükséges 18-18 fős mintanagyságot mindkét csoport meghaladta, tehát az elemszám elegendőnek bizonyult a hipotéziseink megfelelő vizsgálatához.

###### *Gatekeeper feladat és dokumentumfilm nézés*

A Gatekeeper csoportban a bevezetőben már említett feladat módosított változatát végezték a személyek. Heathcote és mtsai. (2014, 2015) a Gatekeeper nevet adták a feladatnak, amely annak sajátos instrukciójára utal: a kísérleti személyek egy biztonsági őr tipikus feladatát látják el, akinek arról kell döntenie, hogy beengedi vagy feltartóztatja a potenciális vendégeket. A beengedés feltétele a megfelelő ajtó, illetve jelszó kiválasztása. Ennek megfelelően a feladatban vizuális ingerként három, egymás mellett elhelyezett ajtót mutattunk be a kísérleti személyeknek 1500 ms-ig, amelyek közül egyet piros színnel jelöltünk meg. Ezzel párhuzamosan auditoros ingerként (jelszó) három magánhangzó („A”, „E”, vagy „P”) közül hallhattak a kísérleti személyek egyet, 500 ms ideig. A vizuális ingerek esetében az ajtó lokalizációját (bal szélső, középső vagy jobb szélső), az auditoros ingerek esetében pedig az aktuális magánhangzót kellett megjegyezni. A személyek - a megfelelő gomb megnyomásával - kizárólag akkor engedhettek be egy vendéget, ha sem az aktuálisan prezentált vizuális inger, sem az auditoros inger *nem egyezett meg* a kettővel korábbi próbában bemutatott ingerekkel.



Ha azonban bármelyik inger megegyezett a kettővel korábbival, a kísérleti személynek egy másik gomb lenyomásával kellett feltartóztatni a potenciális vendéget. Ezzel összhangban négy kondíció jött létre a próbák közötti egyezés mértéke alapján. A Dupla-célinger kondícióban mindkét modalításban prezentált inger megegyezett a kettővel korábbival, a Kizárólag-auditoros és Kizárólag-vizuális kondíciókban csak az egyik modalításban történt egyezés, míg a Nincs-célinger kondícióban egyik inger sem volt azonos. A válaszadásra 2500 ms állt rendelkezésre, melyet egy szintén 2500 ms-os próbák közötti intervallum követett.

A Dokumentumfilm csoport tagjai a Gatekeeper feladat helyett három, egyenként kb. 30 perc hosszúságú dokumentumfilmet tekintettek meg, szünet nélkül: Bolygónk, a Föld – Síkvidékek (2007); A NASA legnagyobb pillanatai – Az űrrakéta (2008); és Óceán oázis (2000). A filmek kiválasztása Takács és mtsai. (2019) tanulmánya alapján történt, ahol a dokumentumfilm-nézés megfelelő kontrollnak bizonyult a fáradtság indukciója mellett. A sorozathatást elkerülendő, a filmek lejátszási sorrendjét személyenként változtattuk.

#### *Szubjektív fáradtságot és kognitív terhelést mérő eszközök*

Az első vizsgálathoz hasonlóan, a szubjektív fáradtságot egy 100 mm hosszúságú VAS-án mértük. Emellett, az észlelt kognitív terhelés mértékének méréséhez a NASA Task Load Inventory-t (NASATLX; Hart és Staveland, 1988) használtuk, amely a terhelés hat különböző aspektusát vizsgálja: mentális terhelés, fizikai terhelés, időbeli terhelés, teljesítmény, erőfeszítés, frusztráció. A válaszadás önbevallás alapján, 21-fokú skálákon történik.

#### *Szívfrekvencia-variabilitás*

A kísérlet alatt EKG segítségével vizsgáltuk a kísérleti személyek autonóm idegrendszeri működését. Az EKG jelek digitalizálását egy CED 1401 Micro II. (CED, Cambridge, UK) típusú analóg-digitális konverter végezte 1 kHz mintavételezési frekvenciával, 16-bit mélységben, 50 Hz-es lyukszűrővel. Az adatsorok rögzítésére, műtermékek kiszűrésére és az RR-intervallumok detekciójára a Spike2 szoftvert használtuk. A kinyert RR-intervallumokat a Kubios HRV (verzió: 2.0; Tarvainen és mtsai., 2014) szoftverben elemeztük tovább. Azokat a műtermékeket, amelyeket korábban nem tudtunk kiszűrni, a szoftverben beépített “nagyon alacsony” műtermék-korrekciónak segítségével korrigáltuk, tehát a műterméknek tekintett RR-intervallumokat töröltük és harmadfokú spline interpolációval helyettesítettük.

A HRV jellemzéséhez az időtartomány analízisből származtatott mutatók közül a szívfrekvenciával, az RMSSD-vel és a pNN50-nel végeztünk statisztikai elemzéseket. A frekvencia tartományból öt mutatót, az alacsony- (0,04–0,15 Hz közötti spektrum; LF), és magas (0,15–0,40 Hz közötti spektrum; HF) frekvenciák energiáját, azok logaritmizált értékeit

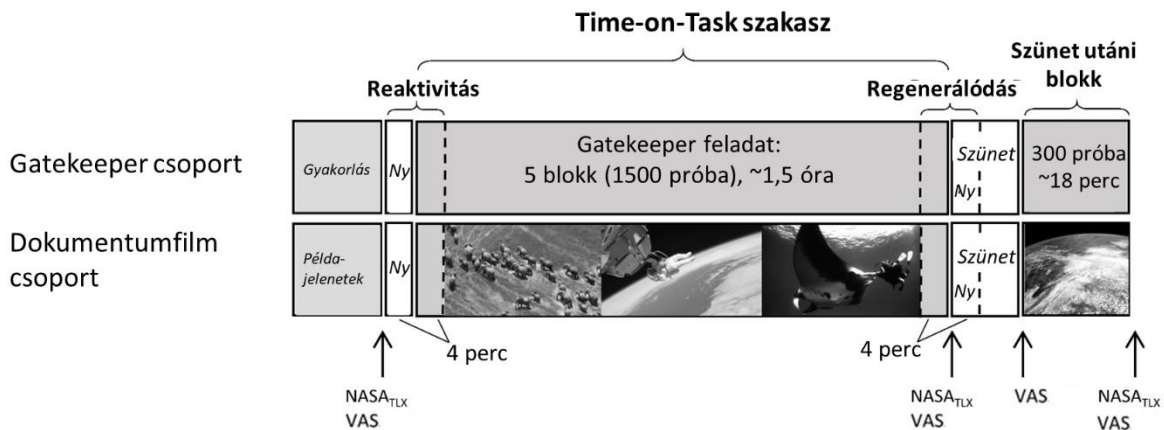
(lnLF és lnHF), valamint a két spektrum arányát (LF/HF arány) használtuk fel a további elemzések során. Végül, egy nem-lineáris módszer, a Poincaré ábra alapján meghatároztuk a rövid- (SD1), és hosszú (SD2) távú variabilitásra reflektáló mutatókat. Statisztikai elemzést ugyanakkor nem végeztünk az SD1-gyel, ugyanis Ciccone és mtsai. (2017) igazolták, hogy az SD1 és az RMSSD mutatók matematikailag azonosak ( $SD1 = RMSSD/\sqrt{2}$ ), így mindkét mutató elemzésének bemutatása szükségtelen redundanciához vezetne.

A HRV-t mindkét csoportban kiszámítottuk a hosszantartó feladatvégzés, vagy dokumentumfilm-nézés előtti és utáni 4 perces EKG intervallumokra, valamint a feladatvégzés vagy filmnézés alatti ~18 perces blokkokra is, beleértve a szünet utáni blokkot is (lásd alább).

A HRV mellett a Gatekeeper csoportban azt is megvizsgáltuk, hogy a korrekt és inkorrekt válaszadást követően hogyan változik a szívműködés (válaszadáshoz-kötött pulzusszám változás). Ehhez minden próbában kiszámoltuk a válaszadás utáni 2500 ms hosszú intervallumban a RR-távolságok átlagos különbségét. Nagyobb átlagos különbség esetén tehát csökkent a szívfrekvencia, míg kisebb átlagos különbség esetén növekedett.

#### *Az eljárás menete*

A vizsgálati protokollt az 4. ábra mutatja be. A vizsgálatot megelőző napon, illetve éjszakán a kísérleti személyek aktivitást és fényexpozíciót mérő készüléket (Aktigráf; Philips Respironics: Actiwatch 2) viseltek a domináns kezük csuklóján. Emellett arra kértük őket, hogy a vizsgálatra egy pihentető éjszakát követően érkezzenek, valamint hogy kerüljék az alkohol-, illetve koffein tartalmú termékek fogyasztását a vizsgálat napján. A vizsgálatok 9:30 és 13:30 között kezdődtek. Elsőként írásos beleegyező nyilatkozatot írtak alá a személyek, majd ellenőriztük az aktigráfos elemzés, illetve önbevallás alapján meghatározott alvásmennyiséget. Aktigráf alapján a Gatekeeper csoportban 7,46 óra (SD = 1,64) volt az átlag alvásidő, míg a Dokumentumfilm csoportban az átlag 7,82 óra (SD = 1,48) volt. Önbevallás alapján a Gatekeeper csoport tagjai átlagosan 7,67 (SD = 1,61) órát, a Dokumentumfilm csoport tagjai 7,82 órát (SD = 1,48) aludtak. A csoportok között nem volt szignifikáns különbség sem az aktigráf ( $t(39) = -0,74$ ,  $p = 0,46$ ), sem az önbevallás ( $t(39) = 1,15$ ,  $p = 0,26$ ) alapján meghatározott alvásidőben.



**4. ábra.** A kísérleti eljárás sematikus ábrázolása a Gatekeeper csoportban és a Dokumentumfilm csoportban. Ny.: nyugalmi EKG mérés.

Az alvásmennyiség ellenőrzése után három mellkasi elektródát helyeztünk fel (II-es elvezetés). A Gatekeeper csoportban a személyek ezután megismerkedtek a feladattal, illetve gyakorolták a feladatot unimodális és bimodális ingerekkel is (összesen 72 próba). A Dokumentumfilm csoportban egy rövid részletet mutattunk be az egyik dokumentumfilmből. Ezt a gyakorlási szakaszt követően mindkét csoportban a személyek megjelölték aktuális fáradtsági szintjüket a VAS skálán és jelezték a terhelés mértékét a NASA<sub>TLX</sub> skálán. Ezután 4 perces nyugalmi EKG mérés következett, majd a Gatekeeper csoportban megkezdődött a feladatvégzés. Ebben a szakaszban 1500 próbát teljesítettek a személyek (ToT szakasz, ~1,5 óra), melyet 5, egyenként 300 próbás blokkra osztottunk az adatelemzés során. A Dokumentumfilm csoportban a ToT szakasz hossza szintén 1,5 óra volt, melyet szintúgy 5 blokkra osztottunk. Ezután mindkét csoportban újra regisztráltuk a VAS és a NASA<sub>TLX</sub> skálákat, valamint megkértük a személyeket, hogy becsüljék meg a feladat/dokumentumfilm kezdete óta eltelt időt, percben.

A szubjektív kérdések után egy újabb 4 perces nyugalmi EKG mérés következett. A szünetelés vizsgálata céljából a személyek még további 8 percig pihentek (a szünet teljes hossza tehát 12 perc volt), amelynek a végén ismét rögzítettük a szubjektív fáradtság mértékét. A szünet után a Gatekeeper csoport további 300 próbán keresztül (~18 perc) végezte a Gatekeeper feladatot, a Dokumentumfilm csoport pedig további 18 percet töltött filmnézéssel. A kísérlet végén a személyek újra beszámoltak a szubjektíven észlelt fáradtságuk szintjéről, valamint a szünet utáni blokk okozta kognitív terhelés mértékéről.

## *Adatelemzés*

A statisztikai elemzéseket Van Breukelen (2006, 2013) javaslatai nyomán végeztük. Annak tesztelésére, hogy a ToT szakasz után növekedett-e a szubjektív fáradtság mértéke, kovarianciaanalízist (ANCOVA-t) futtattunk, amelyben független változó volt a Csoport (Gatekeeper vs. Dokumentumfilm), kovariáns a ToT szakasz előtti fáradtság és függő változó a ToT szakasz utáni fáradtság. A szünet hatásának tesztelésére is ANCOVA-t futtattunk a Csoport, mint független változóval, a ToT szakasz utáni fáradtság, mint kovariánssal, míg a függő változó a szünet végén rögzített fáradtság volt. Végül a szünet utáni blokk hatását is ANCOVA-val teszteltük, amelyben független változó volt a Csoport, kovariáns a szünet végén regisztrált fáradtság és függő változó volt a szünet utáni blokkot követően mért fáradtság. A NASA<sub>TLX</sub> segítségével nyert adatok esetében ugyanezt az eljárást követtük, leszámítva a szünet alatti változásokat.

A pulzussal és HRV mutatókkal végzett elemzések során is Van Breukelen (2006, 2013) javaslatait követtük. A reaktivitások és a regenerálódás teszteléséhez ANCOVA-kat futtatunk, amelyben a Csoport konzisztensen független változóként szerepelt, függő változóként az időben későbbi, míg kovariánsként az időben korábbi mérés. Ezzel az eljárással teszteltük tehát a reaktivitást (időben korábbi = nyugalmi HRV a ToT szakasz előtt; időben későbbi = a ToT szakasz első 4 percében mért HRV), a regenerálódást (időben korábbi = a ToT szakasz utolsó 4 percében mért HRV; időben későbbi = szünet alatti nyugalmi HRV) és a szünet utáni reaktivitást (időben korábbi = szünet alatti nyugalmi HRV; időben későbbi = a szünet utáni blokk első 4 percében mért HRV).

A ToT szakasz alatti változásokat kevert-mintás kovarianciaanalízissel (*k*ANCOVA-val) vizsgáltuk. A *k*ANCOVA-val két faktort teszteltünk: a Blokkot (a Gatekeeper feladat/dokumentumfilm-nézés 5 blokkja) és a Csoportot. Ezen felül kovariánsként vezettük be az elemzésbe a ToT szakasz előtti nyugalmi HRV-t is. A ToT szakasz alatti HRV változások és a szubjektív fáradtság mértékének változása közötti összefüggéseket parciális korrelációkkal vizsgáltuk, amelyekben kontrolláló változó a ToT szakasz előtti nyugalmi HRV volt.

A Gatekeeper csoportban a kognitív teljesítmény elemzésének előkészítő fázisában minden blokkra, azon belül pedig minden kondícióra kiszámítottuk a helyesen megválaszolt próbák átlagos RI-jét (ms) és a helyes találatok arányát. Kizártuk továbbá azokat a próbákat, amelyekben nem történt válaszadás, vagy a RI szokatlanul alacsony volt (< 200 ms). A két teljesítménymutatóra külön-külön futtatunk 5x4-es *ö*mANOVA-kat, a Blokk (a feladat 5 blokkja) és a Kondíció (a négyféle kondíció) faktorokkal. Emellett a szünethatást is teszteltük:

az 5. blokkban nyújtott teljesítményt hasonlítottuk össze a szüneti utáni blokkal (2x4 *ömANOVA*). A Gatekeeper csoport feladat alatti motivációját is vizsgáltuk az inkorrekt válaszadást követő szívfrekvencia-változás (lásd fent) és RI-lassulás elemzésével. Mindkét esetben 2x5-ös *ömANOVA*-t futtattunk a következő faktorokkal: Válaszadás helyessége (korrekt vs. inkorrekt) és Blokk (a kísérlet öt blokkja). Végül minden blokkra kiszámítottuk a RI variabilitását (= RI szórás / RI átlag), amely a figyelmi lapszusok, valamint koncentrációs nehézségek jellemzésére szolgál. A RI variabilitását egyfaktoros *ömANOVA*-val elemeztük az öt kísérleti blokkban (Blokk faktor). A homogenitás tesztelése és a korrekciók használata megegyezett az első vizsgálatban ismertetett eljárással. A szignifikáns interakciókat és főhatásokat szimpla hatások elemzéssel („simple effects analysis”), valamint Bonferroni-korrigált post-hoc analízissel elemeztük tovább.

#### 4.2. Eredmények

A kísérletet megelőzően a Gatekeeper és a Dokumentumfilm csoport között nem volt szignifikáns különbség a szubjektív fáradtság szintjében ( $t(39) = -1,51; p = 0,14$ ). Az elvárásainknak megfelelően viszont a ToT szakaszt követően a Gatekeeper csoportban jelentősen emelkedett a fáradtság szintje, míg a Dokumentumfilm csoportban stagnált ( $F(1,38) = 11,24, p < 0,01, \eta_p^2 = 0,23$ ). A ToT szakasz utáni NASA<sub>TLX</sub> adatok elemzése pedig azt mutatta, hogy a Dokumentumfilm csoporthoz képest a Gatekeeper csoportban szignifikánsan emelkedett a fizikai és mentális terhelés, valamint a frusztráció mértéke is (Fizikai terhelés:  $F(1,38) = 31,21, p < 0,001, \eta_p^2 = 0,45$ ; Mentális terhelés:  $F(1,38) = 50,89, p < 0,001, \eta_p^2 = 0,57$ ; Frusztráció:  $F(1,38) = 12,87, p < 0,001, \eta_p^2 = 0,25$ ). A feladattal töltött idő hosszának becslésében is szignifikáns különbséget találtunk a két csoport között: a Dokumentumfilm csoport átlagosan 8,81 perccel, míg a Gatekeeper csoport 50,56 perccel becsülte alul az eltelt idő hosszát ( $t(31,76) = -6,80; p < 0,001$ ). A Gatekeeper csoportban a RI szignifikánsan csökkent az elsőtől a harmadik blokkig, majd nem változott tovább ( $F(4,76) = 18,89; p < 0,001; \eta_p^2 = 0,5$ ). Ezzel szemben a RI variabilitás elemzése szignifikáns, lineárisan emelkedő trendet mutatott ( $F(4,76) = 4,51; p < 0,05; \eta_p^2 = 0,19$ ), ami arra utal, hogy a feladattal töltött idő növekedésével a figyelem szintje egyre nagyobb mértékben fluktuálhatott. A találati arány elemzése szignifikáns Blokk x Kondíció interakciót hozott ( $F(12,228) = 2,11; p < 0,05; \eta_p^2 = 0,1$ ), ami abból eredhetett, hogy a találati arány egyedül a Dupla-célinger kondícióban csökkent az idővel. A szünetet követően azonban minden kondícióban javult a találati arány (ötödik blokk vs. szünet utáni blokk:  $F(1,19) = 13,09; p < 0,01; \eta_p^2 = 0,41$ ). Végül, a korrekt és inkorrekt válaszok utáni szív működés és RI elemzése azt mutatta, hogy inkorrekt válaszadást követően a

szívfrekvencia és a RI is lassult, ám a Válaszadás helyessége x Blokk interakciók nem voltak szignifikánsak, ami azt jelzi, hogy a motiváció szintje nem csökkent a hosszantartó feladatvégzés alatt.

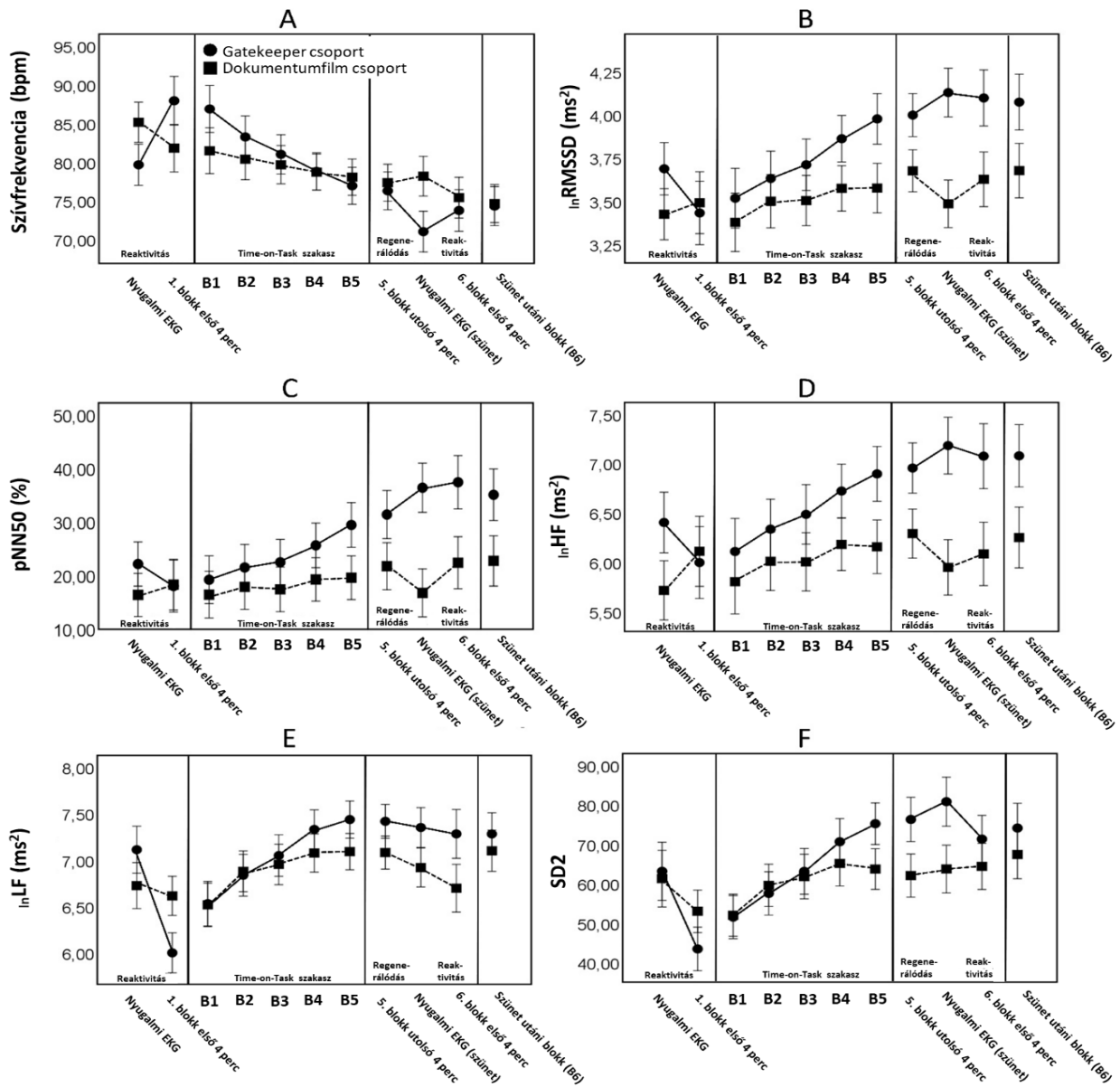
**1. Táblázat.** A HRV és a szívfrekvencia elemzésének eredményei a ToT szakaszban

Változók	Elemzések		Szimpla hatások elemzés							
	<i>kANCOVA</i>		Block x Group				Blokkl főhatás (Dokumentumfilm csoport)			
	Blokk főhatás		F <sub>(4,152)</sub>	$\eta_p^2$	F <sub>(4,152)</sub>	$\eta_p^2$	F <sub>(4,35)</sub>	$\eta_p^2$	F <sub>(4,35)</sub>	$\eta_p^2$
HR	4,75**	0,11	16,83***	0,31	25,92***	0,75	2,04	0,19		
RMSSD	4,01*	0,10	3,57*	0,09	8,96***	0,51	1,69	0,16		
$\ln$ RMSSD	10,75***	0,22	6,34**	0,14	13,16***	0,60	2,52 <sup>m</sup>	0,22		
pNN50	6,61**	0,15	3,56*	0,09	6,70***	0,43	1,52	0,15		
HF	2,57 <sup>m</sup>	0,06	2,97*	0,07	4,20**	0,32	0,45	0,05		
$\ln$ HF	11,09***	0,23	5,35**	0,12	11,14***	0,56	2,72*	0,24		
LF	12,14***	0,24	2,89*	0,07	6,97***	0,44	4,98**	0,36		
$\ln$ LF	5,61**	0,13	3,75*	0,09	20,92***	0,71	6,85***	0,44		
LF/HF	0,93	0,02	0,20	0,01	0,52	0,06	2,00	0,19		
SD2	9,81***	0,21	5,09**	0,12	15,04***	0,63	6,96***	0,44		

\* $p < 0,05$ , \*\* $p < 0,01$ , \*\*\* $p < 0,001$ , m:  $p = 0,05 - 0,06$

A szívfrekvencia-, és a HRV változásait a kísérlet során az 5. ábrán jelenítettük meg. A ToT szakasz alatti szívfrekvencia-, és HRV-változások eredményei részletesen az 1. táblázatban láthatók. Az előzetes elvárásainkkal konzisztensen, a ToT szakasz alatt kizárólag a vagus-mediálta HRV mutatók (RMSSD,  $\ln$ RMSSD, HF és pNN50) értéke növekedett szignifikánsan a Gatekeeper csoportban, miközben értékük a Dokumentumfilm csoportban változatlan maradt. A nyugalmi helyzetből aktív feladatvégzésre, vagy dokumentumfilm-nézésre történő váltáshoz kapcsolódó reaktivitások elemzése a szívfrekvencia és az  $\ln$ RMSSD esetében hozott konzisztens eredményeket: a Gatekeeper csoportban a szívfrekvencia növekedett (ToT szakasz elején:  $F(1,38) = 39,93$ ;  $p < 0,001$ ;  $\eta_p^2 = 0,51$ ; szünet utáni reaktivitás:  $F(1,38) = 22,99$ ;  $p < 0,001$ ;  $\eta_p^2 = 0,38$ ), az  $\ln$ RMSSD pedig csökkent a reaktivitás alatt (ToT szakasz elején:  $F(1,38) = 5,54$ ;  $p < .05$ ;  $\eta_p^2 = 0,13$ ; szünet utáni reaktivitás:  $F(1,38) = 4,32$ ;  $p < 0,05$ ,  $\eta_p^2 = 0,10$ ). A regenerálódás alatt továbbá négy, vagus tónusra reflektáló HRV mutató (RMSSD,  $\ln$ RMSSD,  $\ln$ HF és pNN50) értéke emelkedett szignifikánsan (minden  $F > 5,7$ ,  $p =$

0,001 – 0,020), míg az LF/HF arány csökkent a Gatekeeper csoportban ( $F(1,38) = 6.59; p < 0,05; \eta_p^2 = 0,15$ ). Ezen felül a Gatekeeper csoportban szignifikánsan alacsonyabb volt a szívfrekvencia is a regenerálódás alatt ( $F(1,38) = 16.40; p < 0,001; \eta_p^2 = 0,30$ ).



5. ábra. A szívfrekvencia (A) és öt HRV-mutató (B-F) elemzésének eredményei a Gatekeeper csoportban (kör) és a Dokumentumfilm csoportban (négyzet). Az ábrákon azok a HRV-mutatók láthatók, amelyek elemzése a legerősebb Blokk x Csoport interakciókat mutatta. A hibásávok az átlag hibáját jelölik.

### 4.3. Megvitatás

A második vizsgálatban – elvárásainknak megfelelően – azt találtuk, hogy a paraszimpatikus idegrendszeri aktivitásra reflektáló HRV mutatók növekedtek egy kognitív szempontból megterhelő bimodális munkamemória feladat során, ami növelte a szubjektív fáradtság mértékét, míg egy kevésbé megterhelő és nem-fárasztó feladatban nem mutattak változást. A helyes és helytelen válaszokat követő viselkedéses és biológiai változások elemzése alapján azt a következtetést vontuk le, hogy a fáradtság növekedése azonban nem járt együtt motivációs deficittel. Fontos eredmény, hogy a szívfrekvencia és négy HRV mutató, az LF,  $\ln$ LF,  $\ln$ HF és SD2 mindkét csoportban azonos irányban változott a feladatvégzés vagy dokumentumfilm-nézés ideje alatt. Ez azt jelzi, hogy bizonyos HRV mutatók akkor is mutathatnak szignifikáns emelkedést, ha a személyek egy hosszan tartó, de ugyanakkor nem fárasztó tevékenységet végeznek. Ezeket az eredményeket elméleti és módszertani szempontból is értékesnek tartjuk, mivel felhívják a figyelmet arra, hogy a HRV és a fáradtság kapcsolatát vizsgáló kísérletekben célszerű valamilyen kontroll helyzethez hasonlítani a fárasztó feladat alatti HRV változásokat az eredmények precízebb interpretációjának érdekében. Végül, a szünet után jelentős teljesítményjavulást figyeltünk meg a feladatban, ami összhangban van azokkal a korábbi kutatásokkal, amelyek a szünet pozitív hatásáról számoltak be (pl. Helton és Russel, 2015, 2017; Lim és Kwok, 2015). Kiegészítjük ugyanakkor a korábbi tanulmányokat azzal, hogy a szünet jótékony hatását egy bimodális, osztott figyelmet igénylő feladatban mutattuk ki, amire – legjobb tudomásunk szerint – korábban még nem volt példa.



## **5. A mentális fáradtság hatása a modalitások közötti interferenciára, szelektív figyelmi helyzetben**

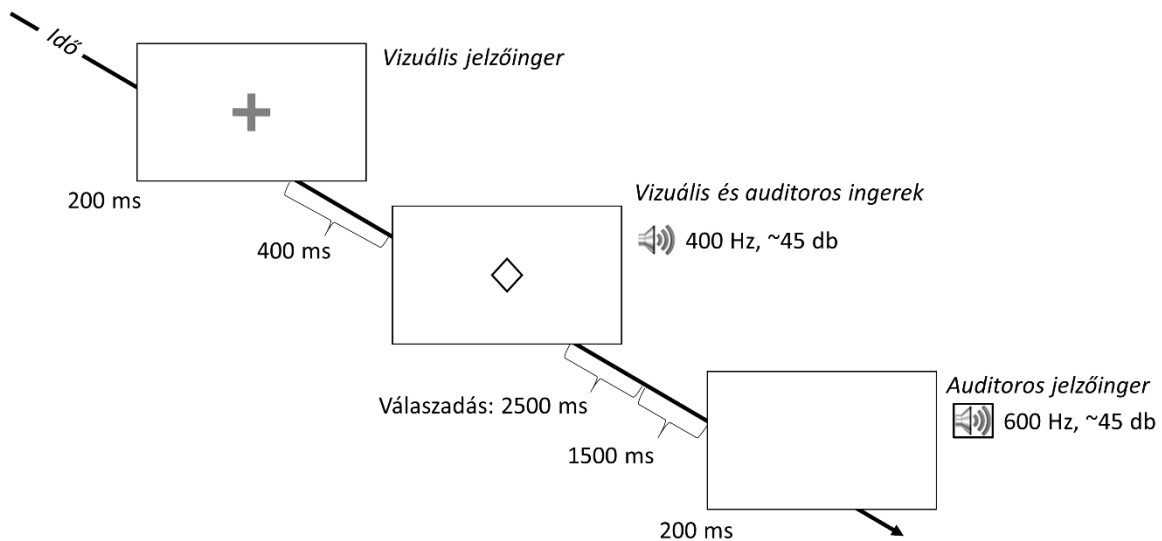
### 5.1. Módszertan

#### *Kísérleti személyek*

Huszonöt egészséges személy vett részt a vizsgálatban, azonban két személy adatait technikai problémák miatt kizártuk. Az elemzésre került 23 személy (15 nő, 8 férfi, életkori átlag: 21,43, szórás: 1,73) önbevallás alapján nem szenvedett neurológiai vagy pszichiátriai betegségben, valamint látásuk jó, vagy jóra korrigált volt. A kísérlet előtt minden személy beleegyező nyilatkozatot írt alá arról, hogy önkéntesen vesz részt a vizsgálatban. Hasonlóan az első két vizsgálathoz, a kísérlet előtt elemszámbecslést végeztünk, amely szerint 90%-os statisztikai erő eléréséhez legalább 18 főre volt szükség 5%-os alfaszint mellett. A 23 résztvevőből álló minta tehát megfelelően nagynek tekinthető az általunk kívánt hatások teszteléséhez.

#### *Feladat és ingeranyag*

A vizsgálatban a Lukas és mtsai. (2014) által használt idődiszkriminációs feladat módosított változatát alkalmaztuk. A 6. ábrán látható egy próba szekvenciája. Minden próba egy vizuális vagy egy auditoros jelzőinger bemutatásával kezdődött, az ingerek prezentációja előtt 400 ms-mal. A vizuális jelzőinger egy szürke háttéren centrálisan prezentált fehér kereszt volt (1,5 cm x 1,5 cm; látószög: 1,25°), míg az auditoros jelzőinger egy 600 Hz-es hang, kb. 45 dB erősséggel, hangszórókból lejátszva. Mindkét jelzőinger időtartama 200 ms volt. Ha a próba kezdetén vizuális jelzőingert prezentáltunk, akkor a személyek feladata az volt, hogy a vizuális inger időtartamáról hozzanak döntést (hosszú vagy rövid időtartamú inger, lásd lent), míg auditoros jelzőinger esetében az auditoros ingerről kellett ugyanilyen döntést hozni. A vizuális inger egy 1,5 x 1,5 cm (vizuális szög: 1,25°) rombusz volt, a képernyő közepén prezentálva. Az auditoros inger egy 400 Hz-es hang volt, kb. 45 dB erősséggel. Az ingerek mindig szimultán jelentek meg vagy rövid (100 ms), vagy hosszú (300 ms) ideig.



**6. ábra.** Az idődiszkriminációs feladat próba-szekvenciájának sematikus szemléltetése

*Kongruens* próbák esetén az ingerek prezentációs ideje megegyezett (mindkettő rövid, vagy mindkettő hosszú), míg *inkongruens* próbák esetében nem egyeztek meg (az egyik rövid, a másik hosszú inger). A feladat fontos eleme volt a modalitások közötti váltás is, amely alapján a próbák két további típusát különítettük el: *modalitás-ismétléses* próbákban az aktuális próbában, valamint az egyel korábbi próbában a jelző-, és célingerek modalitása azonos volt, a *modalitás-váltásos* próbákban viszont nem volt azonos (pl. vizuális után auditoros jelző-, és célinger). Az egymást követő modalitás-ismétléses próbák száma 2 és 5 próba között változott. A személyek gombnyomással jelezték, hogy az adott inger rövid vagy hosszú ideig volt-e prezentálva. A válaszadásra 2500 ms ideig volt lehetőség. A válaszadás és következő jelzőinger bemutatása között 1500 ms telt el. A feladat előtt mind a gyorsaság, mind a pontosság fontosságát hangsúlyoztuk a személyeknek.

#### *Szubjektív mérőeszközök*

A vizsgálat során a korábban már ismertetett VAS fáradtságskálát, valamint a NASA<sub>TLX</sub> kérdőívet használtuk a fáradtsággal és kognitív terheléssel kapcsolatos szubjektív tapasztalatok mérésére. Emellett a feladatvégzés előtt megkértük a személyeket arra is, hogy egy 1-től 7-ig terjedő Likert-skálán (1 = “Egyáltalán nem vagyok motivált”, 7 = “Nagyon motivált vagyok”) értékeljék, hogy mennyire érzik magukat motiváltként a feladat elvégzésére.

#### *Szívfrekvencia-variabilitás*

Az EKG-jelek regisztrálása, az adatok előfeldolgozása és analízise szinte teljes mértékben megegyezett a második vizsgálatban leírt módszertannal. A kísérleti előtti nyugalmi EKG

időtartama 5 perc volt. A ToT szakaszt követően, a szünet alatti időszakot (összesen 12 perc), két részre bontottuk, és külön kiszámítottuk a HRV-t a szünet első és utolsó 5 perces szakaszára is. Statisztikai elemzést a szívfrekvencián túl azokkal a vagus-mediálta mutatókkal végeztünk, amelyek a második vizsgálatban a ToT szakasz alatti változások tekintetében a legmegfelelőbbnek bizonyultak, vagyis az  $\ln$ RMSSD és az  $\ln$ HF mutatókkal.

#### *Az eljárás menete*

Az eljárás menete nagymértékben hasonlított a második vizsgálat menetére. A kísérletet megelőző éjszaka aktigráfos vizsgálat történt. Az így nyert objektív alvásidő átlagosan 7,92 (SD = 1,57) óra, míg a szubjektív alvásidő átlagosan 7,89 (SD = 1,31) óra volt. A személyek kronotípusát is meghatároztuk a magyarra fordított Reggeliség-Estiség Kérdőív Önkitöltős-változatának (MEQ-SA; Terman, 2005) segítségével. A kérdőív alapján 3 személy tartozott az esti típusba (MEQ-SA pontszám  $\leq 41$ ), 18 személy pedig a köztes típusba (MEQ-SA pontszám 42 és 58 között). Az optimális éberségi szint elérése érdekében az esti típusba tartozó személyek kizárólag délutáni (14:00) időpontban vehettek részt a vizsgálatban.

A feladat szemléltetését követően a személyek gyakorolták a feladatot, ami után kitöltötték a NASA<sub>TLX</sub>-et (NASA<sub>TLX</sub> I.) és megjelölték aktuális fáradtsági szintjüket a VAS skálán (VAS I.). Ezt követően felhelyeztük a mellkasi elektródákat és 5 perces nyugalmi EKG-t regisztráltunk.

A tényleges feladat megkezdése előtt a személyek megválaszták a motivációra vonatkozó kérdést. Az erre a kérdésre adott medián válasz 6 volt (átlag = 5,52; terjedelem = 3), tehát a személyek kifejezetten motiváltak voltak a feladat elvégzésére. Ezután következett a ToT szakasz, mely során 2000 próbát teljesítettek a személyek. Az elemzés során 5 blokkra osztottuk ezt a szakaszt. A kísérletes kondíciók aránya minden blokkban kiegyenlített volt (50 próba kondícióként). A próbák sorrendje randomizálva volt. A ToT szakasz időtartama kb. 1,5 óra volt, azonban a személy RI-jétől függően lehetett rövidebb vagy hosszabb is (átlag = 1,55 óra, SD = 0,1). A feladat végén ismét rögzítettük a VAS (VAS II.) és NASA<sub>TLX</sub> (NASA<sub>TLX</sub> II.) adatokat, valamint - a második vizsgálatához hasonlóan - megkérdeztük a személyeket, hogy véleményük szerint mennyi ideig tartott a feladat.

A ToT szakasz után 12 perc hosszúságú szünet következett. A szünet első 5 perces szakaszában nyugalmi EKG-t rögzítettünk, majd egy rövid, 2 perc hosszúságú szakaszban lehetőséget biztosítottunk a személyeknek arra, hogy nagyobb mozdulatokat tegyenek és pozíciót váltsanak. A hátralévő 5 percben ismét nyugalmi EKG-t regisztráltunk, melyet követően harmadik alkalommal is rögzítettük a szubjektív fáradtság mértékét (VAS III.),

valamint a feladatvégzésre vonatkozó motivációt. A motivációs kérdésre adott medián válasz 3 volt (átlag = 3,43; terjedelem = 6), ami arra utal, hogy a személyek kevésbé voltak motiváltak, mint a ToT szakasz elején. A szünet utáni blokkban 400 próbát teljesítettek a személyek (~18 perc), ugyanazokkal a paraméterekkel, mint a korábbi szakaszban. Végül a feladat befejezése után ismét rögzítettük a szubjektív fáradtság szintjét (VAS IV.) és a NASA<sub>TLX</sub> (III.) kérdőívet.

#### *Adatelemzés*

A szubjektív fáradtságot *ömANOVA* segítségével elemeztük, a Kérdés-időzítés faktor (4 szint: VAS I. - IV.) bevonásával. A kognitív terhelést 3x6-os *ömANOVA*-val teszteltük, a Kérdés-időzítés (3 szint: a NASA<sub>TLX</sub> I. – III.) és Skála (6 szint:a NASA<sub>TLX</sub> skálái) faktorokkal. A feladat hosszának becslését összetartozó mintás t-próbával elemeztük: az objektív időtartamot hasonlítottuk össze a becsült időtartammal.

A kognitív teljesítmény értékeléséhez és a feladattal töltött idő hatásának vizsgálatához első lépésben minden blokkra, azon belül pedig minden kondícióra kiszámítottuk a helyesen megválaszolt próbák átlagos RI-jét (ms) és a találati arányt. Ezt követően szintén minden blokkra és kondícióra kiszámítottuk a Vandierendonck (2017) által közölt ún. lineáris integrált gyorsaság és pontosság pontszámot (linear integrated speed and accuracy score, LISAS), az alábbi képlet alapján:

$$\text{LISAS} = \text{RI} + \text{SD}_{\text{RI}}/\text{SD}_{\text{ER}} \times \text{ER},$$

ahol az RI az átlag reakcióidőt jelöli, az  $\text{SD}_{\text{RI}}$  a RI szórását, míg az ER és az  $\text{SD}_{\text{ER}}$  a hibák arányát, illetve annak szórását mutatja. A LISAS előnye, hogy egy pontszámában integrál két rendkívül lényeges pszichofizikai mutatót, továbbá pontosabb képet ad a kognitív teljesítménytől abban az esetben, ha a személyek valamilyen implicit vagy explicit stratégiát követve vagy a RI-re, vagy a pontosságra fókuszálnak inkább. A RI, találati arány és LISAS adatokat egymástól függetlenül, 2x2x2x5-ös *ömANOVA*-val elemeztük a következő faktorok bevonásával: Modalitás (auditoros vs. vizuális), Modalitás-váltás (modalitás-ismétlés vs. váltás), Kongruencia (kongruens vs. inkongruens) és Blokk (a ToT szakasz 5 blokkja). A szünet hatását is hasonló módon teszteltük, de a Blokk faktor szintjeit 2-re redukáltuk: az ötödik blokkot hasonlítottuk össze a szünet utáni blokkal.

A szívfrekvenciával és HRV mutatókkal végzett elemzések hasonlóan történtek, mint a második vizsgálat esetében. A reaktivitáshoz és regenerálódáshoz köthető változásokat összetartozó mintás t-próbákkal elemeztük. A *reaktivitás* teszteléséhez a ToT szakasz előtti 5 perces nyugalmi HRV-t hasonlítottuk össze az első kísérletes blokk első 5 percével. A ToT

szakasz utáni *regenerálódást* úgy vizsgáltuk, hogy az ötödik blokk utolsó 5 percét hasonlítottuk össze a kísérlet utáni nyugalmi HRV-vel. A *szünet utáni reaktivitás* teszteléséhez a szünet utáni blokk első 5 percét hasonlítottuk össze a szünet végén regisztrált 5 perces nyugalmi HRV-vel. A ToT szakasz alatt történő változásokat egyszempontos *ömANOVA*-val elemeztük (Blokk főhatás: a ToT szakasz blokkja).

## 5.2. Eredmények

A szubjektív fáradtság elemzése szignifikáns Kérdés-időzítés főhatást mutatott ( $F(3, 66) = 23,82, p < 0,001, \eta_p^2 = 0,52$ ). A post-hoc analízis szerint a ToT szakasz után jelentősen növekedett a szubjektív fáradtság szintje, a szünet hatására azonban csökkent a fáradtság. Az észlelt kognitív terhelés elemzése szignifikáns Kérdés-időzítés ( $F(2, 44) = 21,09, p < 0,001, \eta_p^2 = 0,49$ ) és Skála ( $F(5, 110) = 21,04, p < 0,001, \eta_p^2 = 0,49$ ) főhatásokat mutatott, valamint az Kérdés-időzítés x Skála interakció is szignifikánsnak bizonyult ( $F(10, 220) = 4,97, p < 0,001, \eta_p^2 = 0,18$ ). További elemzések szerint a ToT szakasz alatt az időbeli terhelés ( $p = 0,25$ ) kivételével a kognitív terhelés minden aspektusa szignifikánsan emelkedett. Hasonlóan a második vizsgálathoz, a feladat hosszára tett időbecslések elemzése alapján úgy tűnt, hogy a kísérleti személyek jelentősen – átlagosan 33,9 perccel - alábecsülték a feladattal töltött idő hosszát ( $t(22) = -8,45, p < 0,001$ ).

A kognitív teljesítmény elemzésének eredményeit a 2. táblázatban foglaltuk össze. Az előzetes feltevéseinkkel összhangban a LISAS adatok elemzése szignifikáns Blokk x Modalitás interakciót, illetve szignifikáns Blokk x Modalitás x Kongruencia hármas interakciót hozott (lásd: 7. ábra). A Blokk x Modalitás interakció forrása az lehetett, hogy míg az auditoros modalításban nem találtunk szignifikáns változást a harmadiktól az ötödik blokkig ( $t(22) = -0,15, p = 0,88$ ), addig a vizuális modalításban szignifikáns teljesítménycsökkenést figyeltünk meg a feladatnak ugyanebben a szakaszában (blokk 3 vs. blokk 5:  $t(22) = -3,34, p < 0,05$ ). Ebből arra következtethetünk, hogy a vizuális ingereken alapuló temporális diszkrimináció érzékenyebben reagált a fáradtság negatív hatásaira.

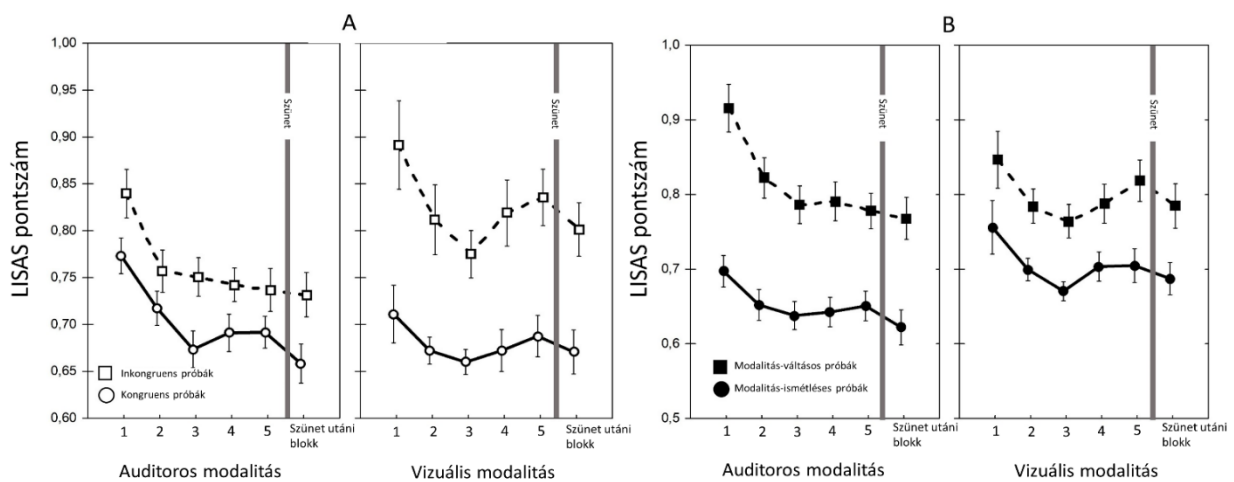
**2. Táblázat.** A kognitív teljesítmény mutatóinak statisztikai elemzése a ToT szakaszban

Főhatások és interakciók	Találati arány			Reakcióidő		LISAS	
	df	F	$\eta_p^2$	F	$\eta_p^2$	F	$\eta_p^2$
Blokk (1 – 5. blokk)	4,88	6,05**	0,22	11,68***	0,35	8,79***	0,28
Modalitás (vizuális vs. auditoros)	1,22	26,33***	0,54	4,54*	0,17	0,94	0,04
Modalitás-váltás (ismétlés vs. váltás)	1,22	26,39***	0,54	92,41***	0,81	83,24***	0,79
Kongruencia (kongruens vs. inkongruens)	1,22	75,95***	0,77	56,30***	0,72	60,54***	0,73
Modalitás x Modalitás-váltás	1,22	0,01	0,00	36,39	0,62	22,92***	0,51
Modalitás x Kongruencia	1,22	27,10***	0,55	8,22	0,27	12,92**	0,37
Modalitás-váltás x Kongruencia	1,22	6,84*	0,24	11,19**	0,34	34,19***	0,61
Modalitás x Modalitás-váltás x Kongruencia	1,22	0,87	0,04	1,15	0,05	0,37	0,02
Blokk x Modalitás	4,88	0,87	0,04	5,36**	0,20	3,18*	0,13
Blokk x Modalitás-váltás	4,88	0,26	0,01	6,34**	0,22	4,63**	0,17
Blokk x Kongruencia	4,88	1,32	0,06	2,68 <sup>m</sup>	0,11	2,32 <sup>m</sup>	0,10
Blokk x Modalitás x Modalitás-váltás	4,88	0,32	0,01	5,44**	0,20	5,36**	0,20
Blokk x Modalitás x Kongruencia	4,88	0,34	0,01	1,68	0,07	3,86*	0,15
Blokk x Modalitás-váltás x Kongruencia	4,88	2,10	0,09	0,12	0,00	1,04	0,04
Blokk x Modalitás x Modalitás-váltás x Kongruencia	4,88	1,93	0,08	0,52	0,02	0,39	0,02

\* $p < 0,05$ , \*\* $p < 0,01$ , \*\*\* $p < 0,001$

A hármas interakció további elemzése külön-külön az egyes modalitásokra nézve szignifikáns Blokk x Kongruencia interakciókat mutatott mindkét esetben (vizuális:  $F(4, 88) = 2,93$ ,  $p < 0,05$ ,  $\eta_p^2 = 0,12$ ; auditoros:  $F(4, 88) = 3,18$ ,  $p < 0,05$ ,  $\eta_p^2 = 0,13$ ). Az interakciók forrása azonban eltérő volt. Az inkongruens vizuális próbák esetében szignifikáns Blokk hatást találtunk ( $F(4, 88) = 5,20$ ,  $p < 0,01$ ,  $\eta_p^2 = 0,19$ ), ami azt mutatta, hogy az elsőtől a harmadik blokkig javult ( $t(22) = 3,66$ ,  $p < 0,01$ ), míg a harmadiktól az ötödik blokkig csökkent a teljesítmény ( $t(22) = -3,99$ ,  $p < 0,01$ ). Ezzel szemben a vizuális kongruens próbák során a teljesítmény nem változott ( $F(4, 88) = 2,32$ ,  $p = 0,12$ ,  $\eta_p^2 = 0,09$ ). Az auditoros modalításban is szignifikáns Blokk x Kongruencia interakciót találtunk (lásd fentebb), a további elemzések azonban eltérő tendenciát mutattak a vizuálishoz képest: a teljesítmény a kongruens auditoros

próbákban az elsőtől a harmadik blokkig javult (blokk 1 vs. blokk 2:  $t(22) = 3,96, p < 0,01$ ; blokk 2 vs. blokk 3:  $t(22) = 3,48, p < 0,01$ ), az inkongruens auditoros próbákban viszont a második blokk után már nem javult tovább (blokk 2 vs. blokk 3:  $t(22) = 0,52, p = 1,0$ ). Alátámasztást nyert tehát a második hipotézisünk, miszerint a kongruencia-hatás a vizuális próbákban egyre erősödött a feladat során, vagyis az auditoros zavaró ingerek negatív hatása egyre inkább kifejezettebbé vált a fáradtság növekedésével. Végül, a szünethatás teszteléskor azt találtuk, hogy a teljesítmény a szünet után csak azon kongruens próbákban javult, ahol a célinger auditoros volt (Blokk x Modalitás x Kongruencia:  $F(4, 88) = 7,29, p < 0,05, \eta_p^2 = 0,25$ ; Blokk x Kongruencia interakció az auditoros próbákra:  $F(1, 22) = 8,46, p < 0,01, \eta_p^2 = 0,28$ ; kongruens auditoros próbák az ötödik vs. hatodik blokkban:  $t(22) = 2,40, p < 0,05$ ).



**7. ábra.** A LISAS pontszámok elemzésének eredményei a két kongruencia kondícióban (A) és a két Modalitás-váltás kondícióban (B), auditoros és vizuális próbákban. A hibasávok az egyénen belüli standard hibát jelölik (Cousineau, 2005).

A ToT szakasz során a szívfrekvencia szignifikáns, lineáris csökkenést mutatott ( $F(4,88) = 13,66, p < 0,001, \eta_p^2 = 0,38$ ): az ötödik blokkban szignifikánsan alacsonyabb volt a szívfrekvencia a többi blokkhoz képest. Emellett a szünet utáni blokk első 5 perce és a szünet alatti mérés között szignifikáns különbséget figyeltünk meg ( $t(22) = 2,59, p < 0,05$ ): szünetet követő reaktivitási szakaszban emelkedett a szívfrekvencia a szünet végéhez képest. Ellentétben a szívfrekvenciával, a két vagus-mediálta HRV mutató szignifikánsan emelkedett a ToT szakasz alatt ( $\ln\text{RMSSD}: F(4,88) = 6,20, p < 0,01, \eta_p^2 = 0,22$ ;  $\ln\text{HF}: F(4,88) = 3,61, p < 0,05, \eta_p^2 = 0,14$ ), ami idővel fokozódó paraszimpatikus aktivitásra utal.

### 5.3. Megvitatás

Ebben a vizsgálatban az volt a célunk, hogy teszteljük a fáradtság hatásait az auditoros és vizuális ingereken alapuló idődiszkriminációra, valamint a modalitások közötti interferenciára.

A modalitás-megfelelőség hipotézis szerint az idődiszkrimináció precízebb az auditoros modalításban, köszönhetően annak, hogy az idői felbontás magasabb az auditoros információfeldolgozás esetében (Welch és Warren, 1980). Ebből kiindulva azt feltételeztük, hogy a fáradtság hatásaival szemben az auditoros modalítás lesz ellenállóbb. Ez az előfeltevésünk beigazolódott a kísérletben, ugyanis habár kezdetben mindkét modalításban javuló tendencia volt megfigyelhető, a vizuális modalításban nyújtott teljesítmény jelentősen romlani kezdett kb. 45 perccel a feladatkezdés után. Ezzel szemben az auditoros próbákban a teljesítmény változatlan maradt a feladat végéig. Emellett a fáradtság hatására a vizuális próbákban tovább erősödött az kongruencia hatása is (vagyis az auditoros zavaró ingerek kizárása egyre nehezebbé vált), míg az auditoros próbákban nem figyeltünk meg növekvő kongruencia-hatást. Ez arra utalhat, hogy a fáradtságra érzékenyen reagáló kontrollfolyamatok hanyatlása elsődlegesen abban tükröződött, hogy az auditoros zavaró inger által facilitált választása megnehezült azokban a helyzetekben, amikor a vizuális célinger és az auditoros zavaró inger által facilitált válaszok egymással ellentétesek voltak. Második hipotézisünk tehát szintúgy beigazolódott. Az eredményeink jól magyarázhatók a Kompenzációs Kontroll Modellel, tehát a fáradtság hatására a kísérleti személyek feltehetően stratégiát váltottak és jobban fókuszáltak arra a modalításra, amely a feladat temporális jellegének jobban megfelel, vagyis az auditoros modalításra. A vizuális modalítás így kisebb fókuszot kapott, ami egyfelől a teljesítmény romlásához, másfelől pedig az auditoros zavaró ingerek kevésbé hatékony kizárásához vezetett.

A második vizsgálattal összhangban, a feladattal töltött idővel fokozatosan nőtt a paraszimpatikus gátlás, amit a vagus-mediálta HRV mutatók jelentős növekedése és a szívfrekvencia csökkenése is tükrözött. A korábbi tanulmányok, valamint a két vizsgálat eredményei alapján tehát azt a következtetést vonhatjuk le, hogy a HRV a fáradtság megfelelő biomarkere lehet, így racionális gondolat lehet olyan HRV adatokon alapuló gépi tanulási rendszerek fejlesztése, amelyek hatékonyan képesek detektálni vagy előrejelezni a fáradtságot.



## 6. A mentális fáradtság előrejelzése és detektálása HRV adatok alapján, gépi tanulással

### 6.1. Módszer

#### *Adatbázis*

Az elemzésekhez három kísérlet adatait használtuk fel. Az adatbázis egy részét a disszertációban korábban már bemutatott vizsgálatok adatai alkották: a második vizsgálatból a Gatekeeper csoport adatai ( $n=20$ ), valamint a harmadik vizsgálatból az összes résztvevő adatai ( $n=23$ ), amelyet még további 15 személy adataival bővítettünk ki (a modalitás-váltás feladaton alapuló kísérletből tehát összesen 38 személy adatát használtuk fel). Emellett egy harmadik fáradtság-kísérlet (bimodális Stroop feladat;  $n=27$ ) adatait is bevontuk az elemzésbe, amelynek részleteit az alábbiakban mutatjuk be. A végső adatbázist tehát 85 személy alkotta.

#### *Bimodális Stroop-feladat*

A bimodális Stroop feladat egy kétválasztásos szemantikai kategorizációs feladat volt, amelyben párhuzamosan mutattunk be vizuális és auditoros ingereket. A vizuális ingerek állatnevek voltak (szürke háttéren, fehér betűkkel írva), melyeket a képernyő közepén mutattunk be 700 ms ideig. Az auditoros ingerek szintén állatnevek voltak, és hangszórókon játszottuk le őket kb. 45 dB erősséggel, 700 ms ideig. A kísérleti személyek feladata az volt, hogy szemantikai döntéseket hozzanak arról, hogy a hallott, vagy látott állatnév az emlősök, vagy a madarak szemantikai kategóriájába tartozik-e? Három kongruencia-kondíciót hoztunk létre. Kongruens próbák esetén a két inger pontosan ugyanazt az állatnevet jelölte (pl. „fecske” és „fecske”). Semleges próbákban az állatok neve nem egyezett meg, de a szemantikai kategória igen (pl. „zsiráf” és „vakond”). Az inkongruens próbákban pedig különböző szemantikai kategóriába tartozó állatneveket mutattunk be (pl. „fecske” és „zsiráf”). Jelzőingerek segítségével határoztuk meg, hogy az adott próbában melyik modalításban prezentált inger igényel válaszadást (míg a párhuzamosan bemutatott ingerre adandó választ gátolni kellett). A jelzőinger egy kék színnel írt „Auditoros” felirat, vagy egy zöld színnel írt „Vizuális” felirat volt, melyeket a képernyő közepén, 1000 ms ideig mutattunk be. Értelemszerűen előbbi felirat arra instruált, hogy a hallott ingerre, míg utóbbi arra, hogy a látott ingerre adjanak választ a személyek. Az auditoros és a vizuális próbák 12 próbánként váltakoztak. Válaszadásra az ingerek prezentációs idején túl még további 800 ms állt rendelkezésre (összesen tehát 1500 ms). A gyorsaság és a pontosság jelentőségét egyaránt hangsúlyoztuk a személyeknek. A válaszadás és a következő inger megjelenése közötti idő 500 és 3000 ms között változott. A feladat teljes

hossza 1,21 óra volt. A korábban már ismertetett eljárással, a kísérlet teljes ideje alatt regisztráltunk EKG-jeleket és az egyes intervallumokra kiszámoltuk a HRV-t. A nyugalmi EKG-mérések (feladat előtti és utáni mérések) hossza 5 perc volt.

Hasonlóan a korábbi vizsgálatokhoz, a feladatvégzés előtt, illetve azt követően is rögzítettük a szubjektív fáradtság szintjét (VAS) és az észlelt kognitív terhelés mértékét (NASA<sub>TLX</sub>). Az elemzések alapján a kísérleti személyek szubjektív fáradtságérzete jelentősen megnőtt a feladatot követően ( $t(26) = 7,81, p < 0,001$ ). Emellett a hosszantartó feladatvégzés során az észlelt kognitív terhelés mértéke annak minden aspektusában növekedett, az idői terhelés kivételével (Mentális terhelés:  $t(26) = 8,45, p < 0,001$ ; Fizikai terhelés:  $t(26) = 6,37, p < 0,001$ ; Teljesítmény:  $t(26) = 3,28, p < 0,01$ ; Erőfeszítés:  $t(26) = 5,68, p < 0,001$ ; Frustráció:  $t(26) = 4,58, p < 0,001$ ). Összegezve tehát, a bimodális Stroop feladat is növelte a szubjektív fáradtság és a kognitív terhelés mértékét.

### *HRV mutatók*

Mindhárom kísérletből négy EKG-intervallumot használtunk, amelyek mind 4 perc hosszúságúak voltak: a feladat előtti és utáni nyugalmi EKG méréseket, valamint a feladat első és utolsó 4 percét. Az előfeldolgozási szakaszban kiszámított HRV mutatók számát jelentősen megnöveltük a korábbi fejezetekben bemutatott vizsgálatokhoz képest (12 idő-tartományi mutató, 16 frekvencia-tartományi mutató és 5 nem-lineáris elemzésből származtatott mutató). A HRV több mutatóval történő jellemzésével az volt a célunk, hogy növelni tudjuk a modellek prediktív erejét. A túlillesztés elkerülése érdekében viszont minden algoritmus tanítását jellemző-kiválasztás („feature selection”) előzte meg (részletesebben lásd az alábbiakban).

### *Osztályozó algoritmusok*

Az osztályozó algoritmusok előkészítését és tanítását, valamint a jellemző-kiválasztást Python programozási nyelvben, a scikit-learn modul függvényeivel végeztük (verzió: 0.23.2, Pedregosa és mtsai., 2011). Az algoritmusok tanításának célja az volt, hogy előre megadott osztálycímkek („Fáradt” és „Nem-fáradt”) alapján a lehető legprecízebben tudják detektálni a fáradtságot. Az adatok típusa alapján kétféle tanulási feladatot különítettünk el, melyeket egymástól függetlenül hajtottunk végre: nyugalmi HRV alapján történő tanítás és kognitív feladatvégzés alatti HRV alapján történő tanítás. Az első feladat során „Nem-fáradt” címkét adtunk a fárasztás előtti nyugalmi HRV adatoknak, míg „Fáradt” címkét adtunk a fárasztás utáni nyugalmi HRV adatoknak. Hasonlóképpen, a másik tanulási feladat során a kognitív feladatvégzés első 4 perce kapta a „Nem-fáradt” címkét, a feladatvégzés utolsó 4 perce pedig a „Fáradt” címkét. Mivel a fáradtságot a szubjektív fáradtságérzet növekedésével

operacionalizáltuk, csak azon személyek adatait használtuk fel az osztályozó algoritmusok tanításához, akiknél a feladatvégzés utáni VAS skálán mért érték meghaladta a feladatvégzés előtti értéket. Ennek következtében az osztályozási feladatokhoz használt elemszám 82-re redukálódott, azonban fontos megjegyezni, hogy egy tanulási feladathoz személyenként két adattömb tartozott (fáradt és nem-fáradt), így a rendelkezésre álló adatmennyiség 164 volt változónként.

A túlillesztés elkerülése, valamint a komputációs idő redukálásának céljából jellemző-kiválasztást végeztünk, három lépésben. Először minden jellemzőre (vagy változóra) kiszámoltuk az F-értékeket (ANOVA teszt alapján), amely a számos eljárás közül az egyik legelterjedtebb (Abraham és mtsai., 2014). Második lépésben eltávolítottuk azokat a jellemzőket, amelyek magasan ( $r > 0,8$ ) korreláltak valamely másik jellemzővel. Ha két jellemző korrelált, akkor mindig azt választottuk ki, amelyiknek magasabb volt az F-értéke. Végül kiszámoltuk az átlagos F-értéket és eltávolítottuk azokat a jellemzőket, amelyek F-értéke nem haladta meg az átlagot. A jellemző-kiválasztást külön-külön végeztük el a nyugalmi-, és a feladatvégzés alatti HRV-n alapuló tanulási feladatokra. A nyugalmi HRV-n alapuló modellekhez a következő HRV mutatókat választottuk ki: szívfrekvencia minimum,  $\ln$ VLF, SD2, trianguláris index és HF. A második tanulási feladathoz pedig a következő mutatókat választottuk ki:  $\ln$ VLF,  $\ln$ LF, szívfrekvencia minimum, VLF (%), a szívfrekvencia szórása és hozzávetőleges entrópia.

A jellemzők kiválasztása után tanuló (70%) és teszt mintákra (30%) osztottuk az adatokat. Négy különböző tanuló algoritmussal is elvégeztük az osztályozást: tartóvektor géppel (support vector machine, SVM), a k-legközelebbi szomszédok módszerével (k-nearest neighbours, KNN), logisztikus regresszióval és döntési fával. Az első három módszer használata mellett elsősorban azért döntöttünk, hogy az eredményeinket összehasonlíthassuk a korábbi tanulmányok eredményeivel (Laurent és mtsai., 2013, Huang és mtsai., 2018), míg a döntési fa alkalmazásával az volt a célunk, hogy egy korábban még nem tesztelt módszer teljesítményét is vizsgáljuk. A döntési fa kivételével minden algoritmus tanítása előtt z-transzformációval standardizáltuk az adatokat. A modelleket rács-kereső (grid search) algoritmus segítségével optimalizáltuk. Az SVM-et a  $C$  ( $10^0$ ,  $10^1$ ,  $10^2$ ) és  $\gamma$  ( $10^0$ ,  $10^{-1}$ ,  $10^{-2}$ ) paraméterek, valamint két kernelfüggvény (lineáris és radiális bázis függvény) kombinációi alapján optimalizáltuk. A KNN esetében a  $k$  értékét (1-20 tartományban), a döntési fa esetében pedig a maximális mélységet (1-10 tartományban) optimalizáltuk. Végül a logisztikus regressziós modellt L2 regularizációval tanítottuk és a regularizáció erejének optimális értékét  $10^{-4}$  –  $10^4$  tartományban kerestük. Minden algoritmus teljesítményét 5-szörös keresztvalidáció

alapján határoztuk meg. Fontos megjegyezni, hogy a keresztvalidációt is a tanuló mintán végeztük el (tehát a tanuló mintát validáltuk 5 ciklusban, ahol minden ciklusban más részhalmaz szolgáltatott teszt mintaként), és az algoritmusok végső teljesítményét, vagyis a fáradtságdetekció pontosságát az alapján határoztuk meg, hogy a korábban még nem látott teszt minta („hold out data”) adatpontjait milyen pontosan tudják osztályozni. A teljesítmény meghatározása vevő működési karakterisztika (receiver operating characteristic, ROC) alapján, a görbe alatti terület (area under the curve, AUC) és a pontosság kiszámításával történt.

Annak meghatározása érdekében, hogy az osztályozó algoritmusok a véletlen szintjénél szignifikánsan magasabb hatékonysággal képesek-e detektálni a fáradtságot, permutációs tesztekkel végeztünk. A permutációs teszt minden iterációjában random módon összekevertük a modell változóit, amelyek így 50%-os eséllyel kaptak helyes osztálycímkét. Ezt követően az összekevert adatokon tanítottuk az algoritmusokat és a korábban nem látott adatokon határoztuk meg a pontosságukat, az AUC értékek alapján. Az így nyert 1000 AUC értékből hoztuk létre az AUC értékek null-eloszlását, amely alapján megállapíthattuk, hogy a valódi, vagyis a nem-kevert adatokon tanított modell tesztelésekor kapott AUC érték magasabb-e, mint a null-eloszlásban található értékek 95%-a.

### *Regressziós modellek*

A regressziós módszerek előkészítő lépéseit, illetve a modellek tanítását szintén Python nyelvben írt programmal, a scikit-learn modul függvényeivel végeztük (Pedregosa és mtsai., 2011). A kimeneti változó a feladat okozta változás mértéke volt a szubjektív fáradtságban, vagyis a feladat utáni VAS skála szintjéből kivontuk a feladat előtti szintet. A változó magasabb értékei tehát nagyobb mértékű fáradást jelentenek. A modellek tanítása előtt jellemző-kiválasztással szelektáltuk ki a legjobb prediktor változókat. Potenciális prediktor változók voltak elsősorban a feladat előtti nyugalmi HRV mutatók, továbbá egyéb paraméterek is, mint a nem, a szubjektív alvásidő, a kezdeti szubjektív fáradtság szintje, a feladatok típusa (Gatekeeper, modalitás-váltás, vagy Stroop) és a feladat időtartama (percben). Mivel a HRV mutatók jelentős mértékben korrelálnak egymással, a jellemző-kiválasztás módszerül egy zsugorítási módszert, a lasso regressziót választottuk, amely multikollinearitás fennállása esetén is hatékony (Tibshirani, 1996). A lasso regresszió alapján kiválasztott változók a következők voltak (zárójelben a regresszió által meghatározott fontosság értéke): RMSSD (0,28), SD2 (0,70), a feladat előtti szubjektív fáradtság szintje (0,37) és a feladat időtartama (0,22).

Legjobb tudomásunk szerint ez idáig nem született olyan tanulmány, amely a szubjektív fáradtság változását gépi tanulással, HRV adatok alapján becsülte volna meg, ezért olyan tanuló algoritmusokat használtunk, amelyek széles körben ismertek és gyakran alkalmazzák őket (lásd pl. Elhai, Yang, Rozgonjuk és Montag, 2020; Christ, Elhai, Forbes, Gratz és Tull, 2021). A következő algoritmusok használata mellett döntöttünk: lasso regresszió, elasztikus háló (elastic net) regresszió és véletlen erdő modell (random forest). Hasonlóan az osztályozási feladatokhoz, az adatbázist tanuló-, és tesztmintákra (80/20%) osztottuk, és 5-szörös keresztvalidációval optimalizáltuk az algoritmusokat. A tesztminta arányát 20%-ra csökkentettük, mert a regressziós modellek esetében 164 adatpont helyett pusztán csak 85 adatpontunk volt, ami 70/30%-os elosztásban a tanuló minta elégtelen mintanagysághoz vezetett volna. A lasso és elasztikus háló regressziók esetében az alfaértéket, míg a véletlen erdő modellben a maximális mélységet optimalizáltuk.

A validációt követően a korábban még nem látott, tesztelő minta adatpontjain jósltuk be a fáradás mértékét a modellek segítségével, majd kiszámoltuk a jóslt és a valós értékek közötti Pearson korrelációs együtthatót, az abszolút négyzetes eltérést (mean squared error, MSE), illetve az abszolút négyzetes eltérések négyzetgyökét (RMSE). A modellek teljesítményét továbbá az  $R^2$  értékkel is jellemeztük. Az osztályozó modellekhez hasonlóan, permutációs eljárással hipotézis-vizsgálatot is végeztünk, amely során a prediktor változók véletlenszerű összekeverése után tanítottuk a modelleket. Ezt 1000-szer ismételtük meg annak érdekében, hogy létrehozzuk az  $R^2$ -ek null-eloszlását. A tényleges modellek tesztelése során akkor tekintettünk szignifikánsnak egy modellt, ha az a null-eloszlás értékeinek 95%-ánál magasabb  $R^2$ -et produkált.

## 6.2. Eredmények

A nyugalmi, illetve a feladat alatti HRV adatokon tanított osztályozó algoritmusok teljesítményét a 3. táblázatban foglaltuk össze. Mind a táblázatban, mind az alábbi szöveges részben kizárólag az alapján jellemezzük a modelleket, hogy milyen teljesítményt mutattak a korábban nem látott teszt mintán. A feladat alatti HRV-n alapuló algoritmusok összességében hatékonyak bizonyultak a fáradtság detektálásában. A legjobb teljesítményt a SVM modell nyújtotta (lásd: 8. ábra A és B része), a radiális bázisfüggvény alkalmazásával ( $C = 10^0$ ,  $\gamma = 10^{-2}$ ). A permutáción alapuló hipotézis-vizsgálatok szerint az SVM mellett a KNN ( $k=18$ ) és a döntési fa (maximum mélység = 2) modellek bizonyultak szignifikánsnak.

Ezzel szemben a nyugalmi HRV adatokon alapuló modellek alacsonyabb teljesítményt mutattak, és a véletlen szintjénél nem tudták szignifikánsan magasabb valószínűséggel

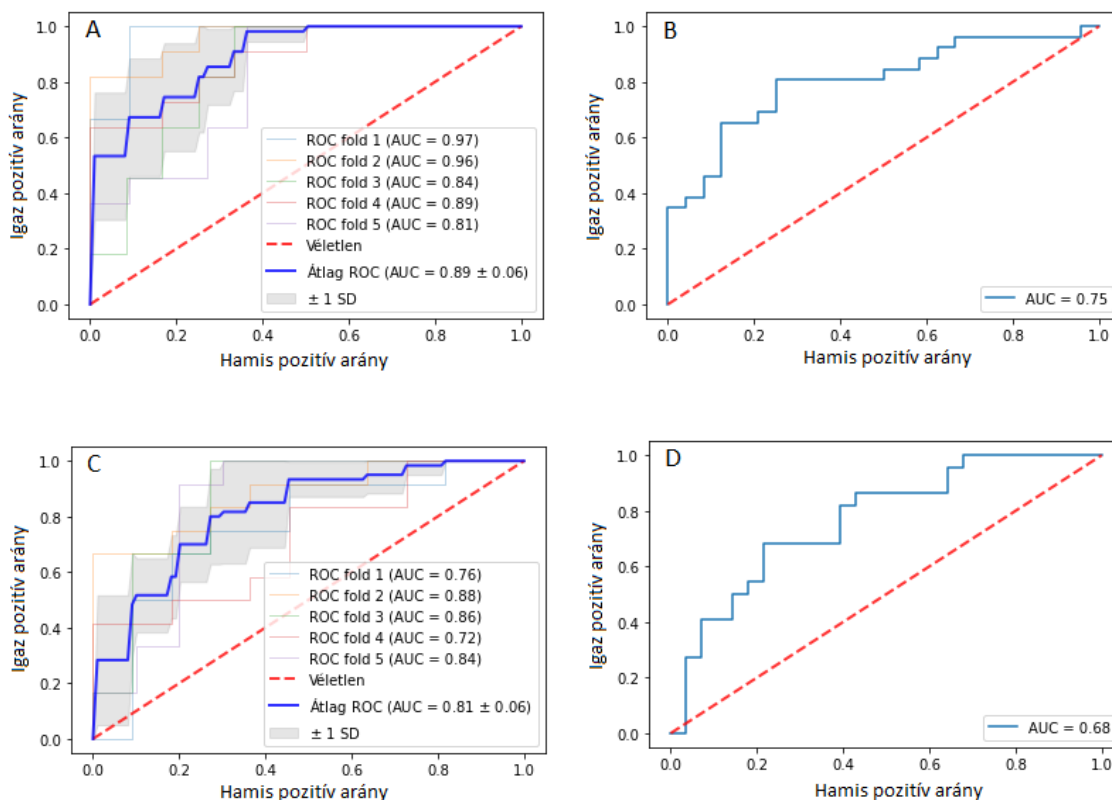
detektálni a fáradtságot a teszt mintán. A leghatékonyabb algoritmus az SVM volt (lásd: 18. ábra C és D része), azonban a permutációs teszt alapján ez a modell is csak marginálisan volt szignifikáns ( $p = 0,052$ ). Összegezve tehát azt találtuk, hogy a feladat alatti HRV adatokon tanított algoritmusok hatékonyan tudják detektálni a fáradtságot, és teljesítményben felülmúlják a nyugalmi HRV adatokon tanított modelleket.

**3. Táblázat.** Az osztályozó algoritmusok teljesítménye a teszt mintán ( $n=50$ )

Osztályozó modellek	Kéértékelési mutatók		
	AUC	Pontosság	$p$
<i>Feladat alatti HRV</i>			
Döntési fa	0,72	70%	0,04
KNN (k=18)	0,73	72%	0,02
Logisztikus regresszió	0,71	70%	0,07
SVM	0,75	74%	0,03
<i>Nyugalmi HRV</i>			
Döntési fa	0,65	62%	0,14
KNN (k=7)	0,68	66%	0,05
Logisztikus regresszió	0,65	62%	0,12
SVM	0,68	70%	0,05

*Rövidítések:* AUC = görbe alatti terület; KNN = legközelebbi szomszédok módszer; SVM = szupport vektor gép;  $p$  = permutációs teszten ( $n=1000$ ) alapuló  $p$ -érték

Összhangban az osztályozó modellek bemutatásával, a regressziós modellek esetében is csak azokról az eredményekről számolunk be, amelyeket a korábban nem látott teszt mintán nyertünk. A regressziós modellek értékelése a 4. táblázatban látható. A kezdeti szubjektív fáradtság, a feladat időtartama, valamint a nyugalmi SD2 és az RMSSD változók alapján legpontosabban az elasztikus háló regresszióval tudtuk bejósolni a fáradás mértékét ( $\alpha = 0,002$ ). A bejósolt és a valós adatok mérsékelten korreláltak egymással ( $r = 0,495$ ). Szintén hatékony modellnek bizonyult a fáradás mértékének előrejelzésében a lasso regresszió is ( $\alpha = 0,024$ ). Hasonlóan az elasztikus háló regresszióhoz, a bejósolt és a valós adatpontok közötti korreláció mérsékelten magas volt ( $r = 0,490$ ). A véletlen erdő (maximum mélység = 1) módszert ugyanakkor nem találtuk alkalmasnak a szubjektív fáradás bejósolására.



**8. Ábra.** A legjobb teljesítményt mutató SVM algoritmusok tanítása és tesztelése feladat alatti-, illetve nyugalmi HRV adatokon. (A) Az algoritmus tanításának folyamata a tanuló mintán, feladat alatti HRV adatokon; (B) A modell tesztelése a korábban nem látott teszt mintán, feladat alatti HRV adatokon; (C) Az algoritmus tanításának folyamata a tanuló mintán, nyugalmi HRV adatokon; (D) A modell tesztelése a korábban nem látott teszt mintán, nyugalmi HRV adatokon.

**4. Táblázat.** A szubjektív fáradás mértékét bejósoló regressziós modellek teljesítménye a teszt mintán

Regressziós modellek	Kiértékelési mutatók			
	$R^2$	MSE	RMSE	$p$
<i>Elastikus háló</i>	0,21	255,90	16,00	0,01
<i>Lasso</i>	0,19	261,92	16,18	0,02
<i>Véletlen erdő</i>	0,03	256,44	16,01	0,34

*Rövidítések:* MSE: átlagos négyzetes eltérés; RMSE: az átlagos négyzetes eltérés négyzetgyöke;  $p$ : permutációs teszten (n=1000) alapuló p-érték

### 6.3. Megvitatás

Vizsgálatunkban a feladat alatti HRV-n alapuló algoritmusok teljesítménye hasonlóan bizonyult a korábbi tanulmányokban közölt eredményekkel, amelyek szintén 70-80% közötti pontosságról számoltak be (Laurent és mtsai., 2013; Huang és mtsai., 2018). Fontos különbség azonban, hogy a mi vizsgálatunkban az algoritmusok úgy érték el megközelítőleg ugyanazt a detekciós teljesítményt, hogy az adatok forrása változatosabb volt, mivel más-más paraméterekkel (pl. a feladat időtartama, kognitív terhelés mértéke stb.) rendelkező feladatok idézték elő a fáradtságot. Ezt és a magasabb elemszámot figyelembe véve arra következtethetünk, hogy az általunk tanított algoritmusok hatékony működését többféle helyzetre általánosíthatjuk, vagyis a fáradtságot másfajta, akár mindennapi helyzetekben is precízebben detektálhatják. Emellett azt találtuk, hogy a nyugalmi HRV-n alapuló algoritmusok kevésbé pontosak, mint a feladat alatti HRV-n tanított algoritmusok, aminek fontos módszertani és praktikus implikációi lehetnek. Végül két regressziós modell, az elasztikus háló-, és a lasso regresszió hatékonyan bizonyult abban, hogy négy változó, az RMSSD, az SD2, a kezdeti szubjektív fáradtság és a feladat időtartama alapján bejósolják a szubjektív fáradtság változását hosszantartó kognitív feladatokat követően. Az eredményeink tehát azt mutatják, hogy biológiai szignálok, szubjektív mutatók és a végrehajtandó kognitív feladat paraméterei alapján becslést tehetünk arra vonatkozóan, hogy a feladat milyen mértékben fogja megnövelni a fáradtságérzetet már annak megkezdése előtt is.



## 7. A disszertáció alapját képező vizsgálatok eredményeinek összefoglalása

Az első vizsgálat célja az volt, hogy fenntartott figyelmet igénylő feladat során teszteljük a mozgás előkészítési és végrehajtási szakaszainak fáradtságérzékenységét. Várokosságainknak megfelelően, a mozgáselőkészítési szakaszra reflektáló iniciációs idő mindhárom kísérletben jelentősen növekedett a feladattal töltött idővel. A növekvő iniciációs idő mögött nagy valószínűséggel nem az orientációs figyelem zavara állhatott. Ezt a következtetést három kísérlet empirikus bizonyítékai is támogatták. Egyfelől a szakkádok latenciája mindhárom kísérletben változatlan maradt, ami az intakt téri orientáció jele lehet. Másfelől az iniciációs idő növekedést mutatott akkor is, amikor a feladat téri komplexitása, valamint a végrehajtandó mozgások nehézsége jelentősen alacsonyabb volt (2. kísérlet). Végül a harmadik kísérletben azt találtuk, hogy az iniciációs idő csak a jelzőinger nélkül kondícióban emelkedett, tehát a mozgásiniciáció lassulását nem figyeltük meg azokban próbákban, melyekben a célinger megjelenésének idői vagy téri lokalizációját jelzőingerek indikálták. A harmadik kísérlet eredményei tehát amellett, hogy megerősítették a figyelmi orientációs képesség változatlan szintjét a feladatban, arra is rávilágítottak, hogy az iniciációs idő növekedése mögött nem a fázisos éberség csökkenése állhat. Ebből kiindulva arra a következtetésre jutottunk, hogy az eredményeinket legjobban a tónusos arousal szint csökkenésével tudjuk magyarázni, ami a hosszú ideig tartó, fenntartott figyelmet igénylő feladatok gyakori velejárója (Oken és mtsai., 2006; Coste és Kleinschmidt, 2016). A mozgás-végrehajtás szakaszában stratégiaváltást figyeltünk meg a fáradtság hatására: a mozgások gyorsabbá, de pontatlanabbá váltak, ami csökkent impulzivitás-kontrollra utalhat. Fontos azonban megjegyezni, hogy a stratégiaváltásra egyértelmű empirikus bizonyítékot csak a második kísérletben találtunk. Ezt a megváltozott feladatvégrehajtási stratégiát magyarázhatjuk a Kompenzációs Kontroll Modellel is, amely alapján a fáradtság kompenzálásaként a személyek a feladat egyik aspektusára (a precizításra) kevésbé fókuszáltak, vagyis feltehetőleg csökkentették saját elvárásaikat a pontosságra vonatkozó teljesítmény tekintetében (Hockey, 1997, 2011). Végül, alkalmazott tudományi szempontból fontos eredmény lehet, hogy az impulzív mozgáskivitelezés még jellemzőbb volt, amikor a személyek fáradt állapotban voltak és a célingereket auditoros figyelemfelkeltő (centrális) jelzőinger előzte meg (3. kísérlet), jelezve ezzel egyes jelzőingerek potenciálisan negatív hatását fáradt személyeknél.

A második vizsgálatban a fáradtsághoz kapcsolódó autonóm idegrendszeri változások kaptak nagyobb hangsúlyt. Alátámasztást nyert az az előzetes feltevésünk, hogy egy fárasztó bimodális munkamemória-feladat során a HRV paraszimpatikus aktivitásra reflektáló (vagus-

mediálta) mutatóinak értéke növekedni, míg a kevésbé fárasztó dokumentumfilm-nézés alatt stagnálni fog. A kísérlet fontos eredménye, hogy a vagus-mediálta HRV-mutatókkal ellentétben a többi HRV-mutató a hosszú ideig tartó, de fáradtságot nem okozó dokumentumfilm nézés alatt is emelkedett. Ez egyfelől hangsúlyozza a kontrollhelyzetek fontosságát a fáradtságkísérletekben, másfelől pedig rámutat arra, hogy egyes HRV-mutatók kevésbé megbízható biomarkerei lehetnek a fáradtságnak. A fárasztó feladatban a vagus-mediálta mutatók által indikált paraszimpatikus rendszer fokozódó aktivitása továbbá nem járt együtt motivációs deficittel, amire abból következtethetünk, hogy a helytelen válaszadásokat követő szívfrekvencia-, és reakcióidő-lassulás a feladat során végig jellemző volt. A HRV-hez hasonlóan a szívfrekvencia a kísérlet minden fázisában változásokat mutatott: a reaktivitási időszakban megemelkedett, a feladattal töltött idővel, illetve a regenerálódási szakaszban viszont csökkent. Végül a pszichofizikai mutatók elemzése alapján a feladattal töltött idővel csak kis mértékben csökkent a kognitív teljesítmény, illetve nem találtunk bizonyítékot arra, hogy az auditoros vagy a vizuális ingereken alapuló információfeldolgozás érzékenyebb lenne a fáradtságra. Ezzel szemben a fáradás utáni rövid szünetet követően jelentősen javult a teljesítmény, így kísérletes evidenciát találtunk arra, hogy a szünet olyan feladatokban is jótékony lehet, amelyek bimodális ingereken alapulnak és osztott figyelmet igényelnek.

A harmadik vizsgálatban a modalitás-megfelelőség hipotézis (Welch és Warren, 1980) és a Kompenzációs Kontroll Modell (Hockey, 1997, 2011) alapján azt feltételeztük, hogy egy bimodális idődiszkriminációs feladatban a fáradtság hatására a kognitív teljesítmény a vizuális próbákban fog csökkenni, mivel a temporális információ feldolgozása az auditoros modalitásban egyszerűbb, mint a vizuálisban. Ez a hipotézis a vizsgálatban alátámasztást nyert. Várakozásainknak megfelelően azt is kimutattuk továbbá, hogy a feladattal töltött idővel különösen nehezzé vált az auditoros zavaró ingerek kizárása olyan próbákban, amikor a célinger vizuális volt. A pszichofizikai mutatókban talált eredmények jól magyarázhatók a Kompenzációs Kontroll Modellel, amelynek értelmében a fáradtság hatására a vizsgált személyek kisebb figyelmet fordítottak a feladat másodlagos aspektusának, a vizuális modalitásnak. Ezzel az interpretációval konzisztensek a szív működéséhez kapcsolódó adatok elemzésének eredményei is: a feladattal töltött idővel a szívfrekvencia csökkent, a vagus-mediálta HRV-mutatók pedig emelkedtek, vagyis a kísérleti személyek valószínűleg nem tettek többlet erőfeszítéseket a teljesítmény fenntartása érdekében, hanem inkább stratégiát váltottak (Hockey, 2011). A HRV-elemzés során kapott eredmények továbbá nem csak a kognitív teljesítmény változásának értelemezésében segítettek, de megerősítették a második vizsgálat legfontosabb eredményeit is, vagyis hogy a fáradtság növekedésével a paraszimpatikus

idegrendszer aktivitása fokozódik. A szünet hatásait illetően azonban kisebb a vizsgálataink eredményeinek konzisztenciája, mivel a szünetet követően csak kismértékű javulást találtunk a teljesítményben, ami kizárólag az egyszerűbb auditoros próbákra korlátozódott.

Végül a negyedik vizsgálatban gépi tanulási módszerekkel tettünk kísérletet arra, hogy a fáradtságot HRV adatok használatával detektáljuk, valamint hogy a kognitív feladatok okozta szubjektív fáradtság mértékét nyugalmi HRV adatok és egyéb változók alapján jósoljuk be. A feladat alatt mért HRV adatokon tanított algoritmusok közel 75%-os pontossággal tudták detektálni a fáradtságot, ami nagyjából megegyezik a korábbi vizsgálatok eredményeivel (Laurent és mtsai., 2013; Huang és mtsai., 2018). A nyugalmi HRV adatokon tanított algoritmusok viszont pontatlanabbnak bizonyultak, sőt a permutációs tesztek szerint nem teljesítettek jobban a véletlen szintjénél, szemben a feladat alatti HRV-n tanuló modellekkel. A legjobb módszernek mindkét tanítási feladat esetében az SVM bizonyult. A szubjektív fáradtság mértékét bejósoló regressziós modellek közül kettő, az elasztikus háló és a lasso regresszió segítségével tudtuk hatékonyan előre jelezni a kognitív feladatok által kiváltott fáradtságérzet mértékét. Az előrejelzéshez a regressziós modellekbe négy változót építettünk: két nyugalmi HRV mutatót (SD2 és RMSSD), a feladat előtti szubjektív fáradtság szintjét és a feladat időtartamát. Ezek a modellek tehát már a feladat megkezdése előtt képesek voltak precízen megbecsülni a feladat okozta növekedést a fáradtságban.

## 8. Publikációk

### *A tézisekhez kapcsolódó publikációk*

Matuz, A., Van der Linden, D., Kisander, Z., Hernádi, I., Karádi, K., Csathó, Á. (2021). Enhanced cardiac vagal tone in mental fatigue: analysis of heart rate variability in time-on-task, recovery, and reactivity. *PLoS ONE* 16(3): e0238670. (Impakt faktor: 2,74)

Matuz, A., Van der Linden, D., Topa, K., & Csathó, Á. (2019). Cross-modal conflict increases with time-on-task in a temporal discrimination task. *Frontiers in psychology*, 10, 2429. (Impakt faktor: 2,13)

### *A tézisekhez nem kapcsolódó publikációk*

Elek, Z., Rónai, Z., Hargitai, R., Réthelyi, J., Arndt, B., Matuz, A., Csathó, Á., Polner, B. & Kállai, J. (2020). Magical thinking as a bio-psychological developmental disposition for cognitive and affective symptoms intensity in schizotypy: Traits and genetic associations. *Personality and Individual Differences*, 110498. (Impakt faktor: 2,31)

Zsido, A. N., Csatho, A., Matuz, A., Stecina, D. T., Arato, A., Inhof, O., & Darnai, G. (2019). Does threat have an advantage after all?—Proposing a novel experimental design to investigate the advantages of threat-relevant cues in visual processing. *Frontiers in psychology*, 10, 2217. (Impakt faktor: 2,13)

Zsido, A. N., Matuz, A., Inhof, O., Darnai, G., Budai, T., Bandi, S., & Csatho, A. (2019). Disentangling the facilitating and hindering effects of threat-related stimuli—A visual search study. *British Journal of Psychology*. (Impakt faktor: 3,24)

Birkás, B., Matuz, A., & Csathó, Á. (2018). Examining the deviation from balanced time perspective in the Dark Triad throughout adulthood. *Frontiers in psychology*, 9. (Impakt faktor: 2,09)

Matuz, A. (2017) A szemantikus feldolgozás féltekei lateralizációja kettős feladatvégzés során: A vigilanciaszint csökkenésének hatásai In: Böhm, G.; Czeferner, D.; Fedeles, T. (szerk.) *Specimina operum iuvenum 5. Szemelvények 4.* PTE-BTK

*A tézisekhez kapcsolódó prezentációk*

Matuz, A. & Csathó, Á. (2021) Estimating and detecting mental fatigue based on heart-rate variability: a machine learning approach. *DOSZ Egészségtudományi és Innovációs Konferencia*, Budapest (online előadás)

Matuz, A. & Csathó, Á. (2020) Resting or task? - A comparison of machine learning-based mental fatigue detection from resting and task-related heart-rate variability data. *9<sup>th</sup> Interdisciplinary Doctoral Conference*, Pécs (online előadás)

Matuz, A. & Csathó, Á. (2020) Detection of acute mental fatigue based on heart-rate variability: a machine learning approach. *Medical Conference for PhD Students and Experts of Clinical Sciences*, Pécs (online előadás)

Matuz, A.; Schwarcz, B.; Topa, J. K.; Magyar, T. & Csathó, Á. (2019) Perceived duration of cognitively demanding tasks: the role of cognitive load and time-on-task. *61st Tagung experimentell arbeitender Psychologen*, London, Egyesült Királyság (poszter prezentáció)

Matuz, A.; Topa, J. K. & Csathó, Á. (2018) Resting heart-rate variability predicts susceptibility to mental fatigue in a demanding cognitive task. *19th World Congress of Psychophysiology*, Lucca, Olaszország (poszter prezentáció)

Matuz, A.; Simon, O.; Hernádi, I.; Kisander, Zs.; Karádi, K. & Csathó, Á. (2018) Fatigue and resting related changes in a dual two-back task. *60th Tagung experimentell arbeitender Psychologen*, Marburg, Németország (előadás)

Matuz, A.; Simon, O.; Hernádi, I.; Kisander, Zs.; Karádi, K. & Csathó, Á. (2018) A mentális fáradtság és a pihenés hatásai bimodális munkamemória feladatban: pszichofizikai és elektrokardiogram elemzés. *A Magyar Pszichológiai Társaság XXVII. Országos Tudományos Nagygyűlése*, Budapest (előadás)

Csathó, Á.; Matuz, A.; Simon, O. & Hernádi, I. (2018) Switching between two modalities under fatigue. *60th Tagung experimentell arbeitender Psychologen*, Marburg, Németország (poszter prezentáció)

Matuz, A. (2018) Szívleljük-e a fáradtságot? – A mentális fáradtság hatása a szívfrekvencia-variabilitásra. *XI. Nemzetközi és XVIII. Országos Interdiszciplináris Grastyán PhD. és TDK Konferencia*, Pécs (előadás)

Csathó, Á.; Matuz, A. & Hernádi, I. (2017) Simultaneous attention to visual and auditory information under fatigue. *FENS Regional Meeting*, Pécs (poszter prezentáció)

## 9. Köszönetnyilvánítás

Mindenek előtt köszönettel tartozom témavezetőmnek, Dr. Csathó Árpádnak, aki szakértelmével és baráti támogatásával nemcsak az értekezés elkészülését segítette nagymértékben, de felvértezett minden olyan tudással is, amelyek elengedhetetlenek a sikeres akadémiai pályához. Köszönöm neki továbbá azt is, hogy egyes, szélesebb körben kevésbé ismert matematikai jelenségek explorációját szoros együttműködésben végezhettük.

Szeretném megköszönni programvezetőmnek, Prof. Dr. Kállai Jánosnak, hogy a Viselkedéstudományok Doktori Iskola Program keretei közt végezhettem doktori tanulmányaimat, továbbá, hogy támogatta kutatói munkámat, illetve nemzetközi konferenciákon való tapasztalatszerzésemet.

Hálásan köszönöm a Magatartástudományi Intézet valamennyi munkatársának az elmúlt években nyújtott segítségét. Külön köszönetet szeretnék mondani az intézet korábbi igazgatójának, Prof. Dr. Füzesi Zsuzsannának, valamint kollégáimnak, Dr. Birkás Bélának, Dr. Darnai Gergelynek, Dr. Gács Borókának és Simon Eszternek, akik mind szakmailag, mind barátilag támogattak.

Köszönetemet fejezem ki továbbá Dr. Dimitri van der Lindennek, Dr. Hernádi Istvánnak, Dr. Lábadi Beatrixnek, Dr. Zentai Norbertnek, Dr. Zsidó András Norbertnek, Bandi Szabolcsnak és Kisander Zsoltnak is a közös munkáért, szakmai tanácsaikért és baráti biztatásaikért.

Köszönöm Dr. Hejmel Lászlónak, hogy PhD kurzusának egyedüli hallgatójaként is rendkívül magas színvonalú oktatást nyújtott számomra a biológiai jelfeldolgozás és a szívfrekvencia-variabilitás területén.

Hálás vagyok a kísérleteim résztvevőinek is, akik hajlandóak voltak akár 3 órát is a laborban tölteni, aminek jelentős részét fárasztó feladatvégzés vagy éppen várakozás képezte, amennyiben a szokatlanul magas gyakoriságú technikai anomáliák egyike volt aktuálisan tapasztalható.

Végül, nagy köszönet illeti feleségemet, szüleimet, nővéremet és barátaimat is, akik páratlan türelemről és kiemelkedő érzelmi intelligenciáról tettek tanúbizonyságot a PhD tanulmányaim során.