

EÖTVÖS LORÁND TUDOMÁNYEGYETEM  
PEDAGÓGIAI ÉS PSZICHOLÓGIAI KAR

**Takács Endre**

**KONTROLLÁLT ÉS INGERVEZÉRELT FOLYAMATOK  
NORMÁL ÉS EXTRÉM KÖRÜLMÉNYEK KÖZÖTT:  
ELEKTROFIZIOLÓGIAI ÉS VISELKEDÉSES EREDMÉNYEK**

– PhD téziszfüzet –

PSZICHOLÓGIAI DOKTORI ISKOLA

A Doktori Iskola vezetője: Dr. Demetrovics Zsolt, PhD, DSc

KOGNITÍV PSZICHOLÓGIA PROGRAM

Programvezető: Dr. Király Ildikó, PhD

Témavezető: Dr. Balázs László, PhD



Budapest, 2019

## BEVEZETÉS

Az emberi viselkedés számos aspektusát meghatározzák a kontrollált és ingervezérelt folyamatok (Schneider és Shiffrin, 1977). A kontrollált folyamatok saját, belső viselkedési terveink megnyilvánulásának tekinthetőek, míg az ingervezérelt folyamatok a külvilág ingerei által elindított, csaknem teljesen automatikus feldolgozási folyamatok. A kontrollált folyamatok egyik legismertebb példája a végrehajtó funkciók, amelyek más, alacsonyabb rendű funkciók összehangolását végzik (Friedman és Miyake, 2017). Az ingervezérelt folyamatok tipikus megjelenési formája pedig a szálens, kiugró ingerek által kiváltott orientációs reakció. A kontrollált és ingervezérelt folyamatok konceptuális szempontból élesen elkülöníthetőek, de a legtöbb valós helyzetben szinergiában működnek, ilyen például a nehezen kivehető ingerek észlelése vagy az orientációs reakció okozta viselkedésmódosítás, amely sok esetben az újonnan megjelenő ingerek explorációjához vezet.

Az orientációs reakció jól lekövethető elektrofiziológiai módszerekkel, ugyanis a szálens ingerek kiváltanak egy nagy amplitúdójú eseményhez kötött potenciált, a P3a-t (Escera és Corral, 2007; Friedman és mtsai, 2001; Schomaker és Meeter, 2015). A P3a a fej középvezetékén, a centrális, frontocentrális elektródákon maximális, csúcslatenciája pedig 250-400 ms közé tehető az inger megjelenése után. Noha a különböző modalitások némileg eltérő hullámformájú és eloszlású P3a-t váltanak ki, a P3a javarészt modalitásfüggetlennek tekinthető. A három legfontosabb sajátosság, ami meghatározza a P3a nagyságát, az inger újszerűsége, komplexitása és ritkasága. A leggyakoribb kísérleti paradigma a P3a kiváltására az ún. háromingeres kakukktojás feladat (Courchesne, Hillyard és Galambos, 1975), ahol gyakori, sztereotip ingerek között ritka célingerek és ritka irreleváns, de szálens ingerek jelennek meg – a P3a-t ez utóbbi váltja ki.

Több eredmény utal arra, hogy a P3a nagysága jelentős mértékben függ a figyelmi folyamatok intenzitásától. Párhuzamosan végzett, ún. kettősfeladatok esetén a másodlagos jelentőségű feladat ingerei által kiváltott P3a amplitúdója jelentősen lecsökken, ha az elsődleges feladat nehezebbé válik (Legrain, Bruyer, Guérit és Plaghki, 2005; SanMiguel és mtsai, 2008; Ullsperger, Freude és Erdmann, 2001; Zhang, Chen, Yuan, Zhang és He, 2006). Hasonló jelenség fedezhető föl az ún. P3a nehézségi hatás háttérében is: ha nehezebbé válik különböző ingerek perceptuális szempontból való összehasonlítása, akkor az ezen ingerek helyén érkező irreleváns ingerek nagyobb P3a-t váltanak ki (Comerchero és Polich, 1999; Hagen, Gatherwright, Lopez és Polich, 2006; Kimura, Katayama és Murohashi, 2008; Polich és Comerchero, 2003; Sawaki és Katayama, 2006, 2007; Sugimoto és Katayama, 2017). A disszertáció 1. tanulmányában ezt a jelenséget vizsgáltuk a korábbi kutatásokban használttól eltérő idői paraméterekkel.

A feladatnehézség mellett fontos meghatározója a figyelmi folyamatok intenzitásának a személyes erőfeszítés. A különböző stresszfaktorok hatásának ellensúlyozására a legtöbb ember tudatosan vagy tudattalanul, de kompenzatorikus erőfeszítéssel reagál (Hockey, 2011; Hockey, 1997). Ilyen, mindenki által jól ismert stresszfaktor lehet a hosszantartó, megerőltető szellemi munkavégzés, amely gyakran a mentális fáradtság érzéséhez vezet. Le lehet-e követni ezt a fajta kompenzatorikus viselkedést elektrofiziológiai jelekkel? Ha a P3a érzékenyen reagál a figyelem feladatnehézség által kiváltott növekedésére, akkor érzékeny lesz a kompenzatorikus erőfeszítésre is? A disszertáció 2. tanulmányában ennek kívántunk utánajárni. A mentális fáradtság irodalmából ismert fárasztási manipulációval kívántuk elérni, hogy a kísérleti személyek kompenzatorikus erőfeszítést tegyenek, melynek lekövetésére a P3a-t alkalmaztuk.

A végrehajtó funkciók egyik legismertebb felosztása szerint három egymással összefüggő, de mégis elkülöníthető alfunkció létezik, a gátlás, a váltás

és a frissítés (Miyake és mtsai, 2000). A gátlási végrehajtó funkciók felelnek az erős, már-már automatikus viselkedési folyamatok lassításáért, kontrollálásáért, és olyan kognitív pszichológiai feladatokkal vizsgálhatóak, mint a Stroop, a go/nogo vagy a stop-szignál feladat. Az orientációs reakció központi eleme a meglévő tevékenységgel való gyors felhagyás (gátlás) és egy új viselkedési szekvencia követése (váltás), ekként mechanizmusok szintjén is rokonítható a végrehajtó funkciók alapfolyamataival. Ez a felismerés motivált bennünket abban, hogy közös vizsgálatban teszteljük a végrehajtó funkciókat és a P3a-t a disszertáció 3. tanulmányában. Ebben a kísérletben extrém körülmények közé helyeztük kísérleti személyeinket, hogy ezáltal teszteljük, hogy vajon hasonló változást mutat-e a két funkció. Ez az extrém körülmény az oxigénhiány (hypoxia) volt.

Az akut hypoxia a katonai és civil repülés, illetve az expedíciós hegymászás egyik legnagyobb veszélyforrása, köszönhetően annak, hogy a kognitív teljesítőképesség rohamos romlásához vezet. Függgően a hypoxia mértékétől, a kísérleti személyek gyakran általános teljesítményromlást mutatnak az alkalmazott feladatokban. A disszertáció 4. tanulmányában azt vizsgáltuk, hogy a különböző gátlási végrehajtó funkciók egységesen reagálnak-e a hypoxiára vagy léteznek hypoxiának jobban ellenálló végrehajtó funkciók.

## TÉZISEK

### *1. A P3a nehézségi hatás kiváltható a feladatnehézség rövid idői távon belüli változtatásával<sup>1</sup>*

#### Célok

Katayama és Polich (1998) voltak az elsők, akik kimutatták, hogy a perceptuális feladatnehézség milyen jelentős hatással van az irreleváns ingerek által kiváltott agyi válaszra. A szerzők a háromingeres kakukktójás paradigmát használták, ahol mind a gyakori sztenderd, mind a ritka célinger, mind a ritka irreleváns inger egyszerű szinuszos hang volt, amelyek csak frekvenciában különböztek egymástól. Kísérletükben azokban a blokkokban, amikor a sztenderd és célinger közötti perceptuális különbség nagy (a feladat pedig emiatt könnyű) volt, az irreleváns hangok egy kis amplitúdójú, parietális maximumú pozitívítást váltottak ki, mely a téri eloszlása alapján a P3b komponenshez hasonlított. Azonban mikor a sztenderd és a célinger közötti perceptuális különbség kicsiny (a feladat pedig emiatt nehéz) volt, az irreleváns inger egy jóval nagyobb és elülsőbb eloszlású pozitívítást váltott ki, amely a P3a-hoz volt hasonló.

Kísérletünk célja annak vizsgálata volt, hogy akkor is kiváltható-e a P3a nehézségi hatás, ha rövid (néhány másodperces) idői távon belül változik a feladatnehézség.

#### Módszerek

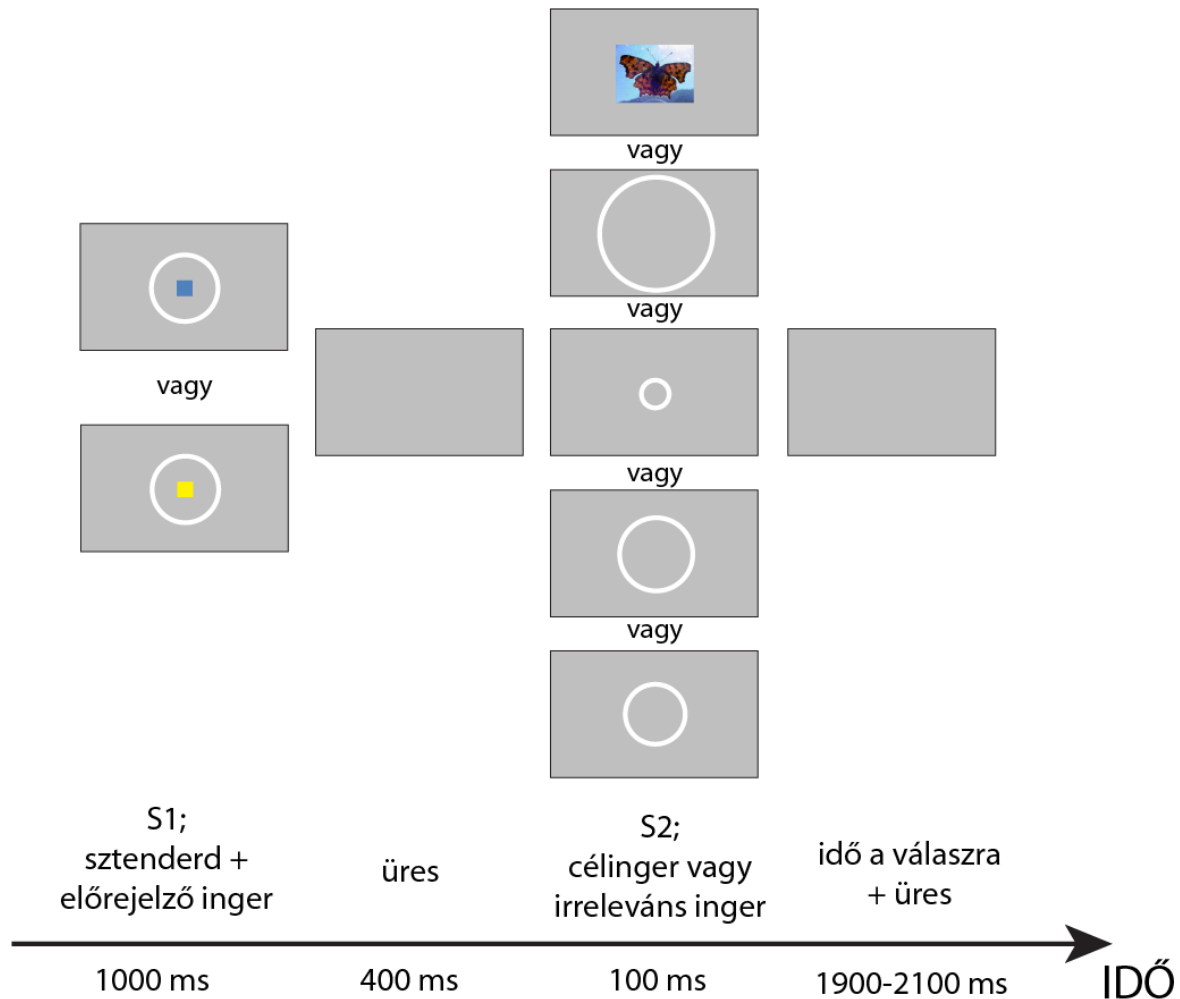
A fiatal, felnőtt kísérleti személyek (n=21) egy kétválasztásos diszkriminációs feladat két verzióját végezték a kísérlet során. A feladat sematikus ábrázolása az 1. ábrán követhető. A kísérleti személyek feladata annak eldöntése volt, hogy a sorban

---

<sup>1</sup> a kézirat még nem került publikálásra

másodjára bemutatott kör (célinger) kisebb vagy nagyobb méretű volt, mint az először bemutatott (sztenderd). A két inger megjelenése között 1,4 másodperc telt el. A kísérleti ún. blokkos verziójában a kb. 6 perces feladatblokk során állandó volt, hogy mekkora fizikális különbség volt a sztenderd és a célinger között. Bizonyos blokkokban nagy különbség volt (a feladat ebben az esetben könnyű volt), másokban kicsiny (a feladat ebben az esetben nehéz volt), ezzel követve a klasszikus P3a nehézség-hatást vizsgáló kutatások felépítését. A kísérlet ún. próbás verziójában a feladatnehézség próbáról-próbára random változott. A sztenderd ingerrel együtt bemutatott előrejelző inger jelezte, hogy az adott próbában nagy vagy kis különbség lesz a sztenderd és a célinger között.

A kísérlet mindkét verziójában az esetek 12%-ában a célinger helyett irreleváns ingereket mutattunk be, melyek célja a P3a kiváltása volt. Hipotézisünk az volt, hogy a feladatnehézség hatással lesz az irreleváns inger által kiváltott P3a amplitúdójára, és nagyobb P3a-t fogunk regisztrálni a kísérlet mindkét verziójában, akkor, ha a feladat nehéz, mint amikor könnyű.

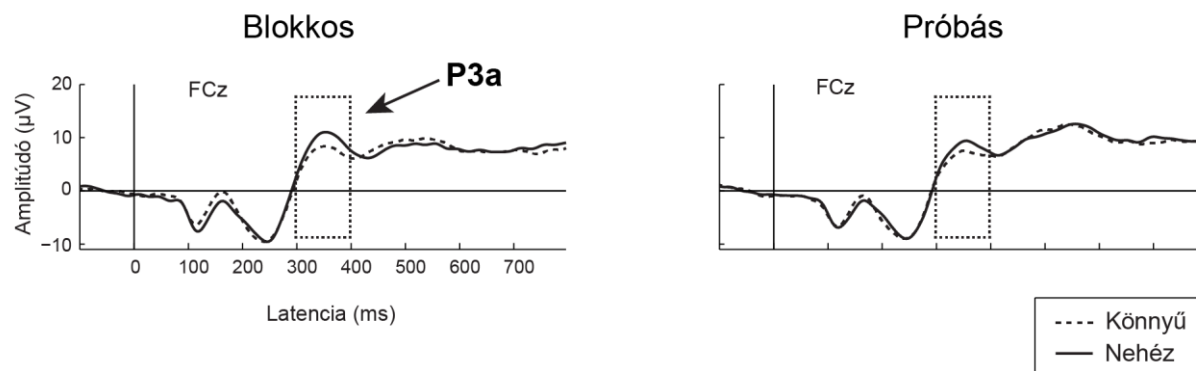


**1. ábra. A kísérleti ingerek a feladat próbás verziójában.** A kísérleti személyek feladata annak eldöntése volt, hogy a célinger nagyobb vagy kisebb volt, mint a sztenderd inger. Az irreleváns ingereket (pillangók képei) figyelmen kívül kellett hagyni. A blokkos verzióban egyféle előrejelző inger és kétféle célinger került megjelenítésre egy adott feladatblokkon belül.

### Eredmények

A kísérlet hipotézisének megfelelően az irreleváns ingerek nagyobb P3a-t váltottak ki a nehéz, mint a könnyű feladathelyzetben, és e tekintetben nem volt különbség a kísérlet blokkos és próbás verziója között (lásd 2. ábra).

## Irreleváns inger



**2. ábra. Az irreleváns inger által kiváltott EKP-k.** A szaggatott vonallal rajzolt téglalap a P3a mérési ablakát jelzi. A P3a amplitúdója mind a blokkos, mind a próbás feladatverzióban nagyobb volt a nehéz, mint a könnyű kondícióban.



## ***2. A P3a alkalmas lehet a mentális fáradtság következtében fellépő kompenzatorikus erőfeszítés vizsgálatára<sup>2</sup>***

### Célok

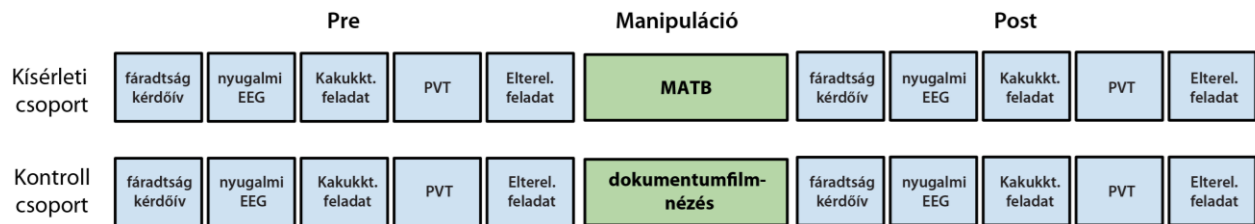
A hosszan tartó, megterhelő feladatvégzés természetes következménye a kompenzatorikus erőfeszítés. Kísérletünk célja annak vizsgálata volt, hogy a P3a alkalmas lehet-e a kompenzatorikus erőfeszítés követésére. A kompenzatorikus erőfeszítést azzal kívántuk facilitálni, hogy a kísérletben szereplők egyik csoportját hosszan tartó (két órás), megterhelő feladatvégzésnek tettük ki.

### Módszerek

A kísérlet a fárasztó feladat-tesztelő feladat eljárást követte (lásd 3. ábra). A kísérleti személyek (fiatal felnőttek, n=36) két csoportra osztva vettek részt a kísérletben. A kísérleti csoport tagjai a kísérlet középső szakaszában egy megterhelő, multimodális feladatot végeztek (az ún. MATB feladatcsomagot), míg a kontrollcsoport tagjai ez idő alatt ismeretterjesztő filmeket néztek. A kísérlet első és harmadik részében a két csoport ugyanazokat a feladatokat végezte el. Ezen feladatok közül kettő (a Kakukktojás feladat és az Elterelődési feladat) a P3a komponens kiváltására szolgált.

---

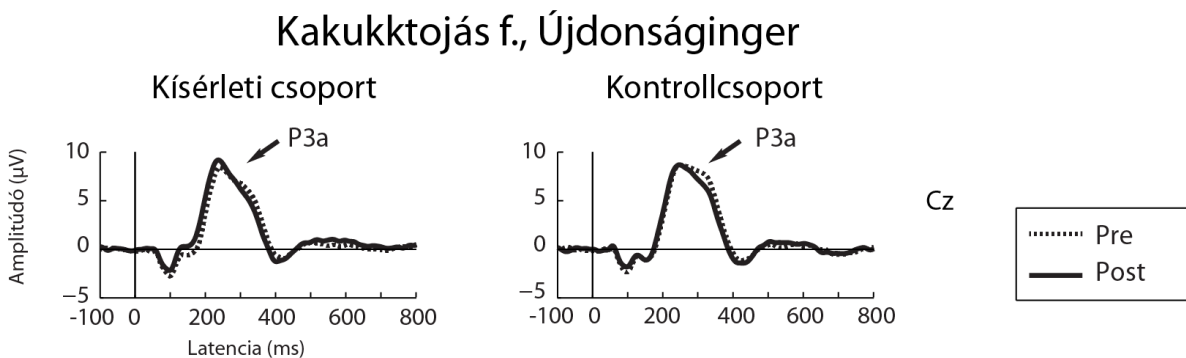
<sup>2</sup> Takács, E., Barkaszi, I., Altbäcker, A., Czigler, I. és Balázs, L. (2019). Cognitive resilience after prolonged task performance: an ERP investigation. *Experimental Brain Research*, 237(2), 377-388.



**3. ábra. A kísérleti eljárás.** Kakukkt. feladat: Kakukktojás feladat, Elterel. feladat: Elterelődesi feladat, MATB: Többelemű Feladatsomag, PVT: Vigilancia feladat

### Eredmények

A kísérleti manipuláció hatására a kísérleti csoport tagjai nagyobb mértékű mentális fáradtságról számoltak be, mint a kontrollcsoport tagjai. Ezzel szemben a P3a amplitúdója nem változott eltérően a két csoport között (lásd 4. ábra). Mivel a kognitív teljesítmény sem változott eltérően a két csoport között a fárasztási manipuláció hatására, nem lehet egyértelmű következtetést levonni, hogy a kísérleti csoport tagjai végeztek-e kompenzatorikus erőfeszítést, csak a P3a nem volt érzékeny erre, vagy a kísérleti csoport tagjai nem végeztek kompenzatorikus erőfeszítést.



**4. ábra. A Kakukktojás feladat újdonságingerei által kiváltott eseményhez kötött potenciálok.** A kb. 300 ms csúcslatenciájú P3a-ra nem hatott szignifikáns mértékben a kísérleti manipuláció.

### ***3. Az akut hypoxia csökkenti a P3a komponens amplitúdóját, miközben a válaszgátlás és interferencia-kontroll megtartott marad<sup>3</sup>***

#### Célok

Az orientációs reakció neurális korrelátuma, a P3a, és a gátlási végrehajtó funkciók között több szempontból párhuzam vonható. A jelen tanulmány egyik célja ezen kapcsolat vizsgálata volt, azt a logikát követve, hogy ha ezen funkciók a hypoxia stresszorára hasonlóan reagálnak, akkor azt a szoros kapcsolat jelének lehet tekinteni. A tanulmány másik célja annak vizsgálata volt, hogy a hypoxia hogyan hat ezen funkciókra. Az akut hypoxia kognitív funkciókra gyakorolt hatása kapcsán sok az egymásnak ellentmondó eredmény, ahol különösen a végrehajtó funkciók érzékenysége tisztázatlan.

#### Módszerek

Amatőr hegymászók vettek részt ebben a kísérletben (n=11, életkori átlag: 33 év). A kísérlet a Korányi Pulmonológiai Intézetben zajlott állandó orvosi felügyelet mellett. A hypoxiát oxigénben szegény levegő belélegeztetésével értük el. A hypoxia szintje 5500 méter tengerszint feletti magasságnak felelt meg. A kísérleti személyek két feladatot végeztek el. A szám-méret Stroop feladat segítségével mértük fel az interferencia-kontroll gátlási végrehajtó funkcióját. A módosított CPT O-X feladat pedig a válaszgátlást vizsgálta a nogo ingerekre mérhető téves riasztások száma és a nogo P3 eseményhez kötött komponens segítségével. A P3a-t (vagy más néven, Újdonság P3-t) a CPT O-X feladat ingerei között megjelenő

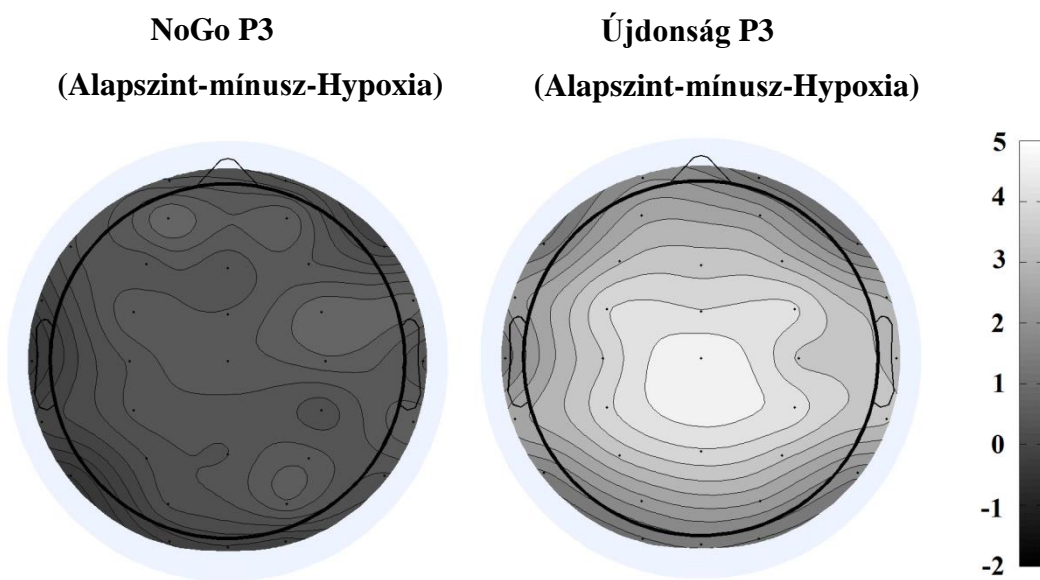
---

<sup>3</sup> Altbäcker, A., Takács, E., Barkaszi, I., Kormos, T., Czigler, I. és Balázs, L. (2019). Differential impact of acute hypoxia on event related potentials: Impaired task-irrelevant, but preserved task-relevant processing and response inhibition. *Physiology & Behavior*, 206, 28-36. (megosztott első szerzős tanulmány)

irreleváns ingerek váltották ki. A kísérleti személyek ezt a két feladatot végezték el a hypoxiás kitétség előtt, alatt és után.

### Eredmények

A hypoxia hatására a P3a komponens amplitúdója szignifikáns mértékben lecsökkent (lásd 5. ábra). A válaszgátlást tükröző téves riasztások száma igen alacsony volt a kísérlet során, míg a nogo P3 amplitúdója nem változott hypoxiában. A teljesítmény az interferencia-kontrollt tükröző Stroop feladatban úgyszintén változatlan maradt.



**5. ábra. A hypoxia P3 komponensekre gyakorolt hatását mutató topográfiai ábrák.** Az ábrán az Alapszint (Pre és Post kondíciók átlaga) és a Hypoxia kondícióban kiváltott EKP-k amplitúdó-különbsége látható (µV-ban), az egyes komponensek csúcslatenciájánál (338 ms a NoGo és 356 ms az Újdonság P3 esetében).

#### ***4. Az akut hypoxia eltérő hatást gyakorol a válaszgátlás és az interferencia-kontroll végrehajtó funkciójára<sup>4</sup>***

##### Célok

Az előző tanulmányban alkalmazott CPT O-X feladatban nagyon alacsony volt a nogo ingerek esetében a téves riasztás aránya, emiatt csak korlátozott mértékben tudtuk a válaszgátlást vizsgálni. Az ingeradási tempó és a válaszgátlás szükségessége között jól ismert kapcsolat van (Benikos és mtsai, 2013; Jodo és Kayama, 1992): minél gyorsabb az ingeradás, annál nehezebb a motoros választ legátolni, és ennek megfelelően annál erősebben aktiválódnak a válaszgátlási folyamatok. A jelen kutatásunkban jelentősen gyorsabb ingeradást alkalmaztunk (0,6 másodpercenként jelent meg egy inger), annak érdekében, hogy növeljük a válaszgátlás szükségességét. Hogy a nagyobb ingeradási tempó ne vezessen a teljesítmény drasztikus leromlásához, egy egyszerűbb válaszgátlási feladatot választottunk: a go / nogo (GNG) feladatot. Emellett egy interferencia-kontrollt mérő Stroop feladat két verziója is felvételre került (Hang-Stroop, Név-Stroop).

##### Módszerek

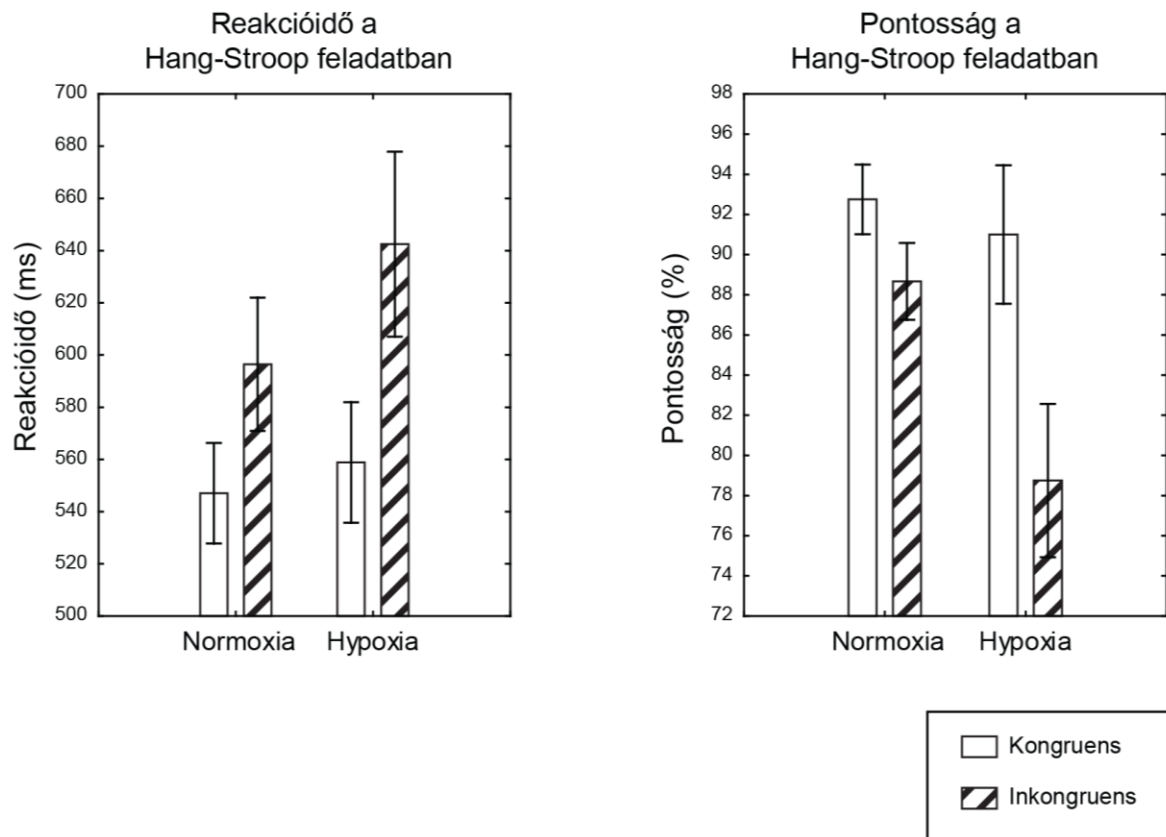
A kísérletet hypobárikus hypoxiában végeztük, EEG mérés nem volt. Hasonlóan az előző kutatáshoz a mérések hypoxia előtt, alatt és után történtek, illetve a hypoxia szintje 5500 méter tengerszint feletti magasságnak felelt meg. A kísérleti személyek a Magyar Honvédség vadász- és helikopter-pilótái voltak (n=25, életkori átlag: 35 év). A kísérlet a Magyar Honvédség Egészségügyi Központjának Repülőorvosi-, Alkalmasságvizsgáló és Gyógyító Intézetében zajlott, Kecskeméten.

---

<sup>4</sup> Takács, E., Czigler, I., Pató, L. G. és Balázs, L. (2017). Dissociated components of executive control in acute hypobaric hypoxia. *Aerospace Medicine and Human Performance*, 88(12), 1081-1087.

## Eredmények

A hypoxia hatására a Stroop feladatokban megnőtt az interferencia-kontrollt tükröző Stroop-hatás (lásd 6. ábra). Ezzel szemben a nogo ingerekre érkező téves riasztások száma nem volt nagyobb, mint a go ingerekre érkező hibák száma, ami azt jelzi, hogy a válaszgátlás megtartott maradt.



**6. ábra. Eredmények a Hang-Stroop feladatban.** Hypoxia hatására megnőtt az Stroop-hatás (a kongruens és inkongruens ingerek közötti különbség). A hibasávok a sztenderd hibát mutatják.

## MEGBESZÉLÉS

Az orientációs reakció és a P3a az ingervezérelt folyamatok egyik tipikus megnyilvánulásának tekinthető, a P3a hullám nagyságát azonban meghatározza a figyelmi folyamatok irányultsága és – hipotézisünk szerint – azok intenzitása is. A disszertáció első két tanulmánya ezt a hipotézist, a P3a figyelmi intenzitás elméletét kívánta ellenőrizni. A disszertáció 1. tanulmányában az ún. P3a nehézség-hatás vizsgáltuk. Ezt a hatást az eddigi kutatások olyan elrendezésben mutatták ki, ahol a feladatnehézség a feladablokkok szintjén, tehát kb. 4-6 perces idői távon belül változott. Ebben a tanulmányban azt vizsgáltuk, hogy ez a hatás kiváltható-e akkor, ha másodperces idői távon változik a feladatnehézség. Eredményeink szerint lehetséges ilyen moduláció, amit mi annak jeleként értelmezzük, hogy a feladatnehézség változása a figyelmi folyamatok intenzitásának változásához vezetett, és e folyamatok melléktermékeként a P3a is nagyobb amplitúdóval jelentkezett.

A disszertáció 2. tanulmányában a figyelmi folyamatok intenzitását a kompenzatorikus erőfeszítés kiváltásával kívántuk elérni. A hosszantartó, megterhelő feladatvégzés hatására a kísérleti csoport tagjai nagyobb szubjektív mentális fáradtságról számoltak be, mint a kontrollcsoport tagjai, ennek ellenére azonban a P3a amplitúdójában nem detektáltunk csoportok közötti különbséget. A figyelmi intenzitás elmélet szempontjából így a kísérlet inkonzulzívnek tekinthető. Meglátásunk szerint a kísérlet informatívabb abból a szempontból, hogy a fárasztó feladat-tesztelő feladat kísérleti elrendezésben milyen faktorok befolyásolhatják, hogy megjelenik-e a viselkedéses szinten a fáradtság.

A disszertáció 3. tanulmányában a P3a és végrehajtó funkciók kapcsolatát vizsgáltuk akut hypoxiában. A korábbi eredményeknek megfelelően a P3a jelentős amplitúdó-csökkenését detektáltuk hypoxiában, miközben a válaszgátlás és az

interferencia-kontroll gátlási végrehajtó funkciója nem változott. Ez az eredmény arra utal, hogy a P3a – végrehajtó funkciók kapcsolat nem túl erős. Az a további eredmény, hogy a nogo P3 sem változott hypoxiában, ellentmond annak a nézetnek (Polich, 2007), hogy ez a két komponens ugyanakkor a komponensnek a megnyilvánulása lenne.

A disszertáció 4. tanulmányában a gátlási végrehajtó funkciókat, a válaszgátlást és az interferencia-kontroll teszteltük akut hypoxiában. Az eredmények jelentős disszociációra utaltak: az interferencia-kontroll jelentősen leromlott ebben a kísérletben, míg a válaszgátlás megtartott maradt. Ez az eredmény azt a nézetet támogatja, amely a különböző végrehajtó funkciók töredezettségét, egymással való gyenge kapcsolatát hangsúlyozza. Gyakorlati szempontból ezek az eredmények arra hívják fel a figyelmet, hogy a hypoxia végrehajtó funkciókra gyakorolt hatása közel sem egységes, és egy-egy területen tapasztalt jó teljesítmény nem jelent garanciát arra, hogy a hypoxiának más területen nincs súlyos hatása.



## HIVATKOZÁSOK

- Benikos, N., Johnstone, S. J., & Roodenrys, S. J. (2013). Varying task difficulty in the Go/Nogo task: The effects of inhibitory control, arousal, and perceived effort on ERP components. *International Journal of Psychophysiology*, 87(3), 262–272. <https://doi.org/10.1016/j.ijpsycho.2012.08.005>
- Comerchero, M. D., & Polich, J. (1999). P3a and P3b from typical auditory and visual stimuli. *Clinical Neurophysiology*, 110(1), 24–30. [https://doi.org/10.1016/S0168-5597\(98\)00033-1](https://doi.org/10.1016/S0168-5597(98)00033-1)
- Courchesne, E., Hillyard, S. a., & Galambos, R. (1975). Stimulus novelty, task relevance and the visual evoked potential in man. *Electroencephalography and Clinical Neurophysiology*, 39, 131–143. [https://doi.org/10.1016/0013-4694\(75\)90003-6](https://doi.org/10.1016/0013-4694(75)90003-6)
- Escera, C., & Corral, M. J. (2007). Role of mismatch negativity and novelty-P3 in involuntary auditory attention. *Journal of Psychophysiology*, 21, 251–264. <https://doi.org/10.1027/0269-8803.21.34.251>
- Friedman, D., Cycowicz, Y. M., & Gaeta, H. (2001). The novelty P3: An event-related brain potential (ERP) sign of the brain's evaluation of novelty. *Neuroscience and Biobehavioral Reviews*, 25(4), 355–373. [https://doi.org/10.1016/S0149-7634\(01\)00019-7](https://doi.org/10.1016/S0149-7634(01)00019-7)
- Friedman, N. P., & Miyake, A. (2017). Unity and diversity of executive functions: Individual differences as a window on cognitive structure. *Cortex*, 86, 186–204. <https://doi.org/10.1016/j.cortex.2016.04.023>
- Hagen, G. F., Gatherwright, J. R., Lopez, B. a., & Polich, J. (2006). P3a from visual stimuli: Task difficulty effects. *International Journal of Psychophysiology*, 59(1), 8–14. <https://doi.org/10.1016/j.ijpsycho.2005.08.003>
- Hockey, G. R. J. (2011). A motivational control theory of cognitive fatigue. In P. L. Ackerman (Ed.), *Cognitive fatigue: Multidisciplinary perspectives on current research and future applications*. (pp. 167–187). American Psychological Association. <https://doi.org/10.1037/12343-008>
- Hockey, J. (1997). Compensatory control in the regulation of human performance under stress and high workload: A cognitive-energetical framework. *Biological Psychology*, 45(1–3), 73–93. [https://doi.org/10.1016/S0301-0511\(96\)05223-4](https://doi.org/10.1016/S0301-0511(96)05223-4)
- Jodo, E., & Kayama, Y. (1992). Relation of a negative ERP component to response inhibition in a Go/No-go task. *Electroencephalography and Clinical Neurophysiology*, 82(6), 477–482.
- Katayama, J., & Polich, J. (1998). Stimulus context determines P3a and P3b. *Psychophysiology*, 35(1), 23–33. <https://doi.org/10.1017/S0048577298961479>
- Kimura, M., Katayama, J., & Murohashi, H. (2008). Underlying mechanisms of the P3a task-difficulty effect. *Psychophysiology*, 45(5), 731–741. <https://doi.org/10.1111/j.1469-8986.2008.00684.x>
- Legrain, V., Bruyer, R., Guérit, J. M., & Plaghki, L. (2005). Involuntary orientation of attention to unattended deviant nociceptive stimuli is modulated by concomitant visual task difficulty. Evidence from laser evoked potentials. *Clinical Neurophysiology*, 116, 2165–2174. <https://doi.org/10.1016/j.clinph.2005.05.019>
- Miyake, A., Friedman, N. P., Emerson, M. J., Witzki, a H., Howerter, A., & Wager, T. D. (2000). The unity and diversity of executive functions and their contributions to complex “Frontal Lobe” tasks: a latent variable analysis. *Cognitive Psychology*, 41(1), 49–100. <https://doi.org/10.1006/cogp.1999.0734>

- Polich, J. (2007). Updating P300: an integrative theory of P3a and P3b. *Clinical Neurophysiology: Official Journal of the International Federation of Clinical Neurophysiology*, 118(10), 2128–2148. <https://doi.org/10.1016/j.clinph.2007.04.019>
- Polich, J., & Comerchero, M. D. (2003). P3a from visual stimuli: Typicality, task, and topography. *Brain Topography*, 15(3), 141–152. <https://doi.org/10.1023/A:1022637732495>
- SanMiguel, I., Corral, M.-J., & Escera, C. (2008). When Loading Working Memory Reduces Distraction: Behavioral and Electrophysiological Evidence from an Auditory-Visual Distraction Paradigm. *Journal of Cognitive Neuroscience*, 20(7), 1131–1145. <https://doi.org/10.1162/jocn.2008.20078>
- Sawaki, R., & Katayama, J. (2006). Stimulus context determines whether non-target stimuli are processed as task-relevant or distractor information. *Clinical Neurophysiology*, 117(11), 2532–2539. <https://doi.org/10.1016/j.clinph.2006.06.755>
- Sawaki, R., & Katayama, J. (2007). Difficulty of discrimination modulates attentional capture for deviant information. *Psychophysiology*, 44(3), 374–382. <https://doi.org/10.1111/j.1469-8986.2007.00506.x>
- Schneider, W., & Shiffrin, R. M. (1977). Controlled and automatic human information processing: I. Detection, search, and attention. *Psychological Review*, 84(1), 1–66. <https://doi.org/10.1037/0033-295X.84.1.1>
- Schomaker, J., & Meeter, M. (2015). Short- and long-lasting consequences of novelty, deviance and surprise on brain and cognition. *Neuroscience and Biobehavioral Reviews*, 55, 268–279. <https://doi.org/10.1016/j.neubiorev.2015.05.002>
- Sugimoto, F., & Katayama, J. (2017). Increased visual task difficulty enhances attentional capture by both visual and auditory distractor stimuli. *Brain Research*, 1664, 55–62. <https://doi.org/10.1016/j.brainres.2017.03.026>
- Ullsperger, P., Freude, G., & Erdmann, U. (2001). Auditory probe sensitivity to mental workload changes - An event-related potential study. *International Journal of Psychophysiology*, 40(3), 201–209. [https://doi.org/10.1016/S0167-8760\(00\)00188-4](https://doi.org/10.1016/S0167-8760(00)00188-4)
- Zhang, P., Chen, X., Yuan, P., Zhang, D., & He, S. (2006). The effect of visuospatial attentional load on the processing of irrelevant acoustic distractors. *NeuroImage*, 33(2), 715–724. <https://doi.org/10.1016/j.neuroimage.2006.07.015>