



EÖTVÖS LORÁND TUDOMÁNYEGYETEM
PEDAGÓGIAI ÉS PSZICHOLÓGIAI KAR
PSZICHOLÓGIA ALAPSZAK

FRONTOPARIETÁLIS THÉTA-OSZCILLÁCIÓK SZEREPE A STATISZTIKAI TANULÁSBAN

Témavezetők:

Dr. Németh Dezső
egyetemi tanár

Pesthy Orsolya
PhD hallgató

Osztényi Dóra

ELTE PPK Pszichológia BA

3. évfolyam

Budapest, 2023 január

REZÜMÉ

Statisztikai tanulás a környezet gyakorisági mintázatainak az elsajátítását jelenti, melynek nagy szerepe van többek között a szociális, sport és nyelvi készségekben is. A kontrollált, célvezérelt kognitív funkciók (például a munkamemória) és az automatikus statisztikai tanulás között kompetitív kapcsolat feltételezhető, de ennek a neurokognitív háttere még nem teljesen ismert. Ennek a háttérnek és hatásmechanizmusnak a feltárására az agy által generált ritmusokból, úgynevezett oszcillációkból következtethetünk. Egyrészt, egy korábbi EEG-s vizsgálat negatív korrelációt talált a frontális théta-erő és a statisztikai tanulás mértéke között. Másrészt pedig egy kauzalitást vizsgáló kutatás azt találta, hogy a théta oszcillációk deszinkronizációja rontja a munkamemóriát. A két rendszer – statisztikai tanulás vs. munkamemória - közötti kompetíció fényében azt feltételezzük, hogy théta frekvencián történő deszinkronizáció a frontoparietális hálózatban jobb statisztikai tanulást eredményez. Eddig csak egy tanulmányról tudunk, amely a théta oszcillációk és a statisztikai tanulás közötti ok-okozati viszonyt próbálta magyarázni. Ők az agy frontális és parietális oszcillációit szinkronizálták, de nem kaptak szignifikáns eredményt, a statisztikai tanulás nem romlott. Ennek azonban lehet, hogy módszertani okai voltak. Mi ezt a kísérletet újragondolva, a frontális és parietális területeket deszinkronizáljuk, nagyobb, 2 mA erősségű áramot használunk és az elektródamontázst előzetes elemzések alapján választottuk. A statisztikai tanulást Alternáló Szeriális Reakcióidő feladat szemmozgáskövető rendszerre (eye-tracker) fejlesztett változatával mértük. Az eredményeink azt mutatják, hogy a résztvevők tanultak a feladaton, de a stimulált és nem stimulált csoport között nem volt szignifikáns különbség sem a tanulás mértékében, sem annak lefutásában.

A kutatás az Emlékezet, Nyelv és Idegtudomány Kutatócsoport keretében valósult meg. Az adatfelvételeken aktívan részt vettem. A kérdésfelvetésen, az adatelemzésben és a prezentáció önálló szellemi munkám terméke.

Kulcsszavak: frontoparietális théta-oszcilláció, tACS, statisztikai tanulás

TARTALOMJEGYZÉK

ELMÉLETI BEVEZETÉS	4
HIPOTÉZIS	7
MÓDSZER	7
Vizsgálati személyek	7
Mérőeszköz.....	8
Szemmozgáskövető rendszer.....	9
Stimuláció	10
Eljárás	11
Statisztikai módszerek	12
EREDMÉNYEK.....	13
DISZKUSSZIÓ	14
RÉSZVÉTEM A KUTATÁSBAN	17
KÖSZÖNETNYÍLVÁNÍTÁS	17
ANYAGI TÁMOGATÁS	18
IRODALOMJEGYZÉK:.....	19

ELMÉLETI BEVEZETÉS

Nehéz az agyterületek és kognitív funkciók között ok-okozati viszonyokat felállítani, kifejezetten egy olyan komplex és sok alfolymatot magában foglaló területen, mint a memóriakutatás (Rossi és mtsai., 2001; Yavari és mtsai., 2018). Eddigi tudásunk alapján a különböző memóriatípusok közötti neurokognitív kapcsolat nem teljesen egyértelmű (Albouy és mtsai., 2008), a kutatással ehhez a témához szeretnénk hozzájárulni.

A statisztikai tanulás az implicit emlékezet egy részfolymata, melynek során a környezet szabályszerűségeinek megfigyelése által kódoljuk az információkat. Ezek a szokásszerű, asszociatív tanulási formák, amik lehetővé teszik a prediktív feldolgozást (Armstrong és mtsai., 2017; Kaufman és mtsai., 2010; Saffran és mtsai., 1996). Tehát a valószínűségi tanulás, vagy más néven a statisztikai tanulás egy olyan kognitív képesség, amely az automatikus viselkedések és készségek, például a motoros, nyelvi, zenei vagy szociális szokások alapjául szolgál (Kóbor és mtsai., 2018; Zavecz és mtsai., 2020). Ez a tanulástípus elősegíti az összetett környezeti ingerek hatékony feldolgozását és hozzájárul az automatikus viselkedések elsajátításához (Kóbor és mtsai., 2018), ezáltal pedig lehetővé teszi az események előrejelzését (Zavecz és mtsai., 2020). Anyanyelvünk nyelvtanát a hallott struktúrák gyakorisága alapján sajátítjuk el. Bizonyos mozdulatsorokat, például a biciklizést is a gyakran ismételt mozdulatokból tanuljuk meg. Szociális szinten pedig elengedhetetlen, hogy társunk viselkedésében lévő ismétlődő mintázatokat felismerjük, s ezekre a megfelelő reakciót adjuk. Belegondolva ezekbe a példákba, észrevehetjük, hogy nem csak az implicit folymatok, az ismétlődő minták felismerése játszik szerepet a tanulásban, hanem egy-egy konkrét eseményre vonatkozó emlék (például egy nyelvóra, vagy egy közös emlék felidézése a barátunkkal). Az ilyen összetettség miatt újabb kutatásoknak köszönhetően az a vélekedés is teret nyert, miszerint optimálisabb az emlékezeti rendszert a bevonódó folymatok alapján csoportosítani, mert például egy gyakran ismétlődő mozgássor, készség elsajátításában, a statisztikai tanulásban részt vehetnek implicit és explicit folymatok is (Henke, 2010; Nemeth és mtsai., 2013), ezzel még bonyolultabbá téve a statisztikai tanulás kognitív mechanizmusainak feltérképezését.

A statisztikai tanulás neurokognitív háttere még nem teljesen ismert (Janacsek & Nemeth, 2015; Virag és mtsai., 2015). Eredetileg a statisztikai tanulás működését a bazális ganglionokhoz és striatumhoz kötötték (Poldrack és mtsai., 2001; Squire, 2004; Turk-Browne és mtsai., 2009). Azonban újabb kutatások a prefrontális kéreg működésével is kapcsolatba hozták (Ambrus és mtsai., 2020; Daw és mtsai., 2005; Janacsek & Nemeth, 2015). Ambrus és

munkatársai (2020.) azt találták, hogy a dorzolaterális prefrontális kéreg (DLPFC) stimulálása jobb statisztikai tanulást eredményez. Ők nem invazív transzkraniális mágneses stimulációval a prefrontális kéreg funkcionális konnektivitását, azaz a DLPFC neurális kapcsolatait csökkentették, ezáltal előidézve a jobb statisztikai tanulási teljesítményt. Tehát a DLPFC szerepe is megalapozott a statisztikai tanulás folyamataiban, úgy, hogy csökkentett működése jobb statisztikai tanuláshoz vezet (Ambrus és mtsai., 2020).

Azonban a frontális kéreg működése szerepet játszik a munkamemória folyamatainak a lebonyolításában is (Shallice és mtsai., 1994). A magasabb működése jobb munkamemória teljesítménnyel jár együtt (Petrides és mtsai., 1993), ezért a kontrolláltabb munkamemória és az automatikus statisztikai tanulás között kompetitív kapcsolat feltételezhető (Janacsek & Nemeth, 2015; Poldrack és mtsai., 2001; Virag és mtsai., 2015). Ennek a háttérnek és hatásmechanizmusnak a feltárására az agy által generált ritmusokból, úgynevezett oszcillációkból következtethetünk (Caplan & Glaholt, 2007). Jelen esetben a frontális lebenyben mérhető théta-hullámokat – a 4-8 Hz közötti frekvenciájú oszcillációkat (Eschmann és mtsai., 2020) vizsgáltuk. A théta-frekvenencia a hippocampus és a frontális középilonali területeken megfigyelhető a munkamemória folyamataiban (Eschmann és mtsai., 2020). Arra már van kísérleti bizonyíték, hogy a théta oszcillációk deszinkronizációja rontja a munkamemóriát (Alekseichuk és mtsai., 2017). Alekseichuk és munkatársai (2017) egy kauzalitást vizsgáló kísérletben keresték a kapcsolatot a munkamemória és a frontális théta-oszcillációk között. Non-invazív agystimulációs eljárást alkalmazva azt találták, hogy a frontoparietális területen deszinkronizálva a théta-oszcillációkat (ezzel a funkcionális konnektivitást csökkentve a frontális és parietális területek között) a munkamemória feladatokban a kísérletben részt vevők rosszabb teljesítményt mutattak (Alekseichuk és mtsai., 2017). Tehát elmondható, hogy a frontális théta-oszcillációknak szerepe van a kontrolláltabb munkamemória folyamatokban a két rendszer között kompetitív kapcsolatot feltételezve pedig arra számítunk, hogy az automatikus statisztikai tanulásban is.

Ezeket az oszcillációkat vizsgálva egy EEG konnektivitás elemzés azt találta, hogy théta frekvencián, minél magasabb a konnektivitás a különböző agyterületek között – elsősorban a fronto-parietális kapcsolatokban –, annál gyengébb a statisztikai tanulási teljesítmény (Tóth és mtsai., 2017), tehát negatív korreláció feltételezhető a statisztikai tanulás és a théta-erő alatti konnektivitás között. A théta-oszcillációk mértéke ugyanakkor pozitív korrelációt mutat a munkamemória teljesítményével (Riddle és mtsai., 2020). Ez az ellentétes irányú változás feltételezhetően a két rendszer – kontrollált és automatikus emlékezeti funkciók – közötti

kompetíciónak köszönhető. Azonban ezek az elméletek nem adnak a théta-oszcillációk és a statisztikai tanulás közötti kauzális kapcsolatra magyarázatot.

Számos tanulmány vizsgálta már a statisztikai tanulás neurális hátterét funkcionális mágneses rezonancia módszerrel (fMRI; Poldrack és mtsai., 2001; Turk-Browne és mtsai., 2009), magnetoencefalográfiával (MEG; Paraskevopoulos és mtsai., 2017), elektroencefalográfiával (EEG; Kóbor és mtsai., 2018; Mitchell és mtsai., 2008). Ezek a tanulmányok azonban korrelációs módszereket alkalmaztak, a statisztikai tanulás és a frontális agyterületen lezajló agyfolyamatok közötti oksági kapcsolatra viszont nem tértek ki. Ezért a kutatásom célja, hogy a korrelációs módszereken túllépve intervenciós módszerrel – nem invazív agyi stimulációval – vizsgáljam az oksági kapcsolatokat az implicit statisztikai tanulás és neurális háttere között.

Az agyi hálózatok és a kognitív teljesítmény közötti ok-okozati összefüggések vizsgálatának egyik lehetséges módszere az agyi stimuláció. A transzkraniális agystimulációs módszerek jelentősége kiemelkedő a humán idegtudomány kutatásokban, ugyanis így nem-invazív módon, átmenetileg módosítható az agyműködés (Nitsche & Paulus, 2000). Ezzel hozzájárulva a különböző agyterületek és az agy és a viselkedés közötti összefüggések megismeréséhez, ok-okozati kapcsolatok feltárásához (Yavari és mtsai., 2018). A non-invazív agystimuláció egyik formája a váltóáramú stimuláció (tACS, transcranial alternating current stimulation; Yavari és mtsai., 2018), ami alkalmas módszer az agyi oszcillációk befolyásolására (Yavari és mtsai., 2018; Zavecz és mtsai., 2020). Egy rezonanciafrekvenciával szinkronizálni, míg több frekvencia alkalmazásával deszinkronizálni tudja a tACS az agykérgi oszcillációkat (Antal & Paulus, 2013; Zavecz és mtsai., 2020).

Tudomásunk szerint arra eddig egy kutatás tért ki, hogy a középilonali théta-oszcillációk megváltoztatásával a statisztikai tanulás mértékében változást előidézzon. Zavecz és munkatársai (2020) kutatásában a frontoparietális középilonali théta-oszcillációk szinkronizálására (peak-to-peak, lásd később) 1 mA erősségű nem invazív transzkraniális váltóáram-stimulációt alkalmaztak, amely hatására a munkamemória és a statisztikai tanulás közötti versenyszerű kapcsolatnak köszönhetően a deklaratív tanulási folyamat javulását, míg a statisztikai tanulás romlását várták (Zavecz és mtsai., 2020). Azonban a kutatás nem adott szignifikáns eredményeket (Zavecz és mtsai., 2020). Ez a tény inkább módszertani, mint elméleti okoknak köszönhető. Az 1mA erősségű tACS túl gyenge lehetett a hatás eléréséhez. Ők a théta-ritmus szinkronizálásával szerettek volna eredményt elérni, ami a kontrollált tanulási folyamatoknak kedvez (Tóth és mtsai., 2017), azonban a funkcionális konnektivitást nem csökkent. A stimulációnál használt elektródamontázs nem biztosította a megfelelő (minimum

0.4 V/m) áramerősséget a célzott agyterületeken (Filmer és mtsai., 2020). A mi kutatásunkban újdonság, hogy a theta-frekvenciát deszinkronizálni szeretnénk, ami a statisztikai tanulást segíti elő. A deszinkronizáció a frontális és a parietális területek közötti funkcionális konnektivitást csökkentheti a theta-frekvencián. A deszinkronizáció 2mA erősségű tACS következtében jön létre. Az elektródamontázst és az áramerősséget előzetes elemzések alapján választottuk, figyelembe véve azt, hogy a stimuláció elérje a theta-oszcillációk feltételezhető forrását, az anterior cinguláris kérget (anterior cingular cortex, ACC; Tzur & Berger, 2007). Ezen kívül a kísérletek során szemmozgáskövető (eye-tracker) segítségével mérjük a statisztikai tanulást Alternáló Szeriális Reakcióidő feladattal (Alternating Serial Reaction Time task, ASRT; Howard & Howard, 1997; Zolnai és mtsai., 2022). Az ASRT feladat szemmozgáskövető rendszerre fejlesztett változatát használjuk, melyben kísérleti személynek a lehető leggyorsabban a megjelenő ingerre kell néznie. Szemmozgáskövető segítségével kiiktathatjuk a manuális motoros válaszokat. Így már a feladat kezdetétől jól kimutatható a tanulás, ami által pontosabb eredményhez juthatunk (Tal és mtsai., 2021).

HIPOTÉZIS

Annak fényében, hogy kompetíciót feltételezünk a kontrolláltabb munkamemória és az automatikus között, illetve a frontoparietális theta-oszcillációk deszinkronizálásának hatására munkamemória teljesítmény romlik (Aleksichuk és mtsai., 2017) azt a hipotézist fogalmaztam meg, hogy a theta frekvencián történő deszinkronizáció a frontoparietális hálózatban jobb statisztikai tanulást eredményez. Kutatásunkban transzkraniális váltóáram stimulációval vizsgáljuk a frontoparietális agyterület és a statisztikai tanulás közötti kauzális kapcsolatot.

MÓDSZER

Vizsgálati személyek

A résztvevők toborzása kényelmi mintavételi eljárással, az egyetemen meghirdetett „Pszichológiai kísérletben és tudományos aktivitásban való részvétel” kurzus keretein belül, illetve a közösségi médián meghirdetve történt. A résztvevőket egy online kérdőívvel szűrtük, melyben kizáró feltétel volt, bármilyen kardiológiai, pszichiátriai és neurológiai rendellenesség, epilepszia, epilepszia elsőfokú rokonoknál, cukorbetegség, pacemaker, korábbi agyrázkódás, bármilyen agyi történés (pl. stroke) a betegségtörténetben és migrén is. Piercing, fogszabályzó, a fejben vagy nyakban lévő bármilyen fém implantátum megléte is kizáró ok volt. Ezekre a kritériumokra a biztonsági kérdőívben, a kísérlet megkezdése előtt is rákérdeztünk. Minden

résztvevő informált beleegyező nyilatkozatot írt alá. A kutatásban összesen 75 személy vett részt, melyből adatvételi hiba (eye-tracker adatminőség hiba, stimulációs hiba) miatt 13 fő kizárásra került. A kísérleti személyeket véletlenszerűen stimulációs és kontrollcsoportba osztottuk. A 64 főből 26 ember került a deszinkronizációs csoportba ($M = 22$; $SD = 3,929$), melynek 73,07%-a nő, 26,93%-a férfi volt. Ők valódi stimulációt kaptak. A kontrollcsoportot, összesen 38 fő, 36 (84,21%) nő és 2 (15,79%) férfi alkotta ($M = 22,47$; $SD = 8,846$). A vizsgálati személyek 18 és 33 év közöttiek ($M = 22,28$; $SD = 7,22$) voltak. A kutatás a Helsinkii Nyilatkozattal összhangban zajlott, az Eötvös Loránd Tudományegyetem Pedagógia és Pszichológia Karának Kutatásetikai Bizottságának engedélyével (iktatási szám: 2018-52-2). Minden résztvevő írásos informált beleegyezéssel járult hozzá a részvételhez.

Mérőeszköz

Alternáló Szeriális Reakcióidő Feladat

(Alternating Serial Reaction Time, ASRT; Howard & Howard, 1997)

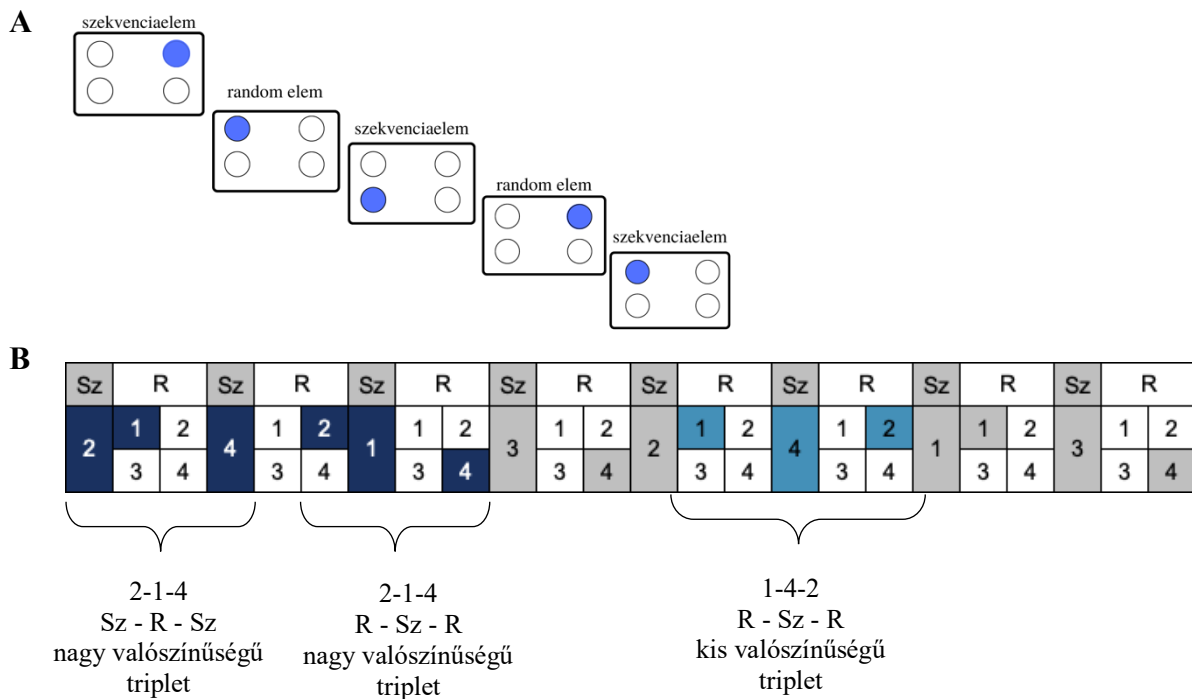
A statisztikai tanulás mérése az ASRT (Howard & Howard, 1997) történt mely egy négyválasztásos reakcióidő-feladat, melyben ingerként a képernyőn megjelenő négy üres kör közül az egyik kör kék lesz. A résztvevők azt az instrukciót kapják, hogy a lehető leggyorsabban és legpontosabban nézzenek a képernyőn megjelenő kék körre. Amint ránéztek a körre, egy új inger jelent meg 500 msec inter-stimulus intervallummal. A vizsgálatban részt vevők azonban nem tudták, hogy az ingerek egy alternáló szekvenciaként jelennek meg. Minden második elem, előre meghatározott szekvencia eleme; közöttük pedig véletlenszerű helyeken megjelenő, random elemek vannak (pl: 2-r-4-r-1-r-3-r, ahol egy szám az egyik körre utal a képernyőn, ami szekvencia mintájának állandó elemei, az „r” betű pedig a random helyen megjelenő elemet jelöli). A random elemekből és a minta elemeiből álló struktúrákból három elemből álló tripletok álltak össze, ezzel valószínűbb és kevésbé valószínű ingerhármasokat hozva létre. A 2. ábra B részén is látható példák a 2-x-4 szekvencia nagy valószínűségű triplet, mert az utolsó elem szerepelhet random és szekvenciaelemként is, így ez a triplet gyakrabban fordul elő a feladat során. Ezzel ellentétben bizonyos tripletokat viszont a szekvencia nem tud megformálni, így csak egyféleképpen jelenhetnek meg: random-szekvencia-random elemek által. Így ezek a kisebb valószínűségű ingerhármasok, ilyen a fenti példában többek közt az 1-x-2 hármas. Ennek következtében a valószínűbb ingerhármasok 62,5% valószínűséggel, míg a kevésbé valószínűbb ingerhármasok 37,5% valószínűséggel jelennek meg. Azoknál a tripletoknál, amik valószínűbben előfordulnak, az utolsó elem megjelenése sokkal

kiszámíthatóbb, mert a kísérletben részt vevőknek már ismerősebb az első két elem. A statisztikai tanulás mértékét a valószínűbb és kevésbé valószínűbb ingerhármasoknál mért reakcióidőkülönbség határozza meg, ugyanis az ismétlődő helyeken megjelenő ingerekre gyorsabb választ fognak adni a résztvevők a statisztikai struktúra ismerőssége miatt..

A feladat blokkokból állnak. Minden blokk öt random ingerrel kezdődik, melyek később nem kerültek elemzésre. Ezután egy nyolc ingerből álló sorozat ismétlődik tízszer. A feladat egy blokkja tehát 85 ingerből állt, ami 85 kék kör megjelenését jelentette. Öt blokk alkotott egy epochot, amivel a feladat előre haladását mérjük.

1. ábra

Az ASRT feladat sematikus ábrázolása



Megjegyzés. **(A)** A négy körben az ingerek megjelenése a szekvenciaelemek és a random elemek váltakozásával. **(B)** A kék körök lehetséges megjelenési sorrendje. Sötétkéssel a nagy valószínűségű tripletok, világos késsel a kis valószínűségű tripletok vannak jelölve.

Szemmozgáskövető rendszer

Az szemmozgás követése a Tobii Pro X3-120 (Tobii, 2017) 120 Hz-es frissítésű szemmozgás regisztrációs eszköz segítségével valósult meg. Az eszközt egy AOC márkájú 24 colos 1920x1080 felbontású LED monitor alához erősítettem, így lehetővé téve a kísérletben részt

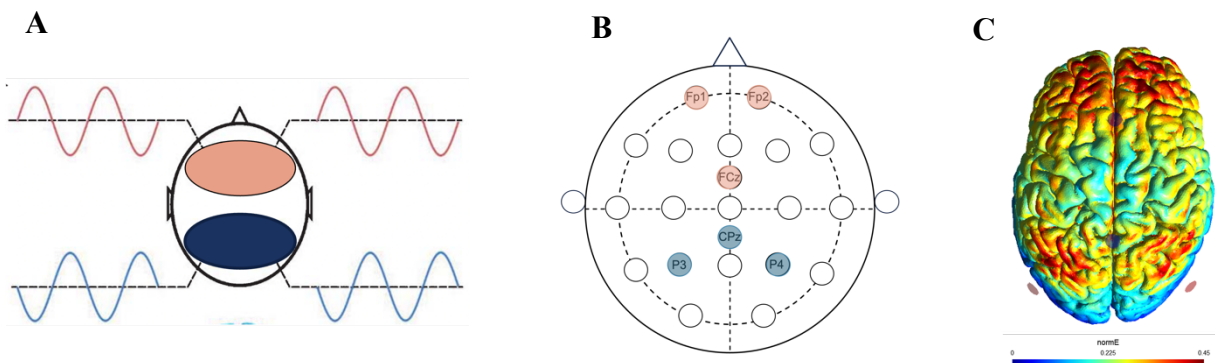
vevő személyek szemének a kalibrációját majd a szemmozgás követését. Az adatok rögzítésére Tobii Pro Python SDK (*Tobii Pro SDK*, 2022) programot használtunk egy Psychopy alapú kísérleti scripttel.

Stimuláció

A stimuláció tACS-sel (Antal & Paulus, 2013) történt, mely egy non-invazív módszer, amely alkalmas az oszcillációk befolyásolására, de hosszútávú hatása nincs. A kísérletben Neuroelectrics Starstim 20 eszköz segítségével 2 mA (peak-to-baseline) erősségű, 6 Hz-es váltóárammal történt a stimuláció a frontális közép vonalon. A peak-to-baseline amplitúdó az alapvonal és a csúcspont közötti távolságra utal, míg a peak-to-peak amplitúdó a hullámhosszban a legmagasabb és a legalacsonyabb pont közötti távolság. Az elektródamontázst és az áramerősséget előzetes elemzések alapján választottuk, figyelembe véve azt, hogy a stimuláció elérje a theta-oszcillációk feltételezhető forrását, az anterior cinguláris kérget (ACC; Tzur & Berger, 2007). Az elektródamontázs tesztelése a SimNIBS (*SimNIBS*, 2019/2022) programmal történt, fontos szempont volt, hogy a deszinkronizált területeken legyen minimum 0,4 V/m-es áramerősség (Filmer és mtsai., 2020). Frontálisan három elektróda (Fp1, Fp2, FCz) és parietálisan (P3, P4, CPz) három elektróda segítségével deszinkronizáltuk egymáshoz képest a frontális és parietális területeket, amit a 2. ábrával szemléltetünk. A stimuláció a stimulációs csoportnál 20 percig, a kontrollcsoportnál 20 másodpercig tart. Húsz másodpercnél a stimulációnak nem volt hatása a theta-oszcillációkra, de a kísérletben részt vevők már éreztek egy kis bizsergést, így nem feltételezték, hogy kontrollcsoportba kerültek (Nitsche & Paulus, 2000).

2. ábra

A frontoparietális deszinkronizáció transzkraniális váltóáram stimulációval.



Megjegyzés (A) Frontoparietális deszinkronizáció. Alekseichuk és mtsai. (2017) alapján. Az ábrán látszódik, hogy a frontális (rózsaszín) és a parietális (kék) oszcillációkat egymáshoz képest deszinkronizáltuk. *(B)* A deszinkronizációkor használt elektródamontázs – rózsaszín jelöléssel a frontális Fp1, Fp2 és FCz, kék jelöléssel pedig a parietális P3, P4 és CPz elektródák. A stimulációkor 6 Hz frekvenciájú és 2 mA peak-to-baseline erősségű áramot használtunk. *(C)* Az agyi aktivitás színkódolt modellje a deszinkronizáció alatt, melyben sötétkéssel 0 V/m, pirossal pedig 0,45 V/m áramerősség van jelölve. Az ábra a SimNIBS program (*SimNIBS*, 2019/2022) által lett generálva, melyben az elektródamontázst is teszteltük.

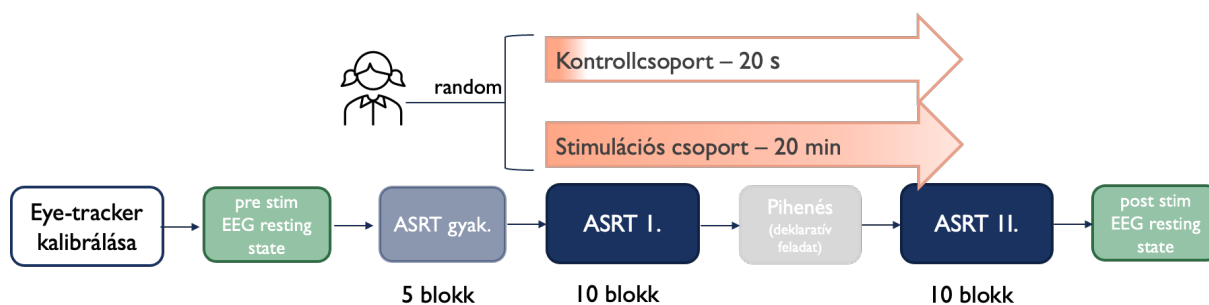
Eljárás

A résztvevők jelentkezéskor egy kérdőívet töltöttek ki, amivel kiszűrtük azokat, akik bizonyos egészségügyi okok miatt nem vehettek részt a kutatásban (lásd Résztvevők szekcióban). A kritériumoknak megfelelt vizsgálati személyek vehettek részt a kísérletben, ami egy napon zajlott, körülbelül 3,5 órát vett igénybe. Lebonyolítása az ELTE Damjanich utcai épületében, az Emlékezet, Nyelv és Idegtudomány Kutatócsoport laborjában történt. A vizsgálati személyek tájékoztatása és a beleegyező nyilatkozat írtak alá. Ezután az EEG sapka felhelyezése következett – a mert a vizsgálat során EEG felvétel készült. Az EEG adatok jelen tanulmányban nem szerepelnek, de előkészítésük folyamatban van – majd a szemmozgáskövető rendszert kalibráltuk. Az adatfelvétel teljes hossza alatt fontos szempont volt, hogy a vizsgálatban részt vevők ne mozdítsák meg a fejüket.

A feladatok megkezdése előtt nyugalmi állapotú EEG-t mértünk összesen 5 percig. Az első 2,5 percben a kísérleti személynek nyitva volt a szeme, majd 2,5 percig csukva. Ezután a gyakorló (nulladik) ASRT rész következett, mely egy epochból, azaz 5 blokkból állt, ami körülbelül 5 percet vett igénybe. Itt még csak random jelentek meg az ingerek, nem volt benne szekvencia, így nem vártunk statisztikai tanulást. A gyakorlást nem elemeztük. Az első elemzésre kerülő ASRT feladatrészt 2 epochból, összesen 10 blokkból állt. Ennek a résznek a kezdetekor megtörténik a frontális tACS stimuláció, ami a stimulációs csoportnál 20 percig tart, a kontrollcsoportnál pedig 20 másodpercig. Ezután szünetként a kísérletben részt vevők egy deklaratív feladatot végeztek el, melyet ebben a tanulmányban nem elemeztem. Ezt az ASRT feladat újabb periódusa követte, mely szintén 10 blokkból állt. A második ASRT periódus után megmérjük a post-stimulációs nyugalmi állapot (resting-state) EEG-t. A kísérleti elrendezés fő lépéseit, az elemzett ASRT feladatokat a 3. ábra demonstrálja.

3. ábra

A kísérleti elrendezés fő lépései.



Megjegyzés.. Az ábrán a sötétkéssel jelölt ASRT blokkokat elemeztük. A stimuláció az ASRT I. feladat megkezdésekor történt meg, ezt az ábrán rózsaszín nyíllal jelöltem. A nyíl kitöltöttsége azt mutatja, mennyi ideig tartott a stimuláció.

Statistikai módszerek

Kizártam az elemzésből az egy másodpercnél nagyobb reakcióidő adatokat – ezek voltak az extrém reakcióidők, amik úgy keletkezhettek, hogy a szemmozgáskövető nem érzékelte helyesen, amikor a kísérletben részt vevő a kék körre nézett – illetve a blokkok első 5 random elemét. Ezen kívül kizártam az elemzésből a trilleket és az ismétlődéseket. Trill az olyan ingerhármasság, melyben az első és utolsó megjelenő inger ugyanaz (pl.: 2-1-2), ismétlődés pedig az, amikor ugyanaz az inger jelenik meg egymás után (pl.: 2-2). Erre azért volt szükség, mert ezekre a résztvevők a szekvenciastruktúrától függetlenül gyorsabban reagálnak, így torzíthatja az eredményeket. Az összes elemről eldöntöttem, hogy a valószínű vagy kevésbé valószínű triplet utolsó eleme-e. Epochonként és tripletenként kiszámoltam a résztvevők reakcióidejének mediánját, ez az érték került elemzésre.

Az adatok statisztikai elemzése SPSS 26.0 (*IBM SPSS Statistics 26*, 2022) program segítségével történt. Az elemzéshez kevert mintás ANOVA-t használtam, melyben a függő változó az ASRT feladatban mért reakcióidő; független változó az epoch (egy szakasz az egész feladatban, 1-4), a tripléttípus (valószínű/kevésbé valószínű), személyek közötti változó a stimulációs csoport (théta deszinkronizáció/sham). A szfericitást Mauchly-tesztel ellenőriztem, a sérülése esetén Greenhouse-Geisser korrekcióval dolgoztam. Az alfa szintjét 0,05-ben állapítottam meg. A többszörös összehasonlítás miatt LSD korrekciót használtam. Az eredményeimet Bayesiánus statisztikával is megerősítettem, ami megmutatja, hogy mennyivel valószínűbb, hogy nem létezik a hatás, mint igen.

EREDMÉNYEK

A feladat előre haladtával változik-e a reakcióidő?

A feladat előrehaladtával (EPOCH főhatás) találtunk szakasz főhatást ($F(3,323; 206,037) = 16,902, p < 0,001, \eta_p^2 = 0,214$), ami azt jelenti, hogy a résztvevők reakcióideje általánosságban szignifikánsan változott a szakaszok között. Ez az 5. ábrán is látható, hogy a szomszédos epochok között a szünet előtt és után (1-2 és 3-4 epochok, $p < 0,001$ és $p=0,006$) a reakcióidő nőtt, a második és harmadik epoch között pedig a reakcióidő csökkent ($p < 0,001$) triplettől és stimulációtól függetlenül.

Kimutatható-e a statisztikai tanulás?

A triplettípusok főhatása szignifikánsnak bizonyult, tehát a valószínűbb és kevésbé valószínűbb triplettípusok között van különbség a reakcióidőben ($F(1; 62) = 80,263, p < 0,001, \eta_p^2 = 0,564$); a résztvevők tehát tanultak a feladaton. A valószínűbb triplettípusra alacsonyabb volt a reakcióidő ($M = 341,316; SD = 2,182$), mint a kevésbé valószínű, ritkább triplettípusra ($M = 346,125; SD = 2,255$). Ez független a szakasztól vagy a stimuláció típusától.

Nem találtunk szignifikáns hatást a szakasz (EPOCH) és TRIPLET közötti interakcióban ($F(20; 4,821) = 1,767, p = 1,22, \eta_p^2 = 0,028$), vagyis a résztvevők hamar megtanulták a szekvenciát és nem javultak már tovább.

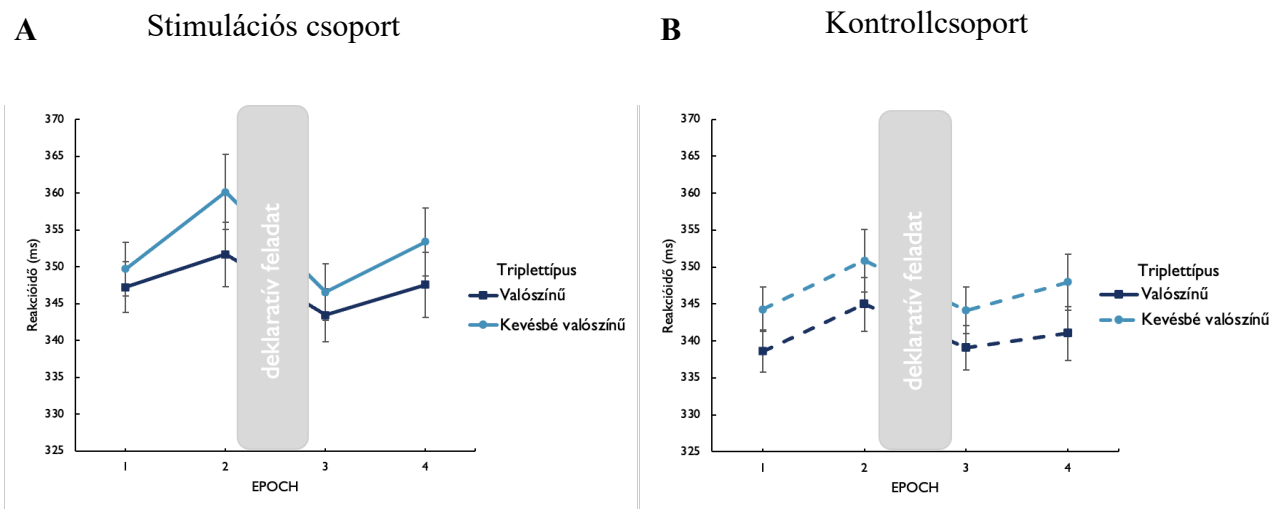
A theta-oszcillációk deszinkronizálásának kimutatható-e a hatása a statisztikai tanulásra?

Van-e különbség a tanulás mértékében és lefutásában a stimulációs és a kontrollcsoport között?

Nem találtunk szignifikáns hatást a TRIPLET és a STIMULÁCIÓ interakciójában ($F(4,821; 298,877) = 2,215, p = 0,504, \eta_p^2 = 0,007, BF_{excl} = 6,48$), vagyis a kísérleti és kontrollcsoport ugyanolyan mértékben tanult; és a EPOCH, STIMULÁCIÓ és a TRIPLET hármas interakciójában sem ($F(4,821; 298,877) = 0,738, p = 0,590, \eta_p^2 = 0,012, BF_{excl} = 5369,701$), vagyis a tanulás mintázata nem tért el a két csoport között. Az EPOCH, STIMULÁCIÓ és TRIPLET hármas interakcióját ábrázoló grafikon az 4. ábrán látható. Ezeket az eredményeket a Bayesiánus elemzések is megerősítették.

4. ábra

A stimulációs csoport és a kontrollcsoport reakcióidő adatainak összehasonlítása.



Megjegyzés. Az y tengelyen a függő változó, a reakcióidő van ábrázolva milliszekundumban, az x tengelyen az egyik független változó, EPOCH (ASRT feladatnak 5 blokkja) van ábrázolva, ami a feladat előre haladását jelzi. A második független változó a tripllettípus, a személyközi változó pedig a stimulációs csoport. Az A ábrán a stimulációs csoport, a B ábrán a kontrollcsoport adatai látszódnak. A hibasávok az átlag standard hibáját jelölik. A második és harmadik epoch közötti szürke sáv az ASRT feladatok közötti szünetet ábrázolja, melyben a vizsgálati személyek egy deklaratív feladatot végeztek el, amit a dolgozatomban nem elemzek. Habár a résztvevők mutattak statisztikai tanulást, ennek sem a mértéke, sem a lefolyása nem különbözött a két csoport közt.

DISZKUSSZIÓ

A kutatásunk során elsősorban a stimuláció, azon belül a frontoparietális területeken a deszinkronizáció hatására voltunk kíváncsiak. A hipotézisünket, miszerint a frontoparietális területen a deszinkronizációjának hatása a statisztikai tanulásban jobb teljesítményt eredményez, nem tudtuk alátámasztani. A stimulált és nem stimulált csoport között nem találtunk szignifikáns különbséget sem a tanulás mértékében, sem annak lefutásában. Ugyanakkor az eredményeink azt mutatják, hogy a résztvevők tanultak a feladaton, ami arra enged következtetni, hogy az általunk használt szemmozgáskövető módszer jó mérőeszköznek bizonyult.

Több kísérlet kimutatta a frontális théta-aktivitás és a statisztikai tanulási teljesítmény közötti negatív korrelációt (Tóth és mtsai., 2017), ennek ellenére sem Zavecz és kutatócsoportjának (2020) nem lettek szignifikáns eredményei, amikor a frontoparietális théta-

oszcillációkat szinkronizálták, sem nekünk. Ezeknek a fejlemények következtében érdemes megvizsgálni azt, hogy a théta-hullámokat tudjuk-e módosítani. Előfordulhat az, hogy non-invazív agystimulációval nem tudunk olyan hatást elérni a théta-oszcillációkban, amely a statisztikai tanulás mértékét módosítani tudná. Lehetséges, hogy az általunk használt stimuláció és paraméterek bizonyos kognitív funkciókat befolyásolni tudnak, például a munkamemóriát (Alekseichuk és mtsai., 2017; Chander és mtsai., 2016), azonban más kognitív funkciókra nincs hatással, például a statisztikai tanulásra. Korábbi kutatások azt találták, hogy az alfa- és béta-frekvenciák stimulálása az elsődleges motoros kéregben szignifikánsan jobb motoros szekvenciatanulást eredményezett a Szeriális Reakcióidő (Serial Reaction Time Task, SRTT) feladatban (Antal és mtsai., 2008; Pollok és mtsai., 2015). Ezekben a vizsgálatokban több frekvenciát is teszteltek, de egyikük sem alkalmazott théta-frekvenciát. Az említett kísérletekben determinisztikus szekvenciatanulási feladatok voltak, amelyek jobban támaszkodnak a motoros reprezentációkra, szemben a jelen vizsgálatban használt ASRT feladattal, ezért nem alkalmaztunk alfa vagy béta-hullámokra ható stimulációt. Jövőbeni vizsgálatok során érdemes lehet más frekvenciák szerepét vizsgálni a statisztikai tanulásban, és a munkamemória és a statisztikai tanulás kapcsolatának felderítésében. A munkamemória modulálására például Alekseichuk és munkatársai (2016) théta-gamma tACS-t alkalmaztak. Lehetséges, hogy a statisztikai tanulást nem a théta mediálja, a kontrolláltabb és az automatikus memória-folyamatok közötti kompetíció nem a théta-oszcillációkban, hanem esetleg más frekvenciák, vagy ezeknek a kombinációjában nyilvánul meg.

Annak, hogy a stimulációs és a kontrollcsoport eredményei között nem volt szignifikáns különbség, lehet egy oka az is, hogy bár a deszinkronizációval a funkcionális konnektivitást, azaz a neurális kapcsolatokat csökkentettük a frontális és parietális területek között, ami a statisztikai tanulás mértékének növelésével jár (Paraskevopoulos és mtsai., 2017; Park és mtsai., 2022; Tóth és mtsai., 2017), azonban a lokálisan a frontális területen a théta-oszcillációk mértékét növeltük, ami negatívan korrelál a statisztikai tanulással (Tóth és mtsai., 2017), csökkenti a tanulási teljesítményt. A frontális középvonalon mért théta növelése összefüggésbe hozható a kontrollált memória-folyamatokkal is (Cavanagh & Frank, 2014), így meglehet, hogy ez a két hatás kioltotta egymást.

Kóbor és munkatársai (2017) nem a statisztikai tanulás neurális hátterét, hanem a statisztikai memória kialakulásának alapjául szolgáló folyamatok dinamikus változását vizsgálták ASRT feladattal és azt találták, hogy a statisztikai tanulással megszerzett emléknym egy év után is előidézhető és ellenáll az interferenciának. Ez azt jelentheti, hogy a statisztikai emlékezet egy rendkívül stabil, robosztus struktúra (Kóbor és mtsai., 2017; Vékony és mtsai.,

2020). Lehetséges, hogy ebben a robosztus struktúrában a théta-oszcillációk módosítása nem eredményez azonnali viselkedéses változást. Azonban két korábbi stimulációs tanulmány talált stimulációs hatást a statisztikai tanulás konszolidációjában (Ambrus és mtsai., 2020; Janacsek és mtsai., 2015). Lehetséges, hogy EEG vagy más agyi képalkotó eljárás segítségével mérhető a különbség a két csoport között. Pupillometriával, mellyel a pupilla méretéből a meglepettség mértékére tudunk következtetni, vagy a szemmozgáskövető rendszer anticipációs szemmozgás adatainak elemzésével pontosabb eredményhez juthatunk (Zolnai és mtsai., 2022).

Egy lehetséges magyarázata lehet a szignifikáns különbség elmaradásának az is, hogy a kísérletben részt vevők a szemmozgáskövető segítségével túl jól tanultak – ami látszódik is az eredményeken – , így hamar elérték a maximális reakcióidővel kimutatható kapacitásukhoz, ezáltal pedig egy plafonhatás lépett fel. Ennél jobban már nem tudtak volna tanulni. A gyors tanulás azzal is magyarázható, hogy a kísérletben résztvevők 18 és 33 év közötti fiatalok voltak, fiatal korban pedig a szekvenciatanulás gyorsabb, a reakcióidők időtartama a kor előrehaladtával növekszik (Janacsek és mtsai., 2012). Janacsek és munkatársainak (2012) a tanulmánya rámutat arra, hogy a vizsgálati személy kora erősen befolyásolja a statisztikai tanulásban mutatott teljesítményt. Amennyiben idősebb korosztállyal is el tudnánk végezni a kísérletet, lehetséges lenne, hogy a csoportfőhatás szignifikáns eredményt mutatna, a kontrollcsoport lassabban tanulna, meglehet, hogy a nagyon gyors tanulás miatt kialakult plafonhatás nem érvényesülne, így a stimulációnak kimutatható lenne a hatása, miszerint a deszinkronizáció hatására jobb statisztikai tanulási teljesítmény mérhető.

Annak ellenére, hogy nagyon gyors a tanulás a szemmozgáskövetővel (Tal és mtsai., 2021; Zolnai és mtsai., 2022), a kísérletben résztvevők arról számoltak be, hogy a feladatok végére a szemük kiszáradt, elfáradtak, nehezebb volt koncentrálni. Ez megmutatkozott abban, hogy az első és második, illetve harmadik és negyedik epoch között nőtt a reakcióidő a stimulációs és a kontrollcsoportban is, ahogy a 4. ábrán is látszódik. Egy limitációnak tekinthető az is, hogy egy adatfelvétel körülbelül 3 órát vett igénybe. Ennek voltak részei, amik elengedhetetlenek, például az egészségügyi kérdőív, beleegyező nyilatkozatok aláírása és az EEG sapka felhelyezése, de több olyan feladatot is felvettem, amik nem képezik jelen tanulmány tárgyát és nem kerültek elemzésre. Az ASRT feladatok magukban is időigényes feladatok, így meglehet, hogy az adatfelvétel végére a vizsgálatban részt vevők elfáradtak és motivációjukat veszítették, így csökkent aktivitással és figyelemmel hajtották végre a feladatokat. Többen olyan visszajelzést adtak, hogy a stimuláció hatására kellemetlen, bizsergő érzést tapasztaltak, ami elvonhatta a figyelmüket, ezzel eredményezve nagyobb reakcióidőt.

Ugyanakkor egy magyarázat lehet az is, hogy a théta deszinkronizációnak egyáltalán nincs hatása a statisztikai tanulásra. Ez esetben felmerülhet a kérdés: ha korreláció kimutatható, kauzalitás miért nem. A frontális théta deszinkronizáció rontja a munkamemóriát, miért nem javítja a statisztikai tanulást, ha valóban kompetitív kapcsolat áll fenn a két rendszer között?

RÉSZVÉTEM A KUTATÁSBAN

Az Emlékezet, Nyelv és Idegtudomány kutatócsoport keretein belül már két éve ellátok feledatokat. Ebbe a projektbe körülbelül egy éve csatlakoztam be, ekkor az adatfelvételben segítettem. A dolgozat kérdésfelvetését én dolgoztam ki. A kísérlet során a szemmozgáskövető kalibrálása után instrukciót adtam a dolgozatban is említett feladatokhoz. Majd neuropszichológiai feladathoz (számlálási terjedelem feladat) adtam instrukciót. A feladatok után pedig néhány kérdést tettem fel a résztvevő alvására, egészségügyi adataira, bizonyos szerek fogyasztására, szocioökonómiai státuszára és készségek gyakorlására vonatkozóan, valamint Edinburgh Féltekei Dominanciatesztet (Oldfield, 1971) is felvettem. Továbbá az adatfelvétel apróbb logisztikai lépéseit (pl. sapka megtisztítása a mérést követően, EEG-zselé betöltése fecskendőbe) is elláttam. Az adatfelvételt követően az adatokat Dropbox mappába töltöttem fel, illetve a jegyzőkönyvet digitalizáltam.

Az elmúlt egy évben a kutatólaborban eltöltött időben nagyon sokat tanultam és fejlődtem, melynek eredménye egy támogatott ÚNKP pályázat lett, illetve a kari TDK-n való részvétel, melynek eredményeként továbbjutottam a következő évben, tavasszal tartandó OTDK-ra. A kutatásban részt vettem a toborzás részén, ugyanis az ismerőseim is szívesen jöttek a vizsgálatra. Ezen felül tudásomat még inkább mélyítettem a statisztikai és deklaratív tanulás területén, illetve az ezeket mérő feladatok ismeretében. A jegyzőkönyvek begépelésében és szűrésében is szerepem volt. A TDK-ra készülve pedig a statisztikai elemzésekben és az elméletek magyarázásában is elmélyedhettem.

KÖSZÖNETNYÍLVÁNÍTÁS

Ebben a dolgozatban is szeretném megköszönni a témavezetőimnek, Dr. Németh Dezsőnek és Pesthy Orsolyának, hogy a félévek során bármikor számíthattam rájuk, a kérdéseimmel fordulhattam hozzájuk.

ANYAGI TÁMOGATÁS

A Kulturális és Innovációs Minisztérium ÚNKP-22-1 kódszámú Új Nemzeti Kiválóság Programjának a Nemzeti Kutatási, Fejlesztési és Innovációs Alapból finanszírozott szakmai támogatásával készült.



IRODALOMJEGYZÉK:

- Albouy, G., Sterpenich, V., Balteau, E., Vandewalle, G., Desseilles, M., Dang-Vu, T., Darsaud, A., Ruby, P., Luppi, P.-H., Degueldre, C., Peigneux, P., Luxen, A., & Maquet, P. (2008). Both the hippocampus and striatum are involved in consolidation of motor sequence memory. *Neuron*, 58(2), 261–272. <https://doi.org/10.1016/j.neuron.2008.02.008>
- Alekseichuk, I., Pabel, S. C., Antal, A., & Paulus, W. (2017). Intrahemispheric theta rhythm desynchronization impairs working memory. *Restorative Neurology and Neuroscience*, 35(2), 147–158. <https://doi.org/10.3233/RNN-160714>
- Alekseichuk, I., Turi, Z., Amador de Lara, G., Antal, A., & Paulus, W. (2016). Spatial Working Memory in Humans Depends on Theta and High Gamma Synchronization in the Prefrontal Cortex. *Current Biology*, 26(12), 1513–1521. <https://doi.org/10.1016/j.cub.2016.04.035>
- Ambrus, G. G., Vékony, T., Janacsek, K., Trimborn, A. B. C., Kovács, G., & Nemeth, D. (2020). When less is more: Enhanced statistical learning of non-adjacent dependencies after disruption of bilateral DLPFC. *Journal of Memory and Language*, 114, 104144. <https://doi.org/10.1016/j.jml.2020.104144>
- Anderson, J. R. (1982). Acquisition of cognitive skill. *Psychological Review*, 89(4), 369–406. <https://doi.org/10.1037/0033-295X.89.4.369>
- Antal, A., Boros, K., Poreisz, C., Chaieb, L., Terney, D., & Paulus, W. (2008). Comparatively weak after-effects of transcranial alternating current stimulation (tACS) on cortical excitability in humans. *Brain Stimulation*, 1(2), 97–105. <https://doi.org/10.1016/j.brs.2007.10.001>
- Antal, A., & Paulus, W. (2013). Transcranial alternating current stimulation (tACS). *Frontiers in Human Neuroscience*, 7. <https://www.frontiersin.org/articles/10.3389/fnhum.2013.00317>
- Armstrong, B. C., Frost, R., & Christiansen, M. H. (2017b). The long road of statistical learning research: Past, present and future. *Philosophical Transactions of the Royal Society of London. Series B, Biological Sciences*, 372(1711), 20160047. <https://doi.org/10.1098/rstb.2016.0047>
- Aslin, R. N. (2017). Statistical learning: A powerful mechanism that operates by mere exposure. *Wiley Interdisciplinary Reviews. Cognitive Science*, 8(1–2). <https://doi.org/10.1002/wcs.1373>
- Caplan, J., & Glaholt, M. (2007). The roles of EEG oscillations in learning relational information. *NeuroImage*, 38, 604–616. <https://doi.org/10.1016/j.neuroimage.2007.07.054>
- Case, R., Kurland, D. M., & Goldberg, J. (1982). Operational efficiency and the growth of short-term memory span. *Journal of Experimental Child Psychology*, 33, 386–404. [https://doi.org/10.1016/0022-0965\(82\)90054-6](https://doi.org/10.1016/0022-0965(82)90054-6)
- Cavanagh, J. F., & Frank, M. J. (2014). Frontal theta as a mechanism for cognitive control. *Trends in cognitive sciences*, 18(8), 414–421. <https://doi.org/10.1016/j.tics.2014.04.012>
- Chander, B. S., Witkowski, M., Braun, C., Robinson, S. E., Born, J., Cohen, L. G., Birbaumer, N., & Soekadar, S. R. (2016b). TACS Phase Locking of Frontal Midline Theta Oscillations Disrupts Working Memory Performance. *Frontiers in Cellular Neuroscience*, 10, 120. <https://doi.org/10.3389/fncel.2016.00120>

- Daw, N. D., Niv, Y., & Dayan, P. (2005). Uncertainty-based competition between prefrontal and dorsolateral striatal systems for behavioral control. *Nature Neuroscience*, 8(12), 1704–1711. <https://doi.org/10.1038/nn1560>
- Eschmann, K. C. J., Bader, R., & Mecklinger, A. (2020). Improving episodic memory: Frontal-midline theta neurofeedback training increases source memory performance. *NeuroImage*, 222, 117219. <https://doi.org/10.1016/j.neuroimage.2020.117219>
- Filmer, H. L., Mattingley, J. B., & Dux, P. E. (2020). Modulating brain activity and behaviour with tDCS: Rumours of its death have been greatly exaggerated. *Cortex; a Journal Devoted to the Study of the Nervous System and Behavior*, 123, 141–151. <https://doi.org/10.1016/j.cortex.2019.10.006>
- Henke, K. (2010). A model for memory systems based on processing modes rather than consciousness. *Nature Reviews. Neuroscience*, 11(7), 523–532. <https://doi.org/10.1038/nrn2850>
- Howard, J. H., & Howard, D. V. (1997). Age differences in implicit learning of higher order dependencies in serial patterns. *Psychology and Aging*, 12(4), 634–656. <https://doi.org/10.1037/0882-7974.12.4.634>
- IBM SPSS Statistics 26 (Verzió 26). (2022). <https://www.ibm.com/support/pages/downloading-ibm-spss-statistics-26>
- Janacsek, K., Ambrus, G. G., Paulus, W., Antal, A., & Nemeth, D. (2015). Right hemisphere advantage in statistical learning: Evidence from a probabilistic sequence learning task. *Brain Stimulation*, 8, 277–282. <https://doi.org/10.1016/j.brs.2014.11.008>
- Janacsek, K., Fiser, J., & Nemeth, D. (2012). The best time to acquire new skills: Age-related differences in implicit sequence learning across the human lifespan. *Developmental Science*, 15(4), 496–505. <https://doi.org/10.1111/j.1467-7687.2012.01150.x>
- Janacsek, K., & Nemeth, D. (2015). The puzzle is complicated: When should working memory be related to implicit sequence learning, and when should it not? (Response to Martini et al.). *Cortex; a Journal Devoted to the Study of the Nervous System and Behavior*, 64, 411–412. <https://doi.org/10.1016/j.cortex.2014.07.020>
- Kaufman, S. B., Deyoung, C. G., Gray, J. R., Jiménez, L., Brown, J., & Mackintosh, N. (2010). Implicit learning as an ability. *Cognition*, 116(3), 321–340. <https://doi.org/10.1016/j.cognition.2010.05.011>
- Klimesch, W., Freunberger, R., Sauseng, P., & Gruber, W. (2008). A short review of slow phase synchronization and memory: Evidence for control processes in different memory systems? *Brain Research*, 1235, 31–44. <https://doi.org/10.1016/j.brainres.2008.06.049>
- Kóbor, A., Janacsek, K., Takács, Á., & Nemeth, D. (2017). Statistical learning leads to persistent memory: Evidence for one-year consolidation. *Scientific Reports*, 7(1), Art. 1. <https://doi.org/10.1038/s41598-017-00807-3>
- Kóbor, A., Takács, Á., Kardos, Z., Janacsek, K., Horváth, K., Csépe, V., & Nemeth, D. (2018). ERPs differentiate the sensitivity to statistical probabilities and the learning of sequential structures during procedural learning. *Biological Psychology*, 135, 180–193. <https://doi.org/10.1016/j.biopsycho.2018.04.001>
- Mitchell, D. J., McNaughton, N., Flanagan, D., & Kirk, I. J. (2008). Frontal-midline theta from the perspective of hippocampal „theta”. *Progress in Neurobiology*, 86(3), 156–185. <https://doi.org/10.1016/j.pneurobio.2008.09.005>

- Mrazek, M., Phillips, D., Franklin, M., Broadway, J., & Schooler, J. (2013). Young and restless: Validation of the Mind-Wandering Questionnaire (MWQ) reveals disruptive impact of mind-wandering for youth. *Frontiers in Psychology*, 4. <https://www.frontiersin.org/articles/10.3389/fpsyg.2013.00560>
- Nagy, M., Kónya, A., & Király, I. (2013). Az Asszociatív Emlékezet Fejlődése 6–10 Éves Kor És Fiatal Felnőttkor Között. *Pszichológia*, 33(3), 169–184. <https://doi.org/10.1556/pszicho.33.2013.3.2>
- Nemeth, D., Janacsek, K., & Fiser, J. (2013). Age-dependent and coordinated shift in performance between implicit and explicit skill learning. *Frontiers in Computational Neuroscience*, 7. <https://www.frontiersin.org/article/10.3389/fncom.2013.00147>
- Nitsche, M. A., & Paulus, W. (2000). Excitability changes induced in the human motor cortex by weak transcranial direct current stimulation. *The Journal of Physiology*, 527 Pt 3, 633–639. <https://doi.org/10.1111/j.1469-7793.2000.t01-1-00633.x>
- Oldfield, R. C. (1971). The assessment and analysis of handedness: The Edinburgh inventory. *Neuropsychologia*, 9(1), 97–113. [https://doi.org/10.1016/0028-3932\(71\)90067-4](https://doi.org/10.1016/0028-3932(71)90067-4)
- Paraskevopoulos, E., Chalas, N., & Bamidis, P. (2017). Functional connectivity of the cortical network supporting statistical learning in musicians and non-musicians: An MEG study. *Scientific Reports*, 7(1), Art. 1. <https://doi.org/10.1038/s41598-017-16592-y>
- Park, J., Janacsek, K., Nemeth, D., & Jeon, H.-A. (2022). Reduced functional connectivity supports statistical learning of temporally distributed regularities. *NeuroImage*, 260, 119459. <https://doi.org/10.1016/j.neuroimage.2022.119459>
- Petrides, M., Alivisatos, B., Meyer, E., & Evans, A. C. (1993). Functional activation of the human frontal cortex during the performance of verbal working memory tasks. *Proceedings of the National Academy of Sciences*, 90(3), 878–882. <https://doi.org/10.1073/pnas.90.3.878>
- Poldrack, R. A., Clark, J., Paré-Blagoev, E. J., Shohamy, D., Creso Moyano, J., Myers, C., & Gluck, M. A. (2001). Interactive memory systems in the human brain. *Nature*, 414(6863), 546–550. <https://doi.org/10.1038/35107080>
- Pollok, B., Boysen, A.-C., & Krause, V. (2015). The effect of transcranial alternating current stimulation (tACS) at alpha and beta frequency on motor learning. *Behavioural Brain Research*, 293, 234–240. <https://doi.org/10.1016/j.bbr.2015.07.049>
- Riddle, J., Scimeca, J. M., Cellier, D., Dhanani, S., & D’Esposito, M. (2020). Causal Evidence for a Role of Theta and Alpha Oscillations in the Control of Working Memory. *Current Biology*, 30(9), 1748–1754.e4. <https://doi.org/10.1016/j.cub.2020.02.065>
- Rossi, S., Cappa, S. F., Babiloni, C., Pasqualetti, P., Miniussi, C., Carducci, F., Babiloni, F., & Rossini, P. M. (2001). Prefrontal cortex in long-term memory: An „interference” approach using magnetic stimulation. *Nature Neuroscience*, 4(9), 948–952. <https://doi.org/10.1038/nn0901-948>
- Saffran, J. R., Aslin, R. N., & Newport, E. L. (1996a). Statistical learning by 8-month-old infants. *Science (New York, N.Y.)*, 274(5294), 1926–1928. <https://doi.org/10.1126/science.274.5294.1926>
- Shallice, T., Fletcher, P., Frith, C. D., Grasby, P., Frackowiak, R. S., & Dolan, R. J. (1994). Brain regions associated with acquisition and retrieval of verbal episodic memory. *Nature*, 368(6472), 633–635. <https://doi.org/10.1038/368633a0>

- SimNIBS*. (2022). [HTML]. SimNIBS. <https://github.com/simnibs/simnibs> (Original work published 2019)
- Spielberger, C., Gorsuch, R., Lushene, R., Vagg, P., & Jacobs, G. (1983). Manual for the State-Trait Anxiety Inventory (Form Y1 – Y2). In *Palo Alto, CA: Consulting Psychologists Press; Köt. IV*.
- Squire, L. R. (2004). Memory systems of the brain: A brief history and current perspective. *Neurobiology of Learning and Memory*, 82(3), 171–177. <https://doi.org/10.1016/j.nlm.2004.06.005>
- Tal, A., Bloch, A., Cohen-Dallal, H., Aviv, O., Schwizer Ashkenazi, S., Bar, M., & Vakil, E. (2021). Oculomotor anticipation reveals a multitude of learning processes underlying the serial reaction time task. *Scientific Reports*, 11(1), 6190. <https://doi.org/10.1038/s41598-021-85842-x>
- Tobii. (2022, december). <https://help.tobii.com/hc/en-us>
- Tobii Pro SDK. (2022). <https://www.tobii.com/products/software/applications-and-developer-kits/tobii-pro-sdk/>
- Tobii, AB. (2017). Tobii Pro X3–120 eye tracker: Product description. <https://www.tobii.com/siteassets/tobii-pro/product-descriptions/tobii-pro-x3-120-product-description.pdf> Retrieved 19. April, 2022.
- Tóth, B., Janacek, K., Takács, Á., Kóbor, A., Zavecz, Z., & Nemeth, D. (2017). Dynamics of EEG functional connectivity during statistical learning. *Neurobiology of Learning and Memory*, 144, 216–229. <https://doi.org/10.1016/j.nlm.2017.07.015>
- Turk-Browne, N. B., Scholl, B. J., Chun, M. M., & Johnson, M. K. (2009). Neural Evidence of Statistical Learning: Efficient Detection of Visual Regularities Without Awareness. *Journal of Cognitive Neuroscience*, 21(10), 1934–1945. <https://doi.org/10.1162/jocn.2009.21131>
- Tzur, G., & Berger, A. (2007). When things look wrong: Theta activity in rule violation. *Neuropsychologia*, 45(13), 3122–3126. <https://doi.org/10.1016/j.neuropsychologia.2007.05.004>
- Vékony, T., Török, L., Pedraza, F., Schipper, K., Pleche, C., Tóth, L., Janacek, K., & Nemeth, D. (2020). Retrieval of a well-established skill is resistant to distraction: Evidence from an implicit probabilistic sequence learning task. *PLOS ONE*, 15(12), e0243541. <https://doi.org/10.1371/journal.pone.0243541>
- Virag, M., Janacek, K., Horvath, A., Bujdosó, Z., Fabo, D., & Nemeth, D. (2015). Competition between frontal lobe functions and implicit sequence learning: Evidence from the long-term effects of alcohol. *Experimental Brain Research*, 233(7), 2081–2089. <https://doi.org/10.1007/s00221-015-4279-8>
- Watson, D., Clark, L. A., & Tellegen, A. (1988). Development and validation of brief measures of positive and negative affect: The PANAS scales. *Journal of Personality and Social Psychology*, 54(6), 1063–1070. <https://doi.org/10.1037/0022-3514.54.6.1063>
- Yavari, F., Jamil, A., Mosayebi Samani, M., Vidor, L. P., & Nitsche, M. A. (2018). Basic and functional effects of transcranial Electrical Stimulation (tES)-An introduction. *Neuroscience and Biobehavioral Reviews*, 85, 81–92. <https://doi.org/10.1016/j.neubiorev.2017.06.015>

- Zavecz, Z., Horváth, K., Solymosi, P., Janacsek, K., & Nemeth, D. (2020). Frontal-midline theta frequency and probabilistic learning: A transcranial alternating current stimulation study. *Behavioural Brain Research*, 393, 112733. <https://doi.org/10.1016/j.bbr.2020.112733>
- Zolnai, T., Dávid, D. R., Pesthy, O., Nemeth, M., Kiss, M., Nagy, M., Nemeth, D., & Ergul, A. (2022). Measuring statistical learning by eye-tracking. *Experimental Results*, 3, e10. <https://doi.org/10.1017/exp.2022.8>